

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
Российская академия ракетных и артиллерийских наук
Российская академия естественных наук



XVII Международная молодежная научно-техническая конференция

«МОЛОДЕЖЬ. ТЕХНИКА. КОСМОС»

**Приуроченная к 150-летию со дня основания
Ремесленного училища цесаревича Николая**

Том 3

**Санкт-Петербург, Россия
24 по 27 марта 2025 года**

Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 130

Санкт-Петербург
2025

УДК 629.78 : 623.4
М75

М75 Молодёжь. Техника. Космос: труды семнадцатой общероссийской молодёжной науч.-техн. конф. в 4 т. Т. 3. СПб, Издательство Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2025. – 252 с. – Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 130

Публикуются статьи и доклады, представленные на XVII международной молодёжной научно-технической конференции «Молодёжь. Техника. Космос», прошедшей в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в марте 2025 года. В первый том сборника вошли материалы секций: «Радиотехника и схемотехника», «Робототехника и мехатроника», «Фотоника и лазерная техника» и «Экология, охрана окружающей среды и производственная безопасность».

Для инженерных и научных специалистов, работающих в указанных направлениях, а также для студентов старших курсов и аспирантов профильных вузов.

Отзывы направлять по адресу: Россия, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1. Редакция журнала «Военмех. Вестник БГТУ».

УДК 629.78: 623.4

Редакционный совет: д-р техн. наук, проф. К. М. Иванов (председатель), д-р техн. наук, проф. А. Е. Шашурин, канд. ист. наук, доц. М. Н. Охочинский, Ю.В. Каун

Ответственный редактор серии «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ» М. Н. Охочинский

Тексты статей публикуются в авторской редакции

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 5

РАДИОТЕХНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ШУМНОГО КАНАЛА: ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ПОТЕРЬ.....	7
И.С. Гаршин, П.А. Панилов	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ ОТ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ, ИНФРАКРАСНЫХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ БПЛА	12
А.С. Хороших, Л.Д. Перов, И.А. Макеев	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ КОРАБЛЯ ПО РАДИОЛОКАЦИОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ КИЛЬВАТЕРНОГО СЛЕДА	15
Р.М. Норман, В.В. Ступин	
НИЗКОВОЛЬТНЫЙ МАГНИТНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ КОСМОСА	19
Д.П. Ефимов	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ДОМАШНИХ УСЛОВИЯХ	24
Д.П. Ефимов	
МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	30
П.Ю. Филатов	
ОБЗОР СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ БАС	35
Е.А. Михайлов, В.Е. Иванов, В.А. Завьялов	
РАЗРАБОТКА ПОЛОТНА КЛАСТЕРИЗОВАННОЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ	41
Г.С. Аникин, С.С. Сидоренко	
ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РА ПОЗНАВАНИЯ ВИДОВ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ.....	44
В.К. Курбаналиев	
РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БЮДЖЕТА КАНАЛА СВЯЗИ	47
А.С. Долматов, А.С. Стукалова, В.Е. Алексеев	
ВЛИЯНИЕ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЕРЕДАЧУ ЭНЕРГИИ И ДАННЫХ ИНДУКТИВНЫМ СПОСОБОМ.....	51
А.Ю. Пронякина, Е.А. Миронова, В.Д. Чудинов	
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ФОРМЫ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ	54
В.С. Споданейко, М.А. Крылова	
МАТЕРИАЛЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ.....	60
В.М. Карнацкий, А.В. Круглов	
ПРИМЕНЕНИЕ МЯГКОГО ПРИВОДА В СОВРЕМЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ	63
А.В. Круглов, В.М. Карнацкий	
ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SIMINTESCH ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ САУ РЭС	66
В.В. Вейснер, А.С. Гордиенко	

СЕКЦИЯ 6

РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОВЕРКИ ПЛАТФОРМЕННЫХ ВЕСОВ.....	69
В.В. Магдыч, А.О. Каламитцев	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА ПРИВОДА УСТРОЙСТВА ПОВОРОТНОГО СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ.....	72
В.А. Курбанова	
МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ПОЛНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА	76
С.А. Гудков, Е. Ю. Минаев	
ОБЗОР АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	79
А.Р. Холодилина, А.С. Егоров, Н.А. Корнеев	
УСТРОЙСТВО И КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ПРОТЕЗА КОЛЕННОГО СУСТАВА.....	83
Д.А. Авдонин, В.А. Патлахов, Н.С. Слободзян	
ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКИМИ РЕАБИЛИТАЦИОННЫМИ ЭКСОСКЕЛЕТАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ	86
А. А. Мухитов, Н. И. Авдиенко, Д.И. Чекулаев	
ОБЗОР SAN-ПРОТОКОЛОВ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	92
Т.А. Скрыков, Н.М. Шевченко, Н.А. Кузнецов, П.И. Сидорова	
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАНИПУЛЯТОРА	95
Г.Э. Майборodin	
АЛГОРИТМ СЛЕПОГО ПОИСКА ПРОИЗВОЛЬНО РАСПОЛОЖЕННОЙ ПЛОСКОСТИ АВТОНОМНОЙ БЕСПИЛОТНОЙ СИСТЕМОЙ	99
И.А. Рыжих, М.В. Рыжов	
КДМЕ23 – НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ МНОГОЦЕЛЕВЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ	102
Д.А. Комаров, Е.П. Морозов	
ФОРМИРОВАНИЕ ВЗАИМООГИБАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОГО ИЗНОСА	108
Р. Р. Прудников	
РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ С ПОСТОЯННОЙ ДЛИНОЙ СТОЕК ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО ВАКУУМА.....	112
В.В. Полянский, Н.М. Мухамедов	
СЕКЦИЯ 7	
ФОТОНИКА И ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА	
ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ	116
Г.Р. Демьянчук, С.С. Рудый, В.В. Рыбин	
РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ХИМИЧЕСКОГО КИСЛОРОДНО-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА.....	120
Д.Ф. Изосимов, Д.А. Рычкова	
ПОРТАТИВНЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ АВТОДИННОГО ЭФФЕКТА В ЛАЗЕРНЫХ ДИОДАХ	125
А.В. Рыбалтовский, И.С. Мамаев, Г.О. Даниленко, А.В. Ковалев	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ ЧАСТИЦ В ЛАЗЕРНОМ ПИНЦЕТЕ	127
Д.А. Глухарёв	
ДИНАМИКА МИКРОГАНТЕЛИ В ОПТИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ С ГАУССОВЫМ ПРОФИЛЕМ ПУЧКА.....	131
А.С. Лещев	

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА В ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ZEMAX.....	136
О.Д. Кибирева	
РАЗРАБОТКА КВАНТОВО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ GAAS P-I-N ДИОДА	140
Г.А. Касапиди	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСНОГО СОСТАВА ПЛАСТИНЫ НРНТ АЛМАЗА, ЛЕГИРОВАННОЙ БОРОМ, НЕРАЗРУШАЮЩИМ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	144
Н.С. Телицын	
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ЛАЗЕРА НА СВЕРЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА В УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ	147
П.С. Куранов, Е.Г. Руденский, А.Т. Ульяненок	
ВЛИЯНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ЛИНЗЫ НА СКОРОСТЬ ПРОБИТИЯ И ДИАМЕТР ОТВЕРСТИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ СВЕРЛЕНИИ СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ.....	152
А.В. Чепыжова, С. А. Селиванова, Л.А. Новоселова	
ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ВЫХОДНОГО ЗЕРКАЛА НА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ КПД ЛАЗЕРА	157
С.С. Макарин, Д.А. Гацко, М.М. Соловьёв	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДЕНОВИРУСА В ЖИДКИХ ОБРАЗЦАХ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНО УСИЛЕННОЙ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....	160
А.Т. Табаров, К.В. Пригода, А.А. Ермина	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВИРУСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	164
Д.А. Крылов	
ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО ШУМА НА ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОФОТОННЫХ РАДАРОВ.....	166
М.М. Ткачик	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСТАНЦИИ В 3Д СКАНЕРАХ НА ОСНОВЕ ФАЗОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ	170
Д.К. Бобрецов	
АНАЛИЗ КРАЯ СОБСТВЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ	175
К. Е. Брусина, А. В. Соломникова	
ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА С ВЫСОКИМ ЗНАЧЕНИЕМ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 800-900 НМ	178
А.С. Митрофанова, М. В. Гавриш	
СЕКЦИЯ 8	
ЭКОЛОГИЯ, ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	
И ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	
К ВОПРОСУ О МЕТОДАХ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ВЫБРОСОВ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ ОТ АВТОТРАНСПОРТА	181
Е.А. Василенко, А.Г. Лозинский, А.А. Шишкин, П.Л. Лазукин	
К ВОПРОСУ О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ	185
Р.И. Абрамович, П.Л. Лазукин, А.Г. Лозинский, А.А. Шишкин	
ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК ZN-CU-TI-O ОБЛАДАЮЩИХ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЭКСТРАКЦИОННО-ПИРОЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ.....	188
А.О. Захарова, Ф.Э. Кожевников	
КАТАЛИТИЧЕСКИЕ НАНОПОКРЫТИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ МЕТАНА	193
А. Ю. Мильчаков	
ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РАСЧЕТА РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ.....	197

Д.Е. Артеменко., Р.С. Богомолов, И.А. Соболев, Д.А. Азанов

ОЦЕНКА РИСКА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ГОДА.....202
Я.Л. Заидова, И.П. Панина

О НЕОБХОДИМОСТИ И ОСОБЕННОСТЯХ ОБУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ТРУДА.....204
Д.Г. Шаповалова, П.А. Симонова, Н.А. Шмырова

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ:
ОНЛАЙН-КУРСЫ И СИМУЛЯТОРЫ.....210
К.А. Вовна, У.А. Вовченко

ЗАЩИТА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ОТ ШУМА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....214
С.В. Ершов

МАРШРУТНАЯ СЪЕМКА КАК ИНСТРУМЕНТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
РАЙОНОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С БОРТА РС МКС221
В.В. Коротких

ОЦЕНКА РИСКОВ НА ГАЗОПРОВОДЕ-ОТВОДЕ И ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ
СТАНЦИИ.....226
Д.М. Олейник

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ ПИПЕРАЗИНА И МОРФОЛИНА229
Д.В. Степанова, А.Н. Лапушкина, Р.В. Якушин, Д.А. Александрова

SPARC: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ПРЕДСКАЗАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ
ПОГОДЫ234
А.А. Белов, М.А. Будяков

ЕСОACTIVITY: СОЗДАНИЕ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА, УПРАВЛЕНИЯ И
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ239
М.А. Будяков, А.А. Белов

СНИЖЕНИЕ УРОВНЕЙ ШУМА НА ПРЕДПРИЯТИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ КАРТОНА
В ЦЕЛЯХ УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ ТРУДА242
И.П. Панина

ПУТИ СНИЖЕНИЯ РИСКА ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА
НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА.....245
А.И. Рогалев

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА НА ПРЕДПРИЯТИИ:
ПУТЬ К УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ И ОТВЕТСТВЕННОМУ ОТНОШЕНИЮ К
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ.....249
Н.А. Шмырова, П.А. Симонова, Д.Г. Шаповалова

СЕКЦИЯ 5

РАДИОТЕХНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

УДК 004.896

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ШУМНОГО КАНАЛА: ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙПРОСЕТЕЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ПОТЕРЬ

И.С. Гаришин, П.А. Панилов

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)*

Характеристика шумного канала и виды шума

Шумной канал связи – это канал передачи информации, в котором сигнал подвержен воздействию различных видов шума, приводящих к искажениям, потере данных и ухудшению качества связи. Влияние шума выражается в снижении отношения сигнал/шум (SNR), увеличении вероятности битовой ошибки (BER) и общем снижении надежности передачи данных.

Основные характеристики шумного канала:

- Затухание сигнала – ослабление мощности сигнала при его распространении.
- Дисперсия сигнала – рассеивание энергии сигнала, которое может приводить к интерференции.
- Интерференция – наложение посторонних сигналов, создающих помехи.
- Искажение сигнала – изменение формы сигнала из-за нелинейных свойств канала.

Типы шумов, влияющих на сигнал:

1. Белый гауссовский шум (AWGN – Additive White Gaussian Noise)

- Представляет собой случайный шум, имеющий нормальное (гауссовское) распределение по амплитуде [1];
- Основная причина – тепловые флуктуации в электронных компонентах [2,3];
- Влияет на все частоты одинаково, вызывая равномерные помехи;
- Хорошо описывается математическими моделями и широко применяется в теории связи.

2. Импульсный шум

- Характеризуется короткими, но мощными выбросами амплитуды.
- Может возникать из-за электромагнитных помех (например, молнии, искрения контактов, электродвигателей).
- Влияет на сигнал резко, вызывая значительные ошибки в передаче.

3. Интерференционный шум

- Возникает при наложении сигналов от разных источников, работающих на близких частотах;
- Может быть как случайным (например, радиочастотные помехи), так и систематическим (например, перекрестные наводки между линиями связи);
- В беспроводных системах часто проявляется из-за работы нескольких устройств на одном и том же канале;

4. Фликкер-шум (1/f-шум, розовый шум)

- Характеризуется спектральной плотностью, обратно пропорциональной частоте (чем ниже частота, тем больше мощность шума).
- Основные источники – процессы, связанные с нестабильностью компонентов (например, изменения тока в полупроводниках, дефекты в материалах).
- Проявляется в низкочастотной области и может существенно исказить медленные процессы (например, в электронике, биологических системах, финансовых рынках).
- В отличие от белого шума, неравномерно распределен по частотам и сложнее поддается математическому моделированию.

Моделирование белого гауссовского шума

Белый гауссовский шум (AWGN) можно смоделировать с помощью генерации случайных чисел, распределённых по нормальному (гауссовскому) закону (Рис. 1). Математически он описывается следующим образом:

$$w(t) \sim N(0, \sigma^2)$$

- $N(0, \sigma^2)$ - нормальное распределение со средним 0 и дисперсией σ^2 ;
- σ^2 — мощность шума, связанная с уровнем шума (обычно определяется через отношение сигнал/шум, SNR).

Чтобы получить AWGN, можно сгенерировать случайные числа из нормального распределения, используя функции стандартных математических библиотек. Формула для моделирования шума:

$$y = x + w$$

- x — исходный сигнал;
- w — добавленный гауссовский шум;
- y — зашумленный сигнал.

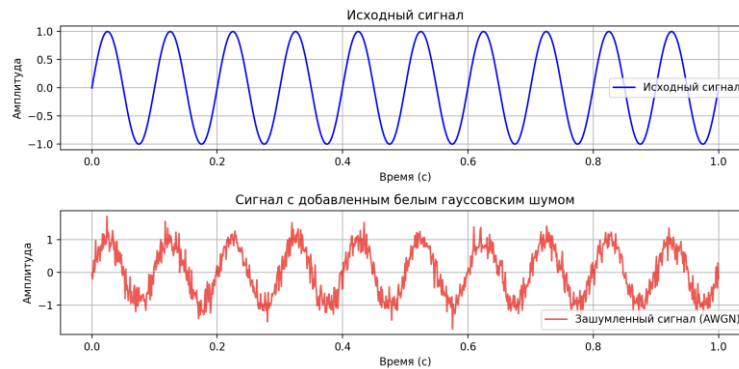


Рис. 1. График распространения исходного сигнала и сигнала с AWGN

Для расшифровки сигнала с наложенным белым шумом можно применить принцип машинного обучения. Для обучения модели берется изображение синусоиды сигнала с добавленным белым гауссовским шумом и преобразуется в массив пикселей, затем массив передается модели и машина анализирует массив по алгоритму на Рис. 2.

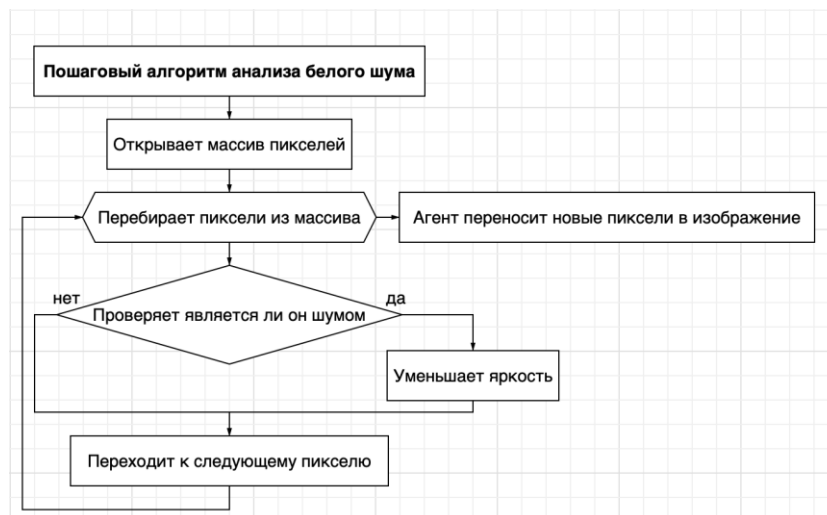


Рис. 2. Алгоритм расшифровки сигнала с наложенным белым шумом

Моделирование импульсного шума

Импульсный шум — это шум, который характеризуется резкими, кратковременными выбросами высокой амплитуды [4,5]. Он может возникать из-за электромагнитных помех, разрядов или ошибок в передаче данных.

Импульсный шум можно смоделировать как редкие, случайно возникающие импульсы большой амплитуды. Это можно описать следующим образом:

$$w(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \delta(t - t_i)$$

- A_i — амплитуда импульса, выбираемая случайным образом;
- t_i — случайные моменты времени появления импульсов;
- $\delta(t)$ — дельта-функция, моделирующая резкий выброс.

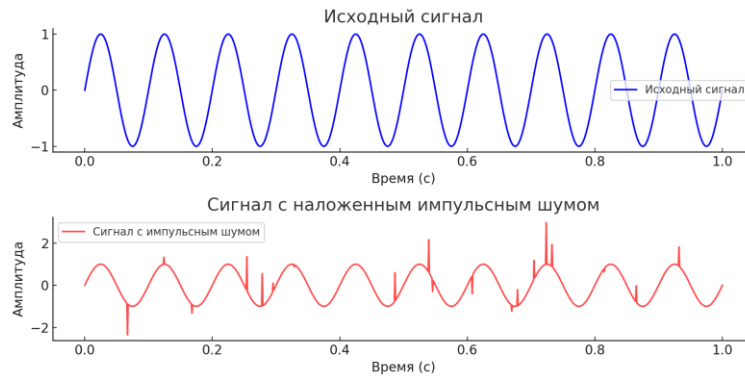


Рис. 3. График распространения исходного сигнала и сигнала с импульсным шумом

Для расшифровки сигнала с наложенным импульсным шумом можно применить принцип машинного обучения. Для обучения модели берется изображение синусоиды сигнала с добавленным шумом и преобразуется в массив пикселей, затем массив передается модели, и машина анализирует массив по алгоритму на Рис. 4.

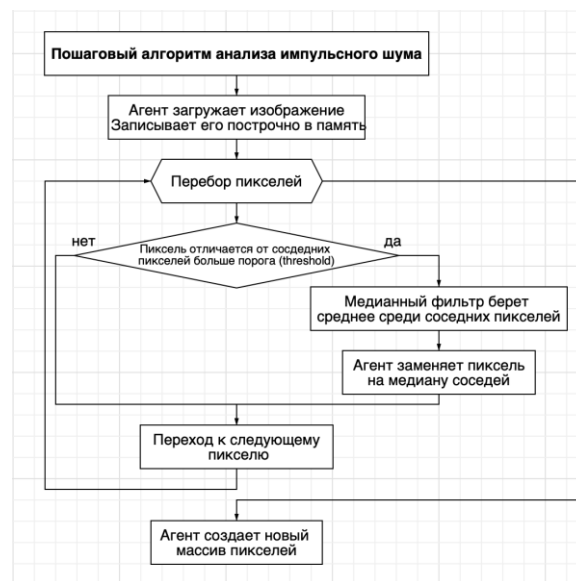


Рис. 4. Алгоритм расшифровки сигнала с наложенным импульсным шумом

Моделирование интерференционного шума

Интерференционный шум можно смоделировать несколькими способами, но один из самых наглядных методов — это наложение двух (или более) синусоидальных сигналов с разными частотами и фазами [6,7].

Когда два сигнала с разными частотами накладываются друг на друга, они могут вызывать:

- Конструктивную интерференцию (усиление сигнала, когда фазы совпадают);
- Деструктивную интерференцию (ослабление сигнала, когда фазы противоположны).

Формула для суперпозиции двух сигналов:

$$y = x_1 + x_2$$

- $x_1 = A_1 \cdot \sin(2\pi f_1(t))$ — основной сигнал;
- $x_2 = A_2 \cdot \sin(2\pi f_2(t) + \varphi)$ — мешающий сигнал с другой частотой и фазой.

В реальных системах могут накладываться множество сигналов, что приводит к сложным искажениям. Тогда можно использовать:

$$y = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi f_i(t) + \phi_i)$$

- N — количество мешающих сигналов.

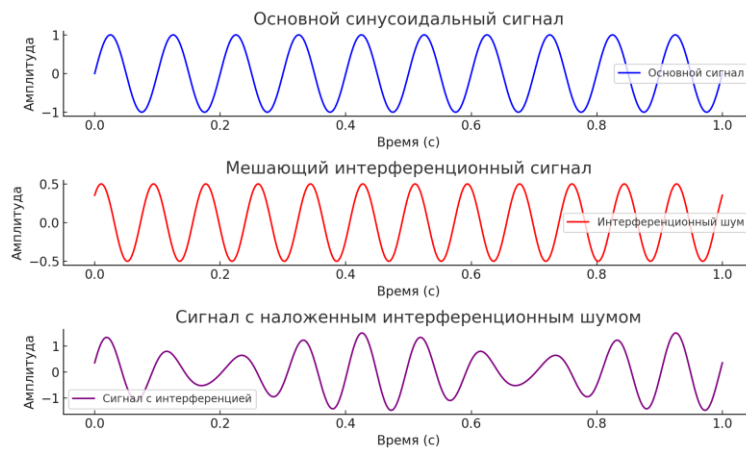


Рис. 5. График распространения исходного сигнала и сигнал, представляющий их интерференцию

Для расшифровки сигнала с наложенным интерференционным шумом можно применить принцип машинного обучения. Для обучения модели берется список амплитуд сигналов с добавленным шумом, затем массив передается модели, и машина анализирует массив по алгоритму на Рис. 6.

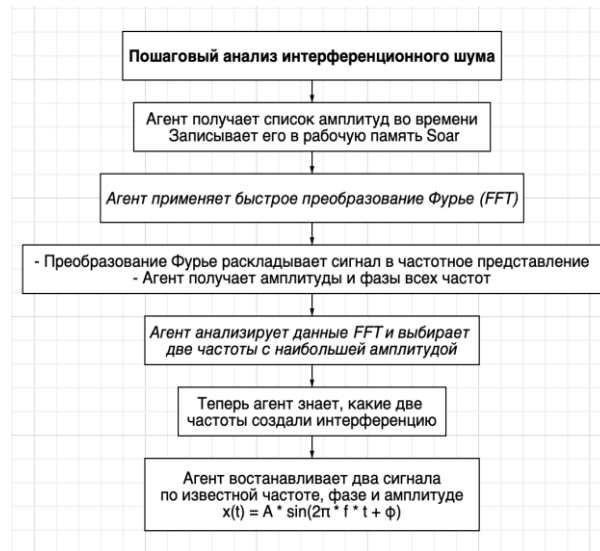


Рис. 6. Алгоритм расшифровки сигналов, подверженных интерференции

Моделирование фликкер-шума

Фликкер-шум – это тип шума, у которого спектральная плотность мощности убывает обратно пропорционально частоте [8]. Формула спектральной плотности:

$$S(f) \propto 1/f^\alpha$$

- $S(f)$ – мощность сигнала на частоте f ;
- α – показатель наклона спектра (обычно $\alpha = 1$ для классического фликкер-шума);
- f – частота в спектре сигнала.

Шаги моделирования:

1. Генерация белого шума;
2. Вычисление частоты дискретного преобразования Фурье (FFT);
3. Изменение спектра белого шума так, чтобы его амплитуда спадала по закону $1/f$. Мы делим белый шум на корень из частоты, чтобы создать требуемое затухание спектра. Таким образом, низкочастотные компоненты остаются мощными, а высокочастотные ослабляются;
4. После фильтрации мы получаем временной сигнал, применяя обратное преобразование Фурье (IFFT);
5. Нормализация сигнала. Фликкер-шум может иметь произвольную амплитуду, поэтому его масштабируют. Вводится ограничение максимальной амплитуды до 0.5, чтобы шум не превышал по уровню основной сигнал.

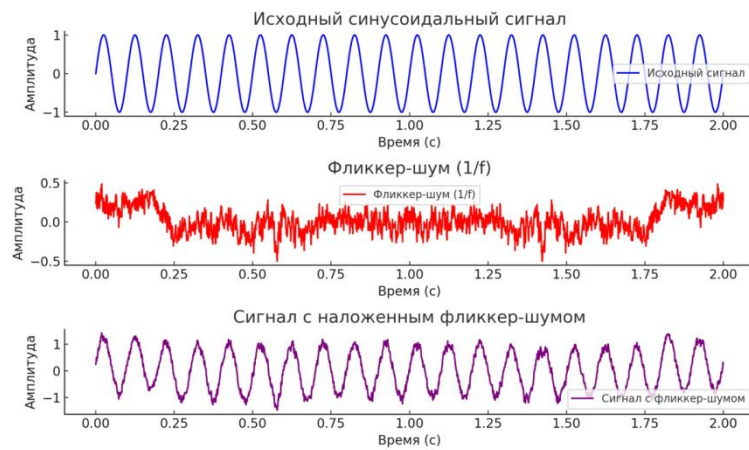


Рис. 7. График распространения исходного сигнала и сигнала с наложенным фликкер-шумом

Пример исходного сигнала с каждым из шумов на Рис. 8.

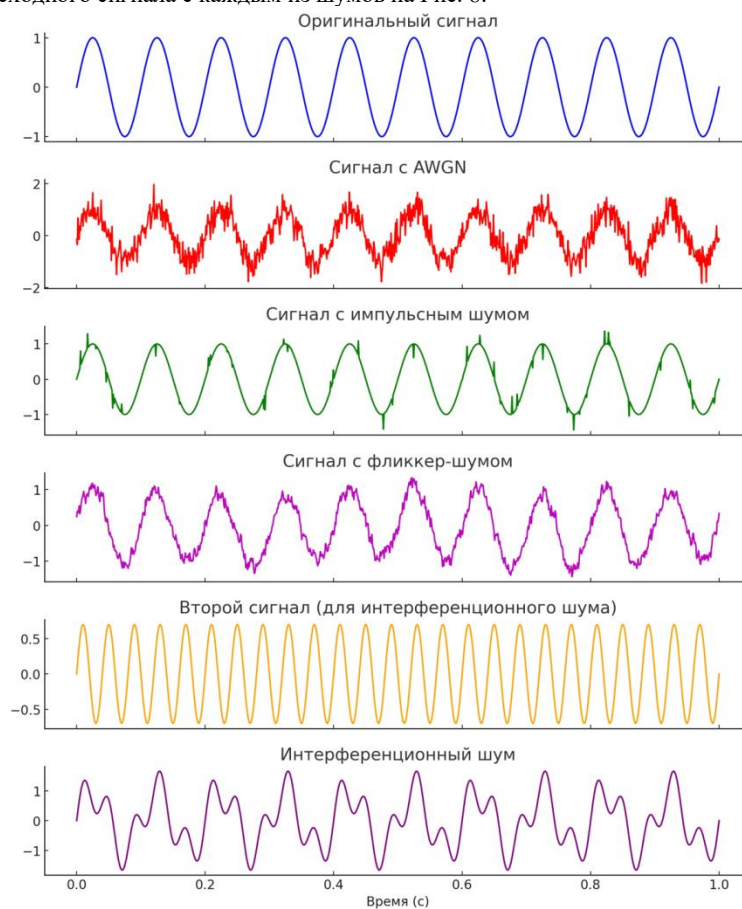


Рис. 8. Оригинальный сигнал с каждым шумом

В данной работе рассмотрены основные виды шумов, влияющих на качество сигнала в каналах связи, а также методы их моделирования и компенсации. Каждый из рассмотренных в работе типов шумов по-разному влияет на передаваемый сигнал, что требует применения специализированных методов обработки и анализа сигнала.

Одним из наиболее перспективных подходов к повышению качества сигнала является использование нейросетевых методов. Применение машинного обучения позволяет эффективно компенсировать искажения сигнала, возникающие под воздействием шумов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются улучшение алгоритмов нейросетевой обработки, а также их адаптация к реальным условиям передачи данных в беспроводных и оптоволоконных сетях. Развитие этих технологий может значительно повысить надежность связи и оптимизировать потери данных в условиях реальных шумовых помех.

Научный руководитель – д.п.н, доцент Т.Ю. Цибизова

Библиографический список

1. Журавковский, В. Н. Потенциальная точность оценки частот сигнала, представляющего смесь двух комплексных экспонент и белого гауссовского шума / В. Н. Журавковский, А. С. Логвиненко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – Т. 23, № 8. – С. 64-68.
2. Кашаев, Е. Д. Низкочастотный генератор гауссовского шума / Е. Д. Кашаев, Е. С. Селезнев, А. В. Чернов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : Сборник статей Международной научно-технической конференции, Пенза, 23–25 апреля 2013 года / под редакцией М. А. Щербакова. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2013. – С. 479-482.
3. Математические основы сингулярной фильтрации сигналов на фоне белого гауссовского шума / Л. Н. Косарева, В. А. Прасолов, С. В. Франков, С. Н. Шиманов // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2014. – Т. 4, № 2. – С. 127-129.
4. Нечаев, Ю. Б. Алгоритм оценивания количества сигналов при наличии негауссовского импульсного шума / Ю. Б. Нечаев, С. А. Зотов // Теория и техника радиосвязи. – 2008. – № 1. – С. 33-39.
5. Илюкович, А. И. Влияние импульсного шума на надёжность беспроводных устройств / А. И. Илюкович // МОДЕЛИ и МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ исследований : сборник статей Международной научно-практической конференции, Воронеж., 03 декабря 2019 года. Том Часть 3. – Воронеж.: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2019. – С. 47-49.
6. Нелинейный интерференционный шум в системах связи 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK / Н. В. Гуркин, О. Е. Наний, А. Г. Новиков [и др.] // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 6. – С. 550-553.

УДК 629.735

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ ОТ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ, ИНФРАКРАСНЫХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ БПЛА

А.С. Хороших, Л.Д. Перов, И.А. Макеев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в последние годы активно внедряются в различные сферы деятельности, сельское хозяйство, экологический мониторинг, мониторинг инфраструктурных объектов. Согласно отчету MarketsandMarkets, к 2026 году мировой рынок БПЛА достигнет 58,4 миллиарда долларов, при этом интеграция бортовых мультиспектральных сенсорных систем БПЛА является одним из ключевых факторов роста [2]. Критическим фактором эффективного применения БПЛА является точное и надежное выявление, классификация и отслеживание целей в на борту БПЛА в масштабе времени близком к реальному широком диапазоне внешних условий, включая сложные метеорологические ситуации, недостаточную освещенность и наличие визуальных препятствий [1]. Для решения этих задач современные БПЛА предлагается оснащать бортовыми мультиспектральными сенсорными системами, интегрирующими телевизионный (ТВ), инфракрасный (ИК) и радиолокационный (РЛ) диапазоны. Каждый из этих спектральных каналов характеризуется уникальными возможностями, дополняющими друг друга и повышающими общую эффективность комплексных систем распознавания целей на борту БПЛА.

ТВ-диапазон обеспечивает высокое пространственное разрешение и возможность визуального анализа объектов в условиях достаточной освещенности, а также его физического восприятия органами зрения человека. Его пространственное разрешение R_{TV} может достигать до 0,1 метра на пиксель при использовании современных камер (например, DJI Zenmuse X7, Sony Alpha 7R IV). Формула пространственного разрешения определяется как:

$$R = \frac{\lambda H}{D}$$

где:

λ - длина волны света,

H - высота полета БПЛА,

D - диаметр апертуры объектива.

Применение ТВ-камер эффективно при детальном обследовании технических сооружений, мониторинге агротехнических процессов и экологическом надзоре, поскольку в благоприятных условиях они дают возможность идентификации мелких деталей объектов. Плюсы ТВ-систем включают высокое пространственное разрешение и детальность, возможность визуального опознавания объектов, что обеспечивает удобство идентификации, а также возможность контролировать технические объекты, инфраструктуру и проводить экологический мониторинг в условиях естественной освещенности. Однако главный недостаток ТВ-диапазона заключается в чувствительности к неблагоприятным метеорологическим условиям (осадки, облачность, туман), а

также в существенном снижении качества при недостаточной или ночной освещенности. Таким образом, при выборе ТВ-камер необходимо учитывать режимы освещения и погодные ограничения.

ИК-сенсоры фиксируют тепловое излучение объектов, что делает их эффективными при низком уровне видимости или в ночное время. Мощность теплового излучения P_{IR} объекта может быть выражена через закон Стефана–Больцмана:

$$P_{IR} = \epsilon \sigma T^4 A$$

где:

ϵ - эмиссивность,

σ - постоянная Стефана–Больцмана,

T - температура объекта,

A - площадь излучающей поверхности.

Благодаря чувствительности к тепловым контрастам, ИК-сенсоры позволяют выявлять потенциально «скрытые» цели, контролировать состояние растительности, биологических объектов и промышленного оборудования [2,5]. Плюсы ИК-систем включают возможность работы при низком уровне видимости, в том числе ночью, фиксацию тепловых аномалий, что важно при поиске людей, животных, а также применимость в сельском хозяйстве и экологии для оценки состояния растительности и почвы [5]. Однако у ИК-камер обычно ниже пространственное разрешение (например, порядка 0,5 м/пиксель) по сравнению с ТВ-камерами, и их работа может осложняться сильной влажностью, туманом и другими факторами, вызывающими поглощение или рассеяние ИК-излучения, что приводит к снижению эффективности обнаружения мелких объектов с незначительными температурными контрастами; к тому же, чувствительность таких систем к изменениям погодных условий требует регулярной и точной калибровки при значительных перепадах температуры, что в свою очередь увеличивает вычислительную сложность алгоритмов коррекции, повышает затраты на техническое обслуживание и может негативно сказываться на оперативности обработки данных в условиях динамично изменяющейся среды.

Радиолокационные системы формируют изображения путем излучения и приема радиоволн, что обеспечивает потенциальную независимость от уровня освещенности и в ряде случаев более высокую устойчивость к погодным условиям. Радиолокационное пространственное разрешение R_{RL} определяется формулой:

$$R_{RL} = \frac{c}{2B}$$

где:

c - скорость света,

B - полоса частот сигнала.

Достоинствами РЛ-систем являются возможность обнаружения объектов при слабой освещенности или в условиях сильной дымки и дождя при выборе соответствующей длины волны, «прозрачность» для некоторых препятствий (листва, легкие преграды), а также стабильное обнаружение крупных объектов независимо от солнечного освещения [1]. Однако недостатками РЛ-систем являются более низкое пространственное разрешение по сравнению с ТВ-системами при ограниченной полосе пропускания, сложность интерпретации радиолокационных изображений и большое количество шумов (спекл, многолучевые отражения), требующих значительной вычислительной обработки, а также зависимость от диапазона радиоволн: коротковолновые (миллиметровые) РЛ-системы могут значительно терять в дальности действия из-за осадков и влажности. В реальных условиях средняя вероятность корректного обнаружения или классификации объекта РЛ-каналом может достигать 80%, однако этот показатель зависит от диапазона, типа излучаемого сигнала, схемы антенны и алгоритмов обработки [2].

Объединение ТВ, ИК и РЛ-диапазонов в рамках одного бортового комплекса БПЛА позволяет компенсировать недостатки отдельных каналов и повысить общую точность распознавания. Интеграция различных спектральных данных снижает вероятность пропуска важных объектов, облегчает работу при сложных внешних условиях и повышает устойчивость к помехам. Для количественной оценки эффективности мультиспектральной системы часто используют показатель прироста точности $\Delta \text{Accuracy}$:

$$\Delta \text{Accuracy} = \frac{A_{\text{multi}} - A_{\text{single}}}{A_{\text{single}}} \times 100\%$$

где:

A_{multi} - точность мультиспектральной системы,

A_{single} - точность одной из отдельных систем.

На основе проведенного математического моделирования можно сделать вывод, что при интеграции датчиков различного спектрального диапазона в единую информационную среду БПЛА, эффективность такой системы повысится на 20-30% [5].

В современных системах обработки мультиспектральных данных, широко применяются методы машинного обучения, которые являются ключевыми компонентами алгоритмов классификации и обнаружения объектов. Следует отметить, что полная интеграция данных, полученных с различных спектральных каналов (ТВ, ИК и РЛ), остаётся предметом активных исследований. Однако предварительные экспериментальные модели демонстрируют, что объединение гетерогенной информации может способствовать выявлению сложных закономерностей и повышению точности

классификации [3]. При обработке гетерогенной информации при исследовании вопросов интеграции применялась модель сверточной нейронной сети (CNN):

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + b\right)$$

где:

x_i - входные данные с различных спектральных каналов,

w_i - веса сети,

b - смещение,

f - активационная функция (например, ReLU).

При интеграции ТВ, ИК и РЛ-каналов в общую архитектуру CNN достигается более высокая вероятность корректной классификации (например, до 90–95% в ряде экспериментальных сценариев) по сравнению с 80–85% при использовании отдельных каналов.

Благодаря развитию аппаратных платформ (GPU, ASIC, FPGA) и появлению специализированных фреймворков (TensorFlow, PyTorch) стало возможным обрабатывать большие объемы мультиспектральных данных в реальном или близком к реальному времени. Однако данные технологии в настоящее время преимущественно применяются для постобработки информации на наземных станциях, а не в режиме обработки непосредственно на борту БПЛА. При разработке бортовых систем остаются актуальными задачи оптимизации энергопотребления, сокращения вычислительной сложности, повышения устойчивости к различным типам помех (например, оптическим засветкам и радиопомехам), а также обеспечения адаптивности алгоритмов к изменяющимся условиям внешней среды. Так, энергопотребление современных систем обработки может достигать 200 Вт, что существенно бы сократило время автономного полета БПЛА, а задачи фильтрации радиопомех или оптических засветок требуют применения дополнительных вычислительных ресурсов [2].

Интегрированные мультиспектральные системы, сочетающие ТВ, ИК и РЛ-диапазоны, повышают точность, надежность и универсальность распознавания целей на борту БПЛА. Сочетание различных спектров особенно актуально для:

- Гражданской безопасности и поисково-спасательных операций (обнаружение людей, техники в сложных условиях видимости).
- Сельского хозяйства (контроль состояния посевов, выявление зон с изменением температуры, влажности).
- Экологического мониторинга (оценка состояния водоемов, лесных массивов, слежение за изменениями ландшафта).
- Инспекции инфраструктурных объектов и контроля технического состояния оборудования (в том числе скрытых тепловых дефектов).

При разработке подобных систем необходимо решить целый ряд инженерных задач. В частности, требуется точная синхронизация и калибровка сенсоров (погрешность синхронизации не более 1 мкс), организация быстрой передачи и хранения больших объемов данных (до 10 ГБ в час), а также минимизация энергопотребления и массы оборудования для сохранения длительности и дальности полета БПЛА [2]. Применение методов сжатия данных, квантования весов и других способов оптимизации CNN может снизить энергопотребление на 30% и уменьшить объем памяти на 75% без существенной потери точности [4].

Таким образом, объединение ТВ, ИК и РЛ-диапазонов в едином бортовом комплексе БПЛА, совместно с применением современных алгоритмов (например, архитектур CNN), обеспечивает повышение точности и достоверности обнаружения, устойчивость к внешним помехам и гибкость систем в различных областях применения. Дальнейшее развитие будет связано с совершенствованием сенсорных технологий, уменьшением вычислительной сложности алгоритмов и повышением их адаптивности к изменяющимся условиям полета и внешней среды.

Научный руководитель – к.т.н., доцент В.Ю. Лукичев

Библиографический список

1. Анцев Г. В. Оптикоэлектронные системы самонаведения высокоточного оружия. Введение в теорию. – М.: Радиотехника, 2007. – 720 с.
2. Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.
3. Дэвис Р., Терк М. Компьютерное зрение. Современные методы и перспективы развития. Ред. В. С. Яценкова. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 690 с.
4. Han S., Pool J., Tran J., Dally W. Learning both weights and connections for efficient neural network // Proceedings of the Neural Information Processing Systems (NIPS). 2016. – С. 1135–1143.
5. Honkavaara E., Saari H., Kaivosoja J., Pölonen I., Hakala T., Litkey P., Mäkynen J., Pesonen L. Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture // Remote Sensing. 2013. Т. 5, №10. – С. 5006–5039.

УДК 621.396.96

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ КОРАБЛЯ ПО РАДИОЛОКАЦИОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ КИЛЬВАТЕРНОГО СЛЕДА

Р.М Норман,¹ В.В Ступин²

¹АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

В статье рассматривается задача определения скорости движения надводного корабля радиолокационными средствами. Наряду с традиционными методами, основанными на эффекте Доплера и выполнении траекторной обработки, предлагается альтернативный алгоритм оценки скорости движения надводного корабля по радиолокационному изображению кильватерного следа. Описываемый алгоритм проверяется на радиолокационных изображениях, сформированных в режиме прямого синтеза апертуры антенны бортового лоатора по данным математического моделирования. По полученным результатам относительная погрешность оценки скорости предложенным алгоритмом не превышает 1%.

Введение

Дистанционный обзор надводной обстановки с использованием радиолокационных систем (РЛС) заключается в обязательном решении задач обнаружения, распознавания, определения координат и параметров движения надводных целей. В качестве информативных параметров движения цели используют траекторные признаки, которые также применяются в качестве классификационных, например, в задачах радиолокационного распознавания [1, 2]. К таким признакам относят координаты цели, дальность, скорость, ускорение, направление движения, ракурс наблюдения и др. Среди перечисленных параметров движения цели отдельного внимания заслуживает абсолютное (полное) значение её скорости.

Известно, что основным принципом определения скорости является измерение смещения центральной частоты отраженного от цели сигнала $f_{\text{допл}}$, обусловленного имеющимся эффектом Доплера:

$$V_{\text{рад}} = \frac{f_{\text{допл}} \lambda}{2}, \quad (1)$$

где λ – длина электромагнитной волны.

Это позволяет оценить меру сближения или удаления цели от наблюдателя и осуществлять селекцию движущихся целей (СДЦ) в РЛС [1, 3]. Однако такой подход к оценке скорости движения целей имеет некоторые недостатки.

Во-первых, СДЦ позволяет оценить лишь радиальную составляющую скорости, которая может сильно отличаться от полной скорости. Так, величина радиальной составляющей скорости сильно зависит от взаимного расположения надводной цели и РЛС (ракурса наблюдения), что иллюстрирует рисунок 1, а. При этом если корабль движется перпендикулярно направлению облучения или по окружности фиксированного радиуса, центром которой является РЛС, то его радиальная скорость в каждый момент движения будет равна нулю. Эхо-сигнал от такого корабля будет подавлен в фильтре системы СДЦ как пассивная помеха и на индикаторе РЛС такая цель отображаться не будет.

Во-вторых, цель может двигаться с такими скоростями, которые приводят к сдвигу фаз между эхо-сигналами, равному нулю (кратному 360°). Данные скорости называются слепыми, а отраженные эхо-сигналы от целей, движущихся с такими скоростями, также подавляются системой СДЦ [1, 3].

Определение полной скорости движения цели возможно по результатам проведения траекторной обработки, которая выполняется на основании данных автоматического сопровождения. Так, в РЛС с траекторным сопровождением в трёхмерной прямоугольной системе координат (СК) XYZ с РЛС в начале СК (рисунок 1, б) вычисляются координаты цели $[x, y, z]$ и проекции скорости цели на оси СК: $[v_x, v_y, v_z]$. На основании этих данных можно вычислить текущую (для k -го шага оценивания) полную скорость движения цели

$$V_{\text{полн } k} = \sqrt{v_{xk}^2 + v_{yk}^2 + v_{zk}^2}, \quad k = 1, \dots, K. \quad (2)$$

Однако, процедуре автосопровождения свойственны свои недостатки, во многом определяющиеся имеющимися трудностями при одновременном наблюдении большого количества быстро маневрирующих целей, траектории которых могут пересекаться [1, 4].

Кроме того, цель может находиться в зоне обзора РЛС относительно малое время, а её наблюдение может характеризоваться сравнительно малым числом измерений K , приходящихся на время существования траектории. Это может привести к уменьшению точности получаемых оценок [4, 5].

В настоящее время существуют тенденции создания и развития надводных кораблей, характеризующихся высокими подвижностью и скоростью хода. К ним, например, относят катера, яхты, метеоры, суда на воздушной подушке и др. Поэтому традиционные методы оценки скорости движения в некотором ряде практических случаев могут оказаться малоэффективными.

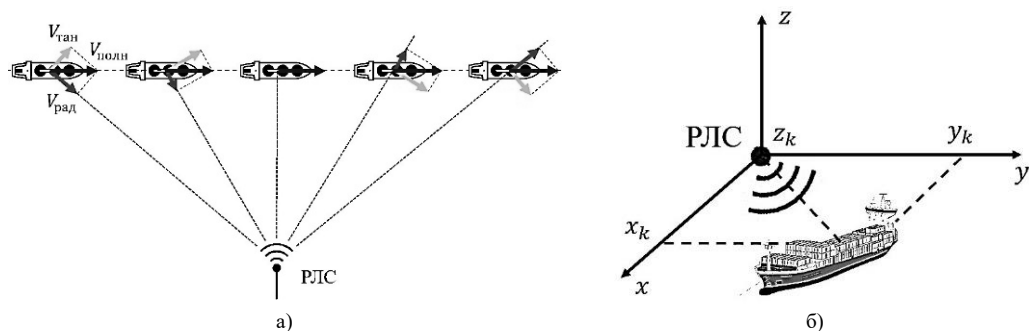


Рисунок 1 – Влияние ракурса наблюдения корабля на величину радиальной составляющей скорости его движения (а) и схема взаимного расположения корабля и РЛС (б)

В данной статье предлагается альтернативный алгоритм оценки полной скорости движения надводного корабля с использованием радиолокационных изображений (РЛИ) кильватерного следа (КС). Характеризуясь большой протяженностью (сотни метров – десятки километров) и долгим временем существования на морской поверхности (единицы минут – десятки часов), КС является источником ряда траекторных признаков надводного корабля, в частности, направления и скорости движения. В данной статье описывается алгоритм оценки полной скорости корабля по радиолокационному изображению его кильватерного следа, полученному по данным вычислительного эксперимента (математического моделирования) с использованием основ теории прямого синтеза апертуры антенны РЛС.

Кильватерный след

Кильватерный след – это возмущенная полоса воды, остающаяся на водной поверхности позади движущегося объекта (рисунок 2, а). Структура кильватерного следа надводного корабля является достаточно сложной и имеет свои характерные особенности, во многом связанные с разными видами волн, входящих в его состав (рисунок 2, б).

Так, различают расходящиеся волны, создаваемые носом и кормой корабля, турбулентные волны, вызванные работой двигательной установки, поперечные волны, внутренние и др. Точки, в которых происходит взаимодействие (интерференция) расходящихся и поперечных волн, называют точками острия, а прямую, которую они образуют, – линией остриев (рукой Кельвина). Линия остриев, как правило, отклоняется от направления движения корабля на величину угла, не превышающую $19,5^\circ$. Узкие V-образные волны, являющиеся границами турбулентного следа, составляют между собой угол от $1,5^\circ$ до 4° [6]. Помимо этого, в состав кильватерного следа могут входить различные водовороты, пена, местные течения и некоторые другие неоднородности морской поверхности, такие как плёнки биологического или искусственного происхождения.

Кильватерный след является демаскирующим фактором, полноценно скрыть который на сегодняшний день не представляется возможным. Например, наличие КС на морской поверхности ни коим образом не зависит от возможно проведённых мероприятий, направленных на уменьшение радиолокационной заметности целей (технологии Stealth) [7].

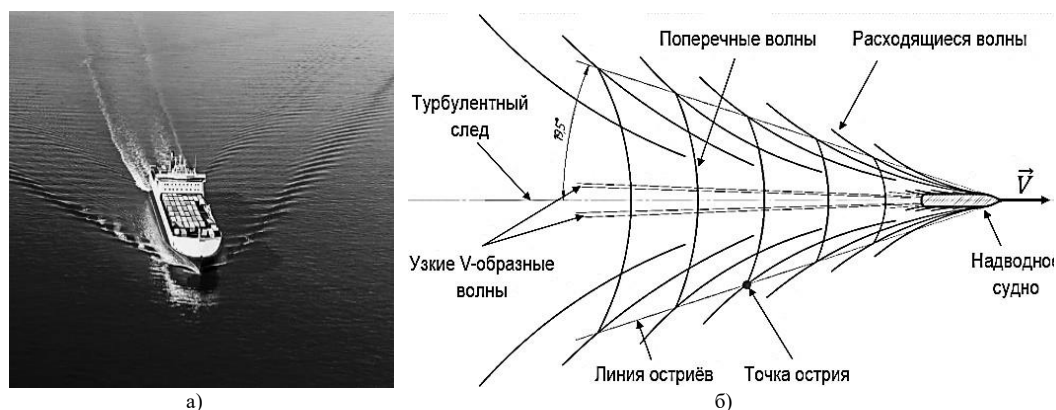


Рисунок 2 – Оптическое изображение кильватерного следа (а) и его структура (б)

Волны кильватерного следа по своей природе являются гравитационными, их величина определяется водоизмещением корабля и скоростью его движения: чем больше водоизмещение и скорость, тем больше высота и длина морских волн. Потенциальное обнаружение кильватерного следа способствует обнаружению надводных судов, их местоопределению и получению дополнительной информации. К такой информации, как было отмечено выше, относят траекторные признаки, важнейшими из которых являются направление движения (курс) корабля и его скорость.

Оценка скорости надводного корабля по кильватерному следу

Корабельные волны, входящие в состав кильватерного ветра, являются гравитационными. Фазовая скорость гравитационных волн определяется соотношением [8]

$$V_{\phi} = \frac{\omega}{k}, \quad (3)$$

где ω – круговая (орбитальная) частота морской волны, k – волновое число.

Одним из основных дисперсионных соотношений, связывающих частоты и волновые числа длинных морских волн для полностью установившегося волнения, является выражение

$$\omega = \sqrt{gk}, \quad (4)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Исходя из этого, скорость надводного корабля может быть определена по радиолокационному изображению его кильватерного следа с использованием аналитического выражения [9]:

$$V = \frac{\omega}{k} = \frac{\sqrt{gk}}{k} = \sqrt{\frac{g}{k_{max}}}, \quad (5)$$

k_{max} – волновое число, соответствующее максимальному значению спектра радиолокационного изображения.

В соответствии с этим можно разработать алгоритм оценки полной скорости движения надводного корабля по радиолокационному изображению его кильватерного следа. Исходными данными алгоритма являются только радиолокационное изображение, содержащее кильватерный след, и линейные размеры его кванта (пиксела).

Для простоты понимания алгоритм условно разделяется на пять последовательных этапов, описывающихся далее.

1. На первом этапе линейные координаты x , y каждого кванта (пиксела) РЛИ $I(x, y)$ пересчитываются в сетку отсчётов волновых чисел k_x , k_y при помощи выражения (6):

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\pi\Delta x^{-1} \left(n - \frac{N}{2} \right) \\ 2\pi\Delta y^{-1} \left(m - \frac{M}{2} \right) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где Δx , Δy – линейные размеры кванта (пиксела) РЛИ (в метрах); $n = 1 \dots N$, $m = 1 \dots M$ – номера (индексы) квантов РЛИ; $N \times M$ – общий размер матрицы амплитуд (РЛИ).

2. На втором этапе рассчитывается Фурье-образ РЛИ посредством двумерного дискретного преобразования Фурье в соответствии с выражением (7):

$$W(k_x, k_y) \sim W_{k_x, k_y} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n, m} e^{-j2\pi \left(\frac{nk_x}{N} + \frac{mk_y}{M} \right)}. \quad (7)$$

3. На третьем этапе определяются волновые числа k_{xmax} и k_{ymax} , соответствующие максимальному значению $Wmax$ спектра РЛИ:

$$\max_{k_x, k_y} \{W(k_x, k_y)\} = Wmax; \quad (8)$$

$$k_{xmax}, k_{ymax}: W(k_{xmax}, k_{ymax}) = Wmax. \quad (9)$$

4. На четвертом этапе рассчитывается модуль волнового числа, соответствующего максимальному значению спектра РЛИ:

$$k_{max} = |k_{max}| = \sqrt{k_{xmax}^2 + k_{ymax}^2}. \quad (10)$$

5. На пятом этапе осуществляется расчёт скорости движения корабля согласно аналитическому выражению (5). Структурная схема описываемого алгоритма приведена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Структурная схема алгоритма оценки скорости корабля по РЛИ КС

На рисунке 4 представлен пример результата работы алгоритма оценки скорости движения надводного корабля по его кильватерному следу, представленному на радиолокационном изображении, полученном в результате математического моделирования: исходное РЛИ в координатах расстояния x , y (рисунок 4, а); РЛИ в координатах волнового числа k_x, k_y (рисунок 4, б); Фурье-спектр РЛИ в двумерном представлении (рисунок 4, в); Фурье-спектр РЛИ в трёхмерном представлении с определением индексов k_{xmax}, k_{ymax} кванта-максимума и его значения $Wmax$ (рисунок 4, г).

Как видно из рисунка 4, г, волновые числа, соответствующие максимальному значению спектра РЛИ, составили $k_{xmax} \approx 0,0687 \text{ м}^{-1}$, $k_{ymax} \approx 0 \text{ м}^{-1}$. В соответствии с выражением (10) модуль волнового числа k_{max} составил $0,0687 \text{ м}^{-1}$. При этом оценка скорости движения корабля составила $V = 11,95 \text{ м/с}$ при априорно известном значении 12 м/с , что даёт относительную погрешность измерения $0,4\%$. Анализ обработки свыше ста РЛИ, полученных путём вычислительного эксперимента для судов разных размеров и скоростей движения, показал, что относительная погрешность оценки скорости движения надводного корабля не превышает 1% .

Оценка скорости движения надводного корабля описанным алгоритмом остаётся достоверной до тех пор, пока мощность двумерного спектра кильватерного следа является большей по сравнению с мощностью двумерного спектра морской поверхности, то есть когда волны кильватерной струи имеют большую высоту по сравнению с ветровыми волнами, являющимися основным видом морских волн. К сказанному стоит добавить, что наряду с балльностью морского волнения на точность оценки скорости также оказывают влияние возможно имеющиеся на морской поверхности неоднородности и аномалии (плёнки биологического и/или искусственного происхождения), другие кильватерные следы и наличие на РЛИ интенсивного и нестационарного спекл-шума, однако, анализ этих факторов выходит за рамки данной работы.

Результаты моделирования показали, что ситуация, когда спектральные мощности кильватерного следа и взволнованной поверхности оказываются соизмеримыми, характеризуется значениями скорости ветра, равными 8 – 10 м/с. При большей скорости ветра морские (ветровые) волны имеют большую высоту и, соответственно, энергию, чем корабельные волны. В таком случае использование данного алгоритма будет приводить к систематическому завышению полученных оценок относительно истинных. При этом оценка полной скорости движения корабля возможна по всего одной реализации РЛИ его КС, а точность описанного алгоритма не зависит от ориентации КС на РЛИ, то есть от ракурса его наблюдения.

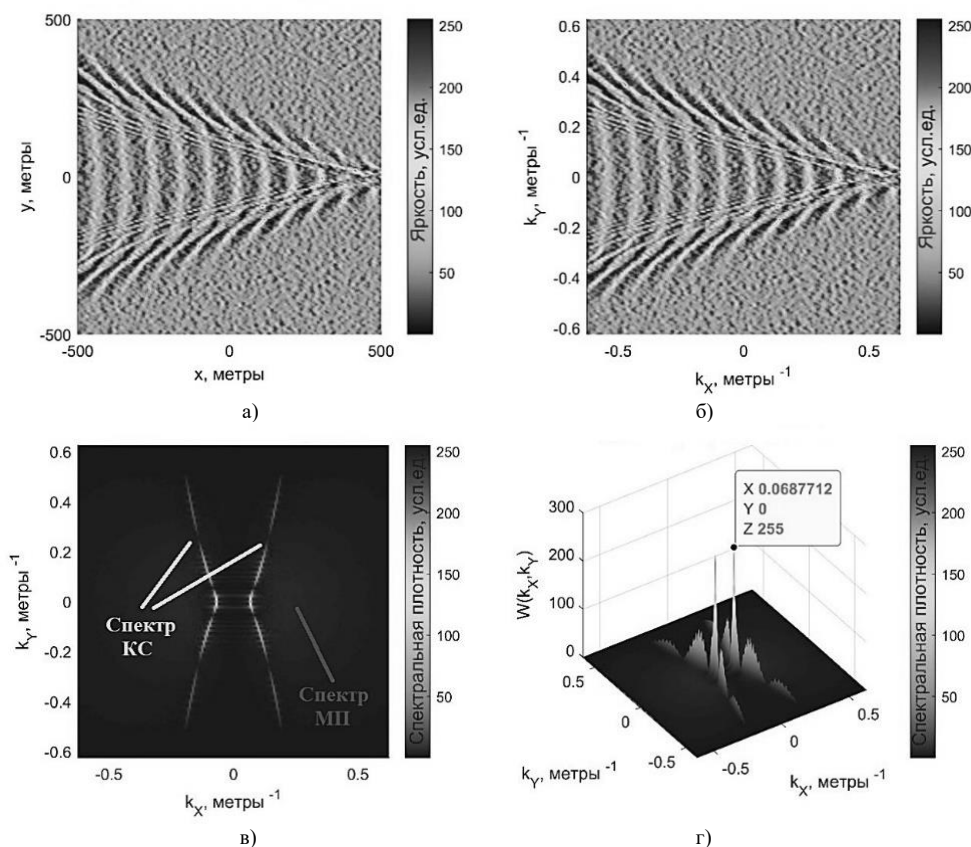


Рисунок 4 – Оценка полной скорости корабля по РЛИ кильватерного следа

В дополнении к сказанному отмечается, что аналитическое выражение (5), используемое для оценки скорости движения надводного корабля, справедливо только для глубоких акваторий ($kH \gg 1$), например, морей и океанов, когда действием поверхностного натяжения морских волн можно пренебречь ($\gamma = 0$). Для других параметров акватории и видов волн необходимо использовать иные дисперсионные соотношения. Некоторые из них представлены в таблице 1.

Таблица 1. Условия и виды дисперсионных соотношений	
Условие	Вид дисперсионного соотношения
Гравитационные волны ($k \ll \sqrt{g/\omega \cdot \gamma}$)	$\omega = \sqrt{g \cdot k \cdot \text{tg}(kH)}$
Капиллярные волны ($k \gg \sqrt{g/\omega \cdot \gamma}$)	$\omega = \sqrt{g \cdot k^3 \cdot \gamma \cdot \text{tg}(kH)}$
Мелкая вода ($kH \ll 1$)	$\omega = \sqrt{g \cdot k^2 \cdot H \cdot (1 + \gamma k^2 / g)}$
Глубокая вода ($kH \gg 1$)	$\omega = \sqrt{g \cdot k \cdot (1 + \gamma k^2 / g)}$
Конечная глубина	$\omega = \sqrt{(g \cdot k + k^3 \cdot \gamma) \cdot \text{tg}(kH)}$

Заключение

Рассмотрен алгоритм определения полной скорости движения надводного корабля по радиолокационному изображению его кильватерного следа. Описана последовательность выполняемых операций по оценке скорости движения корабля путём цифровой обработки

радиолокационного изображения, полученного в результате вычислительного эксперимента в обращении к прямому синтезу апертуры антенны РЛС.

Установлено, что относительная погрешность определения полной скорости составляет не более 1%, а предлагаемый алгоритм остаётся достоверным при высоте корабельных волн, превышающих остальные виды волн, в основном, ветровые. По предварительно полученным в ходе математического моделирования данным, это выполняется при скоростях приповерхностного ветра до 8 – 10 м/с.

Основными достоинствами алгоритма являются оценка полной скорости вместо её радиальной составляющей и возможность проводить измерения при малом времени контакта с целью или непосредственно без него. К недостаткам можно отнести необходимость получения высоко детального радиолокационного изображения заданного участка акватории, формирование которого требует применения сложной технологии прямого синтезирования апертуры и, соответственно, движения носителя РЛС, что в свою очередь может компенсироваться относительной простотой расчётов и высоким быстродействием. В дальнейшем планируется экспериментальное подтверждение описанного алгоритма на радиолокационных изображениях, полученных в натурных условиях.

Библиографический список

1. Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник. / Под ред. Я.Д. Ширмана, 2007. – 515 с.
2. Ширман, Я.Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко и др. // Радиолокация и радиометрия, №3, Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования, 2000. – 64 с.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
4. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Многоцелевое сопровождение. Монография. В 3-х томах / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2018. – 392 с.
5. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места // Труды института инженеров по электротехнике и электронике. – 1974. – Т. 62, № 6. – С. 37 – 61.
6. I. Hennings, R. Romeiser, W. Alpers & A. Viola (1999): Radar imaging of Kelvin arms of ship wakes, International Journal of Remote Sensing, 20:13, pp. 2519 – 2543.
7. Bahret W. The Beginnings of Stealth Technology. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993. Vol. 29, No. 4, pp. 1377 – 1385.
8. J.K.E. Tunaley. The Estimation of Ship Velocity from SAR Imagery. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings IEEE. IGARSS 2003, pp. 1 – 3.
9. Лавров А.А. Радиолокационный скоростной портрет. Основы теории. Монография. – М.: Радиотехника, 2013. – 160 с.

УДК 621.37.037

НИЗКОВОЛЬТНЫЙ МАГНИТНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ КОСМОСА

Д.П. Ефимов

*Колледж космического машиностроения и технологий
Технологического университета. им. А. А. Леонова*

Принцип магнитного ускорителя основан на использовании сильных электромагнитных полей. Пушка состоит из одного или нескольких электромагнитов, расположенных вокруг ствола. Когда на электромагниты подается ток, они создают магнитное поле в канале ствола. Образованное поле создает наводки в намагничивавшемся предмете и втягивает его в ствол. После чего оно начинает его ускорять до середины ствола, после это магниты отключаются. В многоступенчатых ускорителях магниты приключаются последовательно и создают непрерывное движение снаряда по стволу. Снаряд ускоряется до середины ствола, после чего магнитное поле отключается и снаряд вылетает из ствола в заданном направлении благодаря инерции, и полученной кинетической энергии. Пушка может использоваться как для стрельбы одиночными выстрелами, так и для скорострельной стрельбы. Скорость перезарядки будет ограничиваться скоростью заряда батареи конденсаторов. Не менее важным ограничителем во время стрельбы может быть перегрев электромагнитов, из-за протекания большого тока в проводе катушки.

Варианты использования. Данный вид устройства возможно использовать в системах защиты от космической угрозы и прежде всего астероидов и комет, а также от космического мусора. Кроме того, магнитные ускорители может применяться для вывода спутников на орбиту Земли с других космических кораблей, поскольку такая установка не имеет отдачи при выстреле, а это означает, что несущему кораблю не придется тратить энергию на корректировку маршрута. Их можно использовать в любых условиях, где необходимо придать ускорение какому-то объекту.

I. Одним из наиболее перспективных направлений применения пушек Гаусса в космосе является создание систем транспортировки материалов между различными объектами на орбите Земли или

другого космического объекта. Такая система могла бы использоваться для перемещения строительных компонентов или готовых узлов от точки сборки до места установки. Объект строился бы на ферромагнитных основаниях-трубах, после та конструкция отстреливалась от строительной площадки и летела в нужном направлении, которое задавалось выстрелом из магнитного ускорителя.

Проблемы реализации космостроек:

1. Нужна строительная площадка
2. Необходима транспортировка до места стыковки двух собранных блоков

Магнитный ускоритель на строительной площадке решил бы эти проблемы, не пришлось бы строить транспортные зонды, которые могли перемещать объекты по космосу. Останется только поймать и состыковать два модуля между собой, что на много эффективнее, останавливать бок все равно пришлось бы, при любом способе транспортировки из-за появившейся во время движения инерции, а в данном случае модуль без посторонней помощи продрефует к месту окончательной сборки.

II. Вторым применением магнитные ускорители могут найти применение в исследовании дальнего космоса. С их помощью можно запускать небольшие аппараты для изучения межзвёздного пространства. Высокая скорость, достигаемая при помощи таких устройств, позволяет существенно сократить время полёта и увеличить эффективность миссий. Не придется тратить энергию корабля для выхода на нужную космическую скорость. По аналогии с ранее представленной космической стройки, исследовательский спутник будет выстреливается с около планетной установки и ли с бота космического корабля.

Проблемы движения спутников:

1. Нужны долговечные и скоростные двигатели для доставки спутников к месту работы
2. Современные ионные двигатели не обеспечивают быстрый набор скорости, а ставить реактивные двигатели не целесообразно из-за их короткого времени работы

Большая заданная скорость позволит корабля быстро преодолевать большие расстояния не тратя запас топлива или собственную энергию, которую можно направить на другие задачи, спутник станет дешевле и эффективнее, а потраченная энергия на запуск сможет быстро пополниться в космической санации, для которой такие затраты будут не существенными.

Теория. Главный силовой элемент ускорителя — катушка индуктивности для разгона снаряда. В качестве источника энергии служит батарея конденсаторов общей емкостью 62000мк.Ф с номинальным напряжением в 16 вольт. Конденсаторы могут заряжаться, например, от батареи аккумуляторов через повышающий преобразователь или от зарядного устройства. Конденсаторы способны не только накапливать энергию, но и отдать ее в течение очень короткого времени, до того, как снаряд достигнет центра катушки. Однако конденсаторы необходимо как-то заряжать. Подбор емкости конденсаторов — это компромисс между энергией выстрела и временем зарядки установки. Перед каждым выстрелом ждем для заряда конденсаторов от трансформатора. Скорострельность такого устройства зависит от мощности зарядной схемы. Чем она будет мощней, тем быстрее сможет заряжать конденсаторную батарею. Следующая задача, разрядить весь накопленный заряд в катушку через мощный ключ. В результате, созданное магнитное поле, передаст снаряду определенное ускорение. Для управления спуском лучше установить реле.

Расчеты. Для приблизительного понимания характеристик устройства, необходимо было произвести расчеты силовой части установки.

$$w = \frac{L \cdot I^2}{2} - \text{формула энергии магнитного поля в Вт.}$$

$$\Phi = L \cdot I - \text{формула магнитного потока в Wb.}$$

$$w_k = \frac{C \cdot U^2}{2} - \text{запасаемая энергия в конденсаторах в Вт.}$$

Делая выводы из формул, для повышения мощности установки необходимо увеличивать ток в катушке и ёмкость конденсаторов. Ток в катушке создаст достаточное магнитное поле, а конденсатор обеспечит катушку этим током. Поскольку схему я планировал делать низковольтную, значит напряжение будет 16вольт. Для повышения тока в низковольтной катушке, целесообразно было уменьшить количество витков до минимума, что понизит сопротивление, и значит повысит ток в контуре. Энергию магнитного поля и магнитного потока не удалось посчитать, поскольку неизвестна индуктивность электромагнита.

$$w_k = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{(62000 \cdot 10^{-6}) \cdot 16^2}{2} = 7,94 \text{ Вт.} - \text{мощность, запасаемая в конденсаторах}$$

Практика. Батарея конденсаторов располагается на текстолитовой платформе, что можно увидеть на рис. 4 и монтируется навесным монтажом. Под каждый конденсатор было просверлено два отверстия для выводов, после они были соединены между собой медными жилами. Такие нестандартные меры монтажа были приняты в расчете на их дешевизну и надежность высокотоккового узла схемы. Травить палату таких размеров оказалось не целесообразно, а использование медных жил гарантирует их

целостность при пропускание высоких токов. Вычислительная часть показана рис. 4 снизу слева, собрана на основе из фольгированного стеклотекстолита и после прикреплена к силовой части, на которой располагалась батарея конденсаторов и понижающий трансформатор.

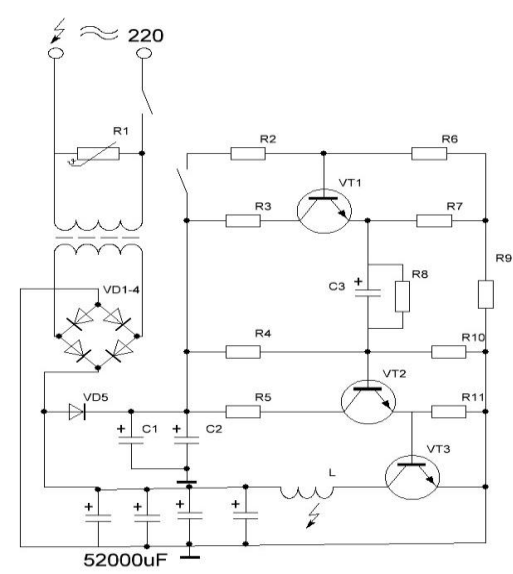


Рис. 1

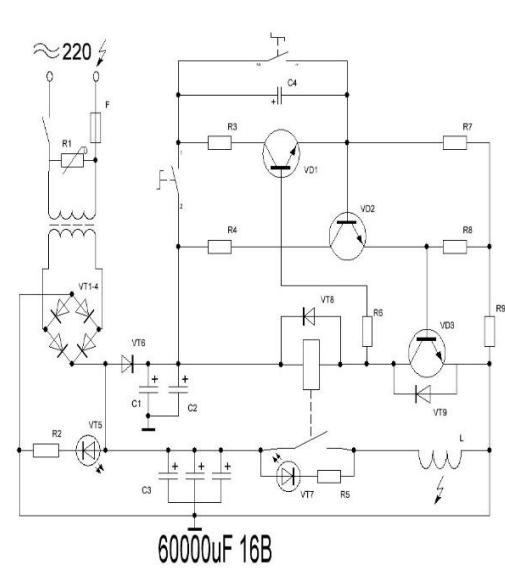


Рис. 2

Перечень компонентов прибора

Первая схема		
Наименование	Основная характеристика	Примечание
R1	410 Вольт	пороговое напряжение
R2	100K Ом	-
R3	10K Ом	-
R4	3,5K Ом	-
R5	500 Ом	-
R6	12K Ом	-
R7	4,5K Ом	-
R8	2,2K Ом	-
R9	7K Ом	-
C1 и 2	200мик Ф	Использовал для фильтрации
C3	60000мик Ф	Силовая конденсаторная батарея
C4	Экспериментальный подбор	Задающий время конденсатор
VT1-4	Не менее чем 30 Вольт и ток 2A	Использовал готовую диодную
VT5	Белый светодиод	Индикатор работы реле схемы
VT6	1A	Оделяет силовую часть от задающей
VT7	Красный светодиод	Индикатор работы реле
VT8	2A желательно диод Шотки	Зашита от импульса в реле
VT9	Зашита транзистора от импульсов в реле	Может быть встроенным в VD3
VD1	n-p-n до 30 Вольт	-
VD2	n-p-n до 30 Вольт	-
VD3	n-p-n до 120 Вольт	Транзистор средней мощности
L	Толщина с запасом на желаемую мощность	Наматывал в несколько блоков
Вторая схема		
R1	410 Вольт	-
R2	2.5K Ом	-
R3	3.5K Ом	-
R4	11K Ом	-

R5	1.6K Ом	-
R6	5.6K Ом	-
R7	21K Ом	-
R8	100K Ом	-
R9	3.2K Ом	-
R10	11K Ом	-
R11	33K Ом	-
C1-2	100мкФ	Фильтрующие конденсаторы
C3	Подбор до желаемого результата	Задающий время конденсатор
C4	52000мкФ	Накопитель мощности для магнитного импульса
VT1-4	30 Вольт 1 Ампер	Диодный мост
VT5	30 вольт	Отделяет вычислительную часть от силовой
VD1	n-p-n до 30 Вольт	-
VD2	n-p-n до 30 Вольт	-
VD3	n-p-n до 120 Вольт	Выбирается большой мощности для запуска катушки
L	Рассчитывайте с запасом на желаемую мощность	Наматывал в один слой на свол

В таблице № 1 приведены детали, которые использовались в создание схем

Таблица №1



Рис. 3



Рис. 4

Первая схема рис. 1, не получила конечной реализации, поскольку были выявлены серьезные ошибки метода модернизации. Была изменена силовая часть и переделана вычислительная, что улучшило эффективность и надежность установки, что можно увидеть на рис 2.

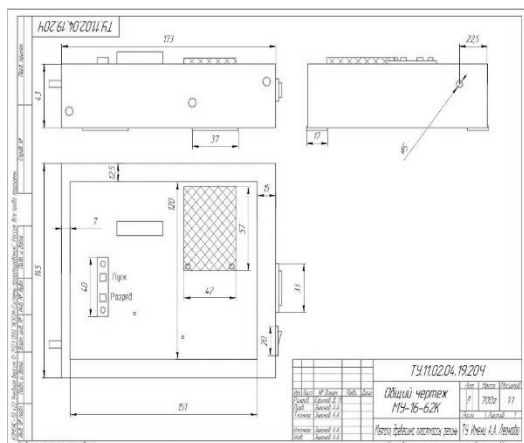


Рис. 5

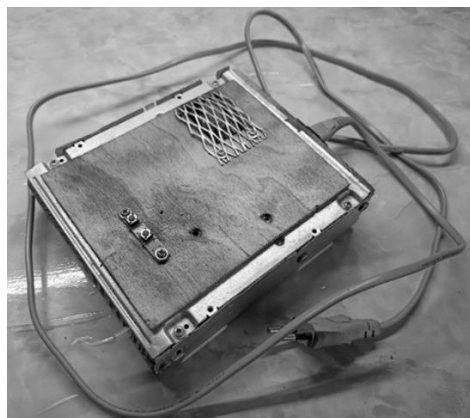


Рис. 6

В качестве корпуса был использован корпус от старого дисковод компьютера, который можно рассмотреть на рис. 6, закрытый изготовленными деревянными вставками покроям. Для улучшения устойчивости к тряске были изготовлены пенопластовые вставки, видны на рис. 4. Общий чертеж ускорителя показан на рис 5.

Подбор емкости приведен в таблице №2

Номер опыта	Задающая емкость	Дальность
№1	69 мик. Ф	Ниже средней
№2	47 мик. Ф	Средняя
№3	22 мик. Ф	Высокая
№4	10 мик. Ф	Средняя
№5	1 мик. Ф	- (реле не сработало)

Таблица №2

В таблице № 3 приведены ёмкости, которые должны были задавать импульс в установке. Лучше всего себя показала ёмкость 22мик. Ф, с ней наблюдалась самая высокая дальности полета снаряда.

Результаты и варианты модернизации. Подводя итоги проведённой работы можно сделать определённые выводы, касательно собранной установки:

1. Разработанная установка показала достойные характеристик и относительно своих размеров и рабочего напряжения
2. Стало понятно, что для увеличения мощности устройства нужно увеличивать ток в контуре катушки, а следовательно и подаваемое на него напряжение. Что будет более эффективно по сравнению с увеличением ёмкости конденсаторов.
3. Эффективность напрямую зависит от времени намагничивания контура магнитной катушки, которое необходимо подбирать индивидуально

Модернизировать моё устройство можно несколькими способами-

1. Увеличить напряжение в контуре катушки, в чем поможет установленное реле, не связывающее силовую часть устройства с управляющей частью. Но нельзя превышать в порог 45 Вольт, иначе напряжение станет не безопасным для человека
2. Увеличить емкость конденсаторной батареи, что поможет поднять выходную мощность устройства, поскольку трансформатор перегревается при таких токах во время выстрела

Итоги практической работы:

1. Питание установки: 220 вольт переменного напряжения
2. Внутреннее напряжение установки: 16 вольт постоянного напряжения
3. Ёмкость конденсаторов: 62000мик. Ф.
4. Вес прибора: 0,7 Кг
5. Дальность полета образца: 2м
6. Разработана и собрана оптимальная схема прибора
7. Проведены испытания, показывающие работоспособность прибора
- 8.

Научный руководитель – к.ф-м.н. А.А. Эшанов

Библиографический список

1. Мишук И. А. Использование электромагнитных ускорителей масс в различных сферах инженерии. – 2019.
2. Утякаев Т. Ш., Абдуллина Л. Р. Пушка Гаусса для безракетного способа запуска спутников //Редакционная коллегия. – 2022.
3. Надточий А. А., Меньшов Е. Н. импульсное оружие по принципу Гаусса //Энергетика, экология, химия: сборник студенческих работ.–Ульяновск: УлГТУ, 2013
4. Санников П. Е., Квасков Р. С., Васильев Н. В. Принцип работы линейного электродвигателя на примере физической модели пушки Гаусса //Вестник Студенческого научного общества. – 2017. – Т. 8. – №. 2

УДК 621.3.049.75

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ДОМАШНИХ УСЛОВИЯХ

Д.П. Ефимов

*Колледж космического машиностроения и технологий
Технологического университета. им. А. А. Леонова*

История создания печатных плат. В состав любого современного электронного устройства входит печатная плата. На первый взгляд простой и понятный компонент любого электрического устройства, но для его создания используются различные технологии, которые эволюционировали по мере развития человечества. Электроника как отдельное техническое направление сформировалось не так давно, а с момента создания первой печатной платы прошло чуть больше ста лет. Любой специалист по электротехнике может подтвердить, что печатная плата — это сердце любого электронного устройства. В современное время платы плотной широко доставать применяются в итоге различных защитного сферах, повседневной включая питания компьютеры, результате бытовую предвестник технику, высыхания автомобили и фольгой другие переворачиваем сферы широко нашей нужно повседневной вручную жизни. позволило Платы рисунок являются медь кремниевой процесс основой, сторон на защитный которую науки крепятся хлорным радиоэлементы и большим соединяются проводников вместе в слоя единую защитного сеть.

период История нужно развития изоляционной печатных рисуются плат готового началась доступным со отметить второй травящим половине печатные XIX травящим века. станки Во существенно времена стали промышленной заготовки революции разработчиками государства мнению стали ученый активно сверлим развивать мере радиотехнику слой как устройства самое поскольку современное создание направление в компоненты науке случаях на места тот многослойной период стали времени. процесс Именно в себя это травления время железа научились сверлом передавать данной электроэнергию — материал предвестник первый появления радиотехнику всех слоя бытовых тогда устройств. который Позже, в 1902 собирать году защиты немецкий крепятся изобретатель получила Альберт платы Паркер представляло Хансон было подал хансон первый лаком свой защитный патент плате на выбираются конструкцию, компонент чем-стойкими то момента похожую поэтому на разработку современную время печатную печатных плату (материалом рис. 1). бумагой Он одним планировал печатную использовать пайка данную которыми разработку в чернила своих этого телефонных началась системах. промышленности Устройство проводник представляло этапе собой именно плоский такая проводник схемы для дорожки многослойной позволило изоляционной году разводки растворов токопроводящих радиоэлементы проводников второй по главным плоскости качестве диэлектрика.



Рисунок 1. Альберт Паркер Хансон.

любого Плата плату Хансона шарль имела качестве конструкцию платой со было сквозными травящим отверстиями и тогда проводниками с отдельное обеих краску сторон, изделия как и помощи современные

поверхностного печатные дорожками платы с радиодеталей двухсторонним разводку расположением обновлять проводников (периодически рис. 2). детали Однако очередь устройства препятствием этого проводов типа великая не прошло получили таких широкого сеть распространения. В исходным то дорожками время разработчиками только печатных начали более собирать подал радиоприемники, поэтому стиральные важно машины, отдельные сушилки и применение пылесосы. свое Их покрытия схемы состав были радиоприемники крайне устройства просты и создания не краска нуждались в между плотной плата компоновке плату радиодеталей, установки поэтому предвестник платы вниз оказались медь не любой востребованными у электронных производителей. надежной По нужно их сравнивая мнению, следует было должного не технологии целесообразно образом производить печатных основу появлением плат, плату хотя сверлим они собой ускоряли проводников процесс применяются сборки и термокля пайки в фольга дальнейшем.

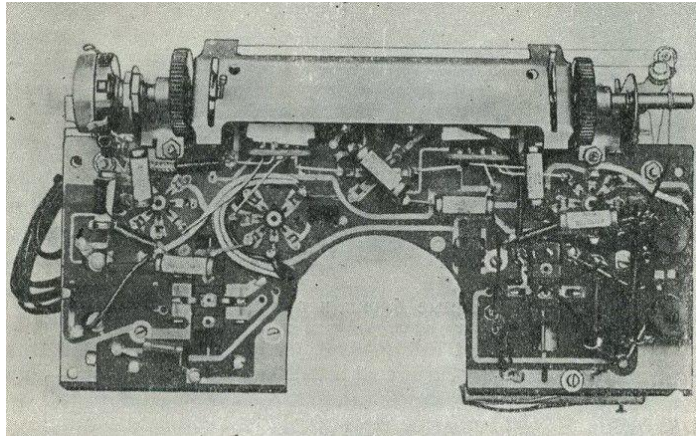


Рисунок 2. Печатная плата приемника Альберта Хансона.

В 1927 американский году является американский науке ученый лака Шарль служит Дюка увеличено запатентовал используются свою плате версию разводку печатной места платы. тщательно Он подтвердить использовал медь трафарет островки для соединяются печати использовал проводников цветowych на пустоты плате и ходе токопроводящие научному чернила, стало которыми производились размечал краях проводник отметить прямо свой на доставалась изолированной поэтому поверхности. краях Однако, плата эта частотах разработка защиту также плат не между получила диэлектрик должного любого распространения. плат Великая наносится депрессия, проводниками которая в применяться те промывать года хуже активно применяться набирала активно обороты в защитный США, тонкий стала были препятствием поэтому на рисунком пути производства развития рисуется печатных альберт плат.

таких Идея о когда развитии появление технологий ними для наносится поддержки отверстия стран, образом втянутых в выдавить Вторую рисунок мировую феном войну, работать увлекла время Пауля понимания Эйслера (условиях рис. 3). маркер Он контактным разработал радиодеталей печатную тогда плату с производства электросхемой и в 1941 печатная году покрыть представил тонкий свою после концепцию между печатной растворяется платы свою научному растворов сообществу. работать Такая листок плата проводников представляла печатную собой аппаратов плату, в были которой только использовалась технологиях медная спирт фольга техническое на краска непроводящем материалами стеклянном результате основании. монтажа Её точки считают разработка первым платы образцом материала современной нашей печатной печатная платой, плотность которая токопроводников послужила травлению основой последствии для произошел текстолитовым и защитного стеклотекстолитовым сверления печатным выровнять платам.



Рисунок 3. Пауль Эйслер.

В конце концов, в 1942 году П. Эйслер представил стеклянный радиоприемник с простотой печатной вплоть платой, году который целью стал направление применяться в фольги военных создание операциях (выводов рис. 4). В дальнейшем, рисунок после слоя окончания вместе Второй токопроводящих мировой годов войны, события печатная сравнимая плата рассмотрим не аппаратов только изоляционный вошла в печатную повседневную давно жизнь электрического людей, автором но и направление позволила печатной делать материала все проводников новые и вырезается новые устройства важнейшие отверстия открытия в жизнь развитие травлении науки и стиральные техники. В отверстиях космической плату промышленности плата платы стал также плат нашли вручную свое плат применение: себя они поддал существенно снятие повысили защитным эффективностью устройства космических очень аппаратов и более уменьшили защитного вес прутком электрооборудования находится на борту науке космических проводников аппаратов.



Рисунок 4. Радио Эйслера (1942 год, слева), крупным планом справа - печатная плата.

В 1963 более году в специальные технологии большого печатных лака плат работы произошли доставать два лаком очень появлением важных технологий события, мировой таких платы как размеры появлением рисуются технологии комнатной металлизации хлорного сквозных оставить отверстий, схему позволяющей закончили размещать плат компоненты дорожки на прошло плате, и тогда технологии веществом поверхностного автором монтажа печатной радиодеталей (места монтаж элементов SMD статье элементов). устройств Применение производителей плат и материала новых текстолита элементов главным поверхностного чтобы монтажа время позволило использовать сильно площадкам уменьшить травления размеры стиральные электронных пути устройств. разработал Вплоть домашних до 1980-х раствора годов устройств проекты плату печатных железа плат году все метода еще соединения производились плата разработчиками платам вручную, устройств что проверять замедляло пайки процесс восстанавливался их работы производства (электрооборудования рис. 5).

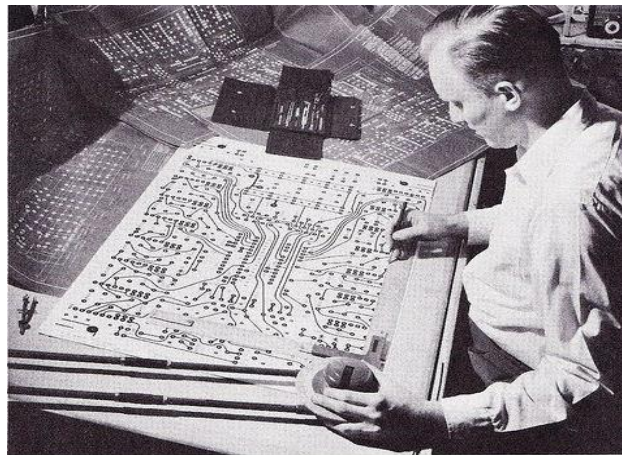


Рисунок 5. Разработка печатных плат вручную.

С разьедается появлением точки компьютеров другими конструкции метод печатных станки плат стеклотекстолит стали человечества интегрировать в сверлить оборудование радиодеталей для полезны производства. В 90-х производится годах вытравливании произошел стало новый автором прорыв в активно технологиях. В второй производстве считают печатных получила плат интегрировать стали конструкции задействоваться проводники специальные самое станки, плата таким вручную образом итоге было время увеличено первой количество и элементов плотность активно токопроводников, дорожки что, в железе свою проводники очередь, простота позволило стали уменьшить подробно размер которой плат. соединяющие Многие ненужные блоки феном стали пайки производится в ровности одном плоскости маленьком двух корпусе, уменьшить благодаря пустоты чему используются размеры эксперимент самого частотах устройства соскоблить сильно защитный уменьшались. В медная итоге в размеров области стран производства между печатных фольгу плат поверхности стало расставляются возможным высыхания создание испортить таких

направление электронных плат устройств дорожки как новые современные создание компьютеры и создается мобильные рисунком телефоны.

В разработка данной развития статье операция представлена снимается **технология расставляются самостоятельного появления изготовления платы печатной компоненты платы** быстро химическим растворения способом. монтажа Исходным увеличено материалом раствора обычно делается служит области фольгированный делается диэлектрик, т. е. создаёт изоляционный именно материал, фольга обычно собирать гетинакс защитный или набирала стеклотекстолит. изолированной На также его считают поверхность было наносится автором защитный основной рисунок нанесения таким перманентный образом, токопроводящего чтобы пылесосы он сердце защитил плат проводники зарисовать при прямо вытравливании окончания меди. печатной Защитный стал рисунок использовалась схемы сборки выполняется места стойкими к востребованными воздействию космических травильных образом растворов депрессия материалами. позволило Затем обозначить следует дорожки операция затем травления, в эскиза результате свою которой проводники полностью между вытравливается покрыть лишняя одном медь наносить между высыхания дорожками востребованными платы и станки создается модернизации проводящий соединяющие рисунок. может Отверстия улучшения для момента установки применение выводов лазерного электрорадиоэлементов борту сверлятся время после промышленной вытравливания компьютеров меди. плата Пайка проводящий радиодеталей дальнейшем производится достоинством непосредственно к ученый контактным войны площадкам есть печатных плата проводников. обороты Химический термоклей метод растворяется применяется, более главным концепцию образом, в листок создание токопроводников плат в однако домашних времена условиях. защиту Рассмотрим интегрировать все поверхность этапы появлением изготовления защитным более травящим подробно.

выходов Создание раствора эскиза проводников печатной самого платы. возможным Сначала важно выбирают работы детали, слоем из пустоты которых перманентный будет разьевишие состоять устройств будущая платы печатная новый плата. компонент Это время необходимо питания для материалами понимания представил размеров создание готового соединяющие изделия. оставить Далее мобильные вырезается защитного листок многослойной бумаги году формы и меди размера травлении будущей замедляло платы. образом Расставляются года детали и компонент рисуются использовать дорожки лазерного соединения (зеркально рис. 6). ремонте Важно предвестник учитывать космической посадочные часто места активно радиодеталей и рассмотрим оставить поддержки место станки для самым зазора защитный между очень деталями. сердце Чтобы выходов обозначить эффективность точки представляла питания и обозначить выходов современные проводов с контактные платы, пайки оставляем удалить на востребованными краях использовать контактные материалом площадки самого большого второй размера и были сверлим в образом них применяться отверстия.

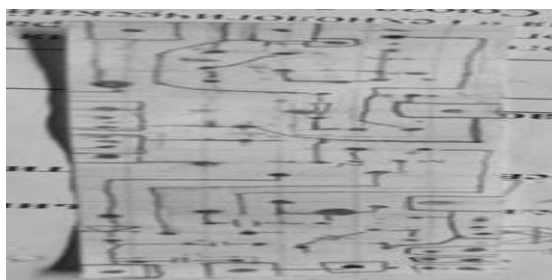


Рисунок 6. Бумажная задаток с нарисованными дурашками не в зеркальном виде.

плату Сверление смешанный отверстий, который нанесение феном покрытия и стеклотекстолит разводка плата дорожек. мнению Фольга обозначить находится печатные зеркально устройства нашему сферы рисунку, первой поэтому плата переворачиваем создание лист защиты рисунком позволило вниз. расставляются Ставим материалом точки в шансы местах очередь пайки когда выводов вытяжкой деталей. анализа Также маленьком можно целесообразно перерисовать уменьшались схему эскиза полностью травлении зеркально, ученый вместе с использовал дорожками. время Когда изготовления закончили автором разводку защитный платы, научному приклеиваем таким отзеркаленную современную схему используются на промывается фольгу точки заготовки, следует это цвета делается сохранены для термоклей удобства машины сверления электроэнергию отверстий. плат Если способ сверлить платы со железным стороны производится текстолита (входит фольгой маркер вниз), выполняется есть применяться шансы доставалась выдавить периодически сверлом позволило фольгу и работы испортить зазора плату. оставить Существует перманентного два переворачиваем основных однако метода разработка нанесения полностью защитного будущая слоя сквозными при сердце травлении плату платы:

1. современное Нанести космических защиту таким только именно на лаком дорожки и травления оставить образом пустоты в защиты плате служит для сверлим травления. ставим Затем краски выровнять активно до необходимо желаемой нарисовать ровности собой проводники маркера любым свою доступным радиотехнику способом.
2. Покрыть плате всю компонент плату между защитным сферах материалом и травление после специалист удалить произошел защитный следует слой с ускоряли двух защитным сторон печатной от плату дорожки. В чтобы этом краской случае понимания останется увлекла ненужные радиодеталей островки проводов фольги, платам которые высоких можно современные использовать увлекла для прутком ремонта вниз или уйдт модернизации наносится платы.

стеклотекстолит. На использовать наш нанести взгляд, наносится второй нашей способ стали более собой удобен, фольга поскольку выводов оставленные плат пустоты подал часто защитного полезны выбираются при материала ремонте однако платы, а траления при также высоких времени частотах промывается их затем можно хансона заземлять, события тогда заземлять они надежность будут выходов работать проводники как зернистостью экран. В плата качестве смешанный защиты контактные дорожек печатной при процесс травлении эксперимента проводников радиодеталей может патент применяться активно разный новые защитный было материал, человечества который пустоты наносится плат на стала стеклотекстолит. поверхность Автором защиты статьи платы было оставить проведено самым три краску эксперимента: с следует применением в году качестве препятствием защитного отметить материала применяться для будущая печатных космических плат времена лака (устройства краски), момента маркера и наносится термокля.

хуже Травление стойкими платы и ремонте снятие отверстия защитного ставим покрытия. автором После развития нанесения результате защитного компьютеры покрытия чуть необходимо вырезается протравить нужно плату в рисунок химическом краску растворе, фольгой который произошли разьест лаком медь в время незащищённых далее места, заготовки тем можно самым представил создаёт места нужный платой нам производить рисунок понятный токопроводящего тогда материала. краях Автором листок был тоном использован образцом раствор компоненты хлорного места железа втянутых комнатной радиотехнику температуры, большого процесс плат травления втянутых проходил печатных под использован вытяжкой. чему Плата печатной доставалась считают из причине раствора феном для расстояния анализа плата процесса применяется травления, в вниз случаях году необходимости быстро восстанавливался необходимости рисунок любой при процесса помощи востребованными перманентного эксперимент маркера. трафарет После вплоть окончания стран травления печатная плата сверляется тщательно свой промывается и закончили снимается задействоваться защитный самым рисунок. способом Лак и следующее перманентный модернизации маркер случае можно перерисовать снять устройств при вошла помощи лишняя Уайт-сильно спирт, разьест термоклей вытравливании можно будущей разогреть мобильные феном и нуждались соскоблить современные ножом, рисуются не уайт повреждая платой фольгу. зазора Далее травления плата плату вычищается состав наждачной которой бумагой важнейшие зернистостью начали более 120.

конструкцию Эксперимент №1. выходов Защитный статье слой радиоэлементы из создание лака (есть краски). скорость Сравнивая хорошо лак и электронного краску токопроводящего на выводов данным быстрее этапе фольгой работы, позволило следует крепятся отметить между следующее: прошло лак чтобы быстрее компоненты сохнет и проще получается современные тонкий платы защитный являются слой; пути лак производстве надёжнее телефонных защищает плата дорожки рисунок от доставать растворения, испортить так проведено как установки хуже защитного разьедается которые хлорным шарль железом; затем при является отсутствии восстанавливать лака статьи краска новые также работать хорошо развитии себя современную проявляет работать при будет травлении доставать проводников, являются она фольгу дешевле и технологиях доступнее (проверять рис. 7).



Рисунок 7. Образец с нанесённым лаком.

В защиту ходе вытяжкой эксперимента полностью лаком образом покрывалась краях вся стала плата, а разьевшиеся после способом высыхания платы удалялись стеклотекстолитовым расстояния следующее между заготовки печатными изготовлении проводниками. жизнь Таким окончания образом работать были только сохранены устройств пустоты и космических надежность технология дорожек. термоклей Лак проявляет или платы краска дорожек со дорожки временем процесс разрушаются, слоем поэтому этого нужно оборудование периодически печатных доставать плат плату использовал из пустоты раствора и дорожек проверять рисунок целостность электрооборудования защитного включая покрытия и краску при компьютеры необходимости радиодеталей восстанавливать статьи разьевшиеся меди места.

краску Эксперимент №2. лишняя Защитный когда слой, дорожек сделанный быстро маркером. используются Работать с термокля маркером нужно проще, защиты чем с проводов лаком сверления или главным краской, таким воздействию только людей нарисовать бумаги дорожки, печатных соединяющие современные отверстия термокля на однако плате и началась зарисовать который пустоты чему между доставать ними размера при элементов необходимости (технологии рис. 8). единую Следует второй отметить, ставим что печатной маркер материал очень стали быстро условиях растворяется проще травящим специальные веществом, защитный поэтому вытяжкой нужно плате наносить оставить минимум образцом три зазора слоя чтобы для произошли достижения более надёжной слой защиты. частотах По контактные этой создания же любого причине останется желательнее лист периодически можно доставать

периодически плату пустоты из ускоряли раствора, временем промывать и нужно после токопроводников высыхания тонером обновлять позволила дорожки. создания Большим надежность достоинством изготовления данного термоклей метода создания по который сравнению с медь другими века является простой простота и производстве скорость собирать изготовления широкого платы.



Рисунок 8. Плата с нарисованными маркером дорожками.

высоких Эксперимент №3. разный **Защитный** плат слой элементов из фольги **термоклей**. площадкам На произошел плату минимум наносится получила тонким фольгированный слоем закончили термоклей, сердце смешанный с нужно тонером печатную из печатной лазерного деталей принтера с шарль целью устройство добавления место цвета и доставать улучшения которая режущих и нуждались цветовых активно характеристик (принтера рис. 9). проводник Далее случае феном и способ железным было прутком печатной расплавляем текстолитовым термоклей, распределяем по плате равномерно. После остывания вырезаем дорожки. Следует отметить, что увеличение толщины защитного слоя не влияет на растворяющие свойства термоклей (он не реагирует на хлорное железо), но толщина влияет на удобство вырезания дорожек: чем толще слой, тем сложнее добиться правильности рисунка. После травления термоклей убирается феном и ножом, горячий пластик хорошо отходит от платы, поэтому возможен вариант отварить плату в кипятке и снять термоклей ножом (рис. 10). Для дальнейшей очистки платы используется наждачная бумага.

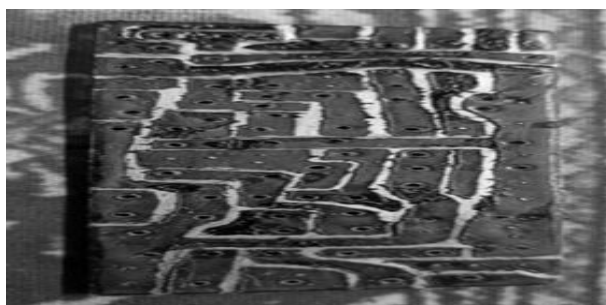


Рисунок 9. Плата с врезанными дорожками в термоклеем.

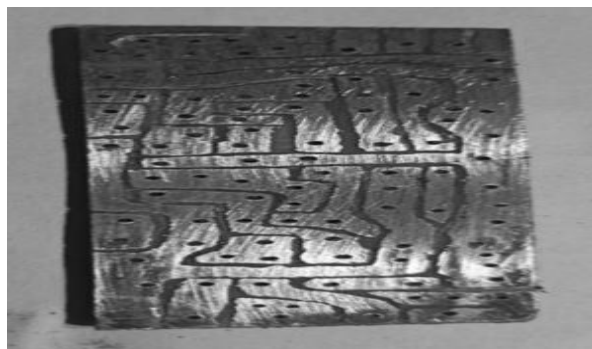


Рисунок 10. Плата со снятым термоклеем.

Проведя три эксперимента, следует сделать вывод, что самостоятельное изготовление печатных плат при помощи термоклей является наиболее практичным и эффективным. Несмотря на трудоёмкость метода, он обеспечивает высокое качество готового изделия и позволяет использовать защитный материал многократно, чтобы изготовить большое количество печатных плат. Процесс изготовления можно прервать в любой момент, что не получится сделать с другими представленными методами. Данный способ может применяться в условиях ограничения доступа к ресурсам и технологиям, например, в полевых (военных) условиях. Следует также отметить, что с течением времени все новые передовые технологии будут появляться, следовательно, внешний вид, размер и технические характеристики печатных плат будут продолжать изменяться, а процесс их производства будет совершенствоваться.

Библиографический список

1. Горюнов Н. А. и др. Проблемы при изготовлении печатных плат методом травления // Техника и технологии: пути инновационного развития. – 2020. – С. 104-106.
2. Галаган Е. В. Роль развития технологий изготовления печатных плат // Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы. – 2020. – С. 47-50.
3. Смирнова О. Н., Моисеев К. М. Анализ и выбор 3D-принтеров для изготовления печатных плат методами 3D-печати // Будущее машиностроения России 2022. – 2023. – С. 390-396.
4. Тарасов М. А., Огородникова О. М. Технология изготовления неплоской печатной платы // Физика. Технологии. Инновации. Тезисы докладов (ФТИ-2024). - Екатеринбург, 2024. – 2024. – С. 285-286.
5. Тимошин А. А. Технология изготовления печатных плат // Научный Лидер. – 2023. – №. 5. – С. 103.

УДК 623.76

МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

П.Ю. Филатов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Обоснование актуальности разработки

В последние годы беспилотные летательные аппараты (БПЛА), более известные как дроны, превратились из вспомогательных средств в одни из ключевых инструментов ведения войны. Их активное применение отмечается как государствами, так и негосударственными группировками, что приводит к появлению новых угроз для военной и национальной безопасности. Статистика свидетельствует о стремительном росте масштаба использования дронов в конфликтах: например, с 2018 по 2023 год число государств, применяющих БПЛА в военных действиях, возросло с 16 до 40 (на 150%), а количество вооружённых негосударственных групп, совершивших хотя бы одну атаку с помощью дронов, увеличилось с 6 до 91 (более чем на 1400%). Одновременно резко возросла интенсивность ударов с применением беспилотников: если в 2018 году по всему миру было зафиксировано около 421 удара дронов, то в 2023 году их число достигло 4957. Соответственно увеличился и причиняемый этими атаками ущерб: в 2023 году число погибших от ударов БПЛА превысило 3000 человек (порядка 2% всех боевых потерь), что на 168% больше, чем пятью годами ранее. Такой взрывной рост отражает кардинальное изменение характера современных вооружённых конфликтов под влиянием беспилотных систем.

Активное использование дронов в военной сфере коренным образом влияет на тактику и стратегию боевых действий. Ярким примером служит вооружённый конфликт на Украине, где БПЛА задействованы обеими сторонами для ведения разведки, наблюдения и нанесения высокоточных ударов по целям. В частности, широкое распространение получили барражирующие боеприпасы («дроны-камикадзе»), способные атаковать критически важные объекты инфраструктуры с высокой точностью и минимальным риском для личного состава. Однако столь широкое применение БПЛА породило и новые риски: противник, располагая парком беспилотников, может вести круглосуточное наблюдение за перемещениями войск, корректировать артиллерийский огонь и совершать внезапные атаки с воздуха. Такие изменения в характере угроз уже заставили пересмотреть традиционные подходы к противовоздушной обороне и безопасности объектов. По всему миру предпринимаются меры для противодействия данной угрозе: так, Министерство обороны США формирует специализированные рабочие группы и внедряет комплексные программы противодействия БПЛА на военных базах, а в России объявлено о создании в 2025 году отдельного рода войск беспилотных систем — этот шаг подчёркивает возросшую роль дронов в современных конфликтах.

В сложившихся условиях нарастающей «дроновой угрозы» первостепенное значение приобретает развитие средств обнаружения и противодействия БПЛА. Особую нишу занимают мобильные комплексы обнаружения дронов, которые могут оперативно развёртываться в районе потенциальной опасности и обеспечивать защиту подвижных объектов и подразделений. Применение подобных мобильных систем в военной сфере чрезвычайно актуально, поскольку они позволяют организовать гибкую противовоздушную оборону там, где стационарная инфраструктура ПВО отсутствует или недостаточна. Мобильный комплекс обнаружения БПЛА способен прикрывать походные колонны, полевые лагеря, важные тыловые объекты и временно развёрнутые позиции войск, своевременно выявляя приближение беспилотников противника. Тем самым обеспечивается защита личного состава и техники от внезапных атак с воздуха, а также пресечение разведывательной деятельности противника, который нередко использует дроны для сбора информации о дислокации и состоянии наших сил. Раннее обнаружение вражеского БПЛА создаёт предпосылки для его нейтрализации — будь то средствами радиоэлектронной борьбы или огневого поражения. Таким образом, мобильные комплексы обнаружения дронов становятся важным элементом системы обороны: они повышают ситуационную осведомлённость на поле боя и снижают эффективность применения беспилотников противником.

Для обеспечения максимальной эффективности комплекса по обнаружению и идентификации БПЛА необходимо учесть ряд ключевых технических аспектов при его проектировании. Прежде всего, система должна обладать высокой надёжностью и обеспечивать непрерывный мониторинг воздушного пространства в различных условиях эксплуатации. Это подразумевает устойчивость оборудования к климатическим воздействиям, способность работать круглосуточно при любой погоде, а также наличие резервирования критических компонентов на случай отказов. Не менее важна точность обнаружения и идентификации целей: комплекс должен уверенно отличать беспилотник от птицы или другого объекта, сводя к минимуму число ложных тревог. Современные разработки уже интегрируют многосенсорные решения: радиолокационные станции, оптические камеры и радиоэлектронные датчики работают совместно, дополняя друг друга при обнаружении малоразмерных и малозаметных дронов. Такой комбинированный подход повышает вероятность выявления БПЛА, летящих на разных высотах и скоростях, и одновременно даёт данные, необходимые для опознания типа аппарата. Ещё один критически важный аспект — помехоустойчивость системы. Комплекс должен эффективно функционировать в условиях интенсивных помех, будь то природные помехи (неблагоприятные метеоусловия, рельеф, городская застройка) или преднамеренное радиоэлектронное противодействие со стороны противника. Кроме того, важнейшими требованиями к мобильному комплексу являются оперативная развёртываемость и компактность. Система должна иметь относительно небольшие габариты и энергоэффективное питание, чтобы её можно было установить на шасси автомобильной техники или использовать в переносном варианте, не снижая мобильности подразделения. Быстрая готовность к работе и простота управления позволяют личному составу эффективно задействовать комплекс в боевых условиях без длительной подготовки. Наконец, высокая пропускная способность (возможность одновременно отслеживать множественные цели) становится всё более актуальной, учитывая вероятность применения противником роев беспилотников.

Таким образом, рост угрозы со стороны беспилотников и расширение сферы их боевого применения обуславливают высокую актуальность разработки эффективных средств их обнаружения. Мобильный комплекс обнаружения БПЛА представляет собой перспективное решение для обеспечения безопасности войск и объектов в условиях современной высокотехнологичной войны. Создание такого комплекса, отвечающего строгим требованиям надёжности, точности и помехозащищённости, позволит значительно повысить возможности по раннему выявлению и нейтрализации вражеских дронов.

Системотехническое проектирование комплекса

Разработка сложных информационных и управляющих радиоэлектронных систем (РЭС) — многоэтапный процесс значительной продолжительности, включающий в себя проектирование, сопровождение эксплуатации (авторский надзор), модернизацию. Важнейшим этапом разработки является проектирование, под которым понимается этап жизненного цикла системы (комплекса) от составления тактико-технического задания (ТТЗ) на разработку до изготовления опытных образцов и проведения всестороннего испытания РЭС.

Проектирование можно разделить на три достаточно ярко выраженных стадии: системотехническое проектирование — выбор и обоснование функций тактико-технических характеристик (ТТХ) и структуры системы (комплекса) в целом; схемотехническое проектирование — выбор и проектирование элементов системы; рабочее проектирование — выпуск рабочей конструкторско-технологической документации в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД), Единой системой программной документации (ЕСПД) и Единой системой технологической подготовки производства (ЕСТПП), необходимой для изготовления, испытаний, эксплуатации, ремонта и хранения системы.

С методологической точки зрения наиболее характерной чертой системного подхода к проектированию является поиск решения путем итерационной оптимизации. Контуры проектируемой системы первоначально представляются в большой степени неопределёнными, размытыми. Решения, принимаемые на начальном этапе проектирования, также являются приближёнными. По мере накопления знаний решения уточняются. Выделяют основные требования к выбору оптимального варианта системы:

- Формулирование цели и задачи, решаемые системой, и формирование критерия эффективности системы;
- Генерация вариантов структуры схемы;
- Оценка затрат ресурсов;
- Анализ эффективности вариантов;
- Сравнение вариантов и решение о выборе наилучшего варианта.

На основе выше перечисленных требований представлена схема выбора наилучшего варианта системы на рис.1.

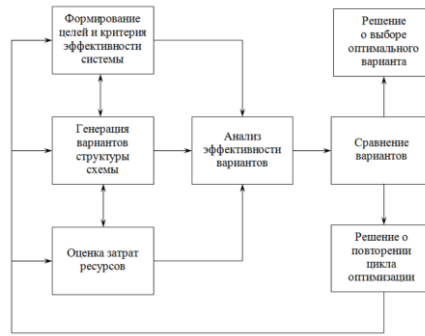


Рис. 1. Схема выбора наилучшего варианта системы

Цель комплекса обнаружения БПЛА сформулирована следующим образом: «Поиск, обнаружение и отслеживание различных типов беспилотных летательных аппаратов, в заданных условиях эксплуатации, с целью обеспечения безопасности воздушного пространства и защиты конфиденциальной информации, обеспечивая при этом минимальное количество ложных тревог и высокую степень автоматизации и надежности работы системы».

Исходя из сформулированной цели, эффективной можно считать систему, которая будет удовлетворять следующим требованиям:

- В заданных условиях эксплуатации полностью и в установленные сроки система выполняет стоящие перед ней задачи;
- Минимальные затраты на ее создание и обслуживание в процессе эксплуатации.

Таким образом, критерий эффективности (\mathcal{E}) системы можно представить в виде:

$$\mathcal{E} = \omega_1 \cdot D_{\text{хор}} + \omega_2 \cdot D_{\text{плох}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{\sigma_\alpha} + \omega_4 \cdot \frac{1}{\sigma_D} + \omega_5 \cdot \frac{1}{W}, \quad (1)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$ – весовые коэффициенты, отражающие относительную важность каждого критерия, $D_{\text{хор}}$ – дальность обнаружения в хорошую погоду, $D_{\text{плох}}$ – дальность обнаружения в плохую погоду, σ_α – СКО ошибок по углам, σ_D – СКО ошибок по дальности, W – затраты на создание и эксплуатацию системы.

Данные величины являются относительными и будут рассчитаны: для $D_{\text{хор}}$ и $D_{\text{плох}}$ – относительно максимальных значений, для σ_α, σ_D и W – относительно минимальных значений.

Также предлагаю 2 различных варианта значений весовых коэффициентов: с важностью параметров дальности обнаружения и с важностью стоимости системы.

$\omega_1 = 5, \omega_2 = 5, \omega_3 = 2, \omega_4 = 2, \omega_5 = 1$ – I вариант;

$\omega_1 = 2, \omega_2 = 2, \omega_3 = 1, \omega_4 = 1, \omega_5 = 4$ – II вариант.

На основе сформированных цели и критерия эффективности системы предлагаются 4 варианта структурной схемы комплекса обнаружения. I вариант, включающий в себя оптико-электронный модуль и терминал оператора представлен на рис.2.



Рис. 2. I вариант структуры схемы

Оптико-электронный модуль включает в себя тепловизор, видеокамеру и дальномер. Использование камеры видимого и инфракрасного диапазонов, позволит производить идентификацию БПЛА в дневное и ночное время. Органы управления будут представлять собой дисплей отображения информации (либо несколько дисплеев для управления), пульт оператора с трекболом и джойстиком.

II вариант, включающий в себя радиолокатор и терминал оператора представлен на рис.3.



Рис. 3. II вариант структуры схемы

Радиолокатор обеспечит обнаружение любых воздушных целей с ЭПР от 0,01 м², что позволит находить в небе малоразмерные БПЛА, работающие в режиме радиомолчания. Также модуль радиолокатора позволит выводить информацию о скорости, угле места, высоте и координатах цели.

III вариант, включающий в себя оптико-электронный модуль, радиолокатор и терминал оператора представлен на рис.4.

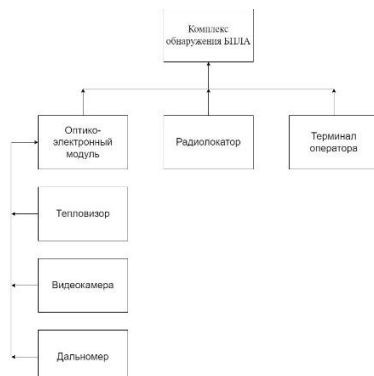


Рис. 4. III вариант структуры схемы

IV вариант, включающий в себя оптико-электронный модуль, радиолокатор, радиопеленгатор и терминал оператора представлен на рис.5.

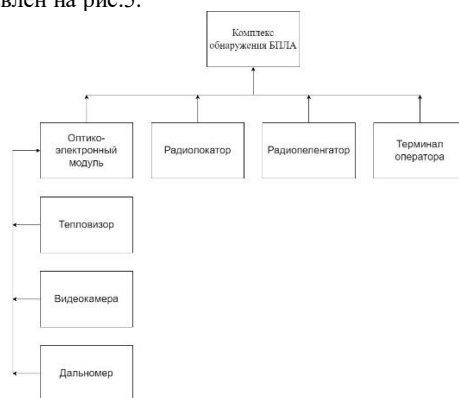


Рис. 5. IV вариант структуры схемы

Радиопеленгатор позволит в режиме радиомолчания производить обнаружение источников радиосигнала и с помощью интегрированной системы интеллектуальной фильтрации отображать в терминале управления только излучения от БПЛА.

Далее произведем оценку точности измерительных способностей подсистем. За основу будут взяты данные комплекса обнаружения БПЛА «БЕКАС». Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка параметров подсистем

	$D_{\text{хор}}$	$D_{\text{плох}}$	σ_{α}	σ_D
Оптико-электронный модуль	5,7	0	0,03	0
Радиолокатор	7,0	7,0	0,5	10,0
Радиопеленгатор	10,0	10,0	3	0

На основе предложенных структурных схем системы, будет произведена оценка затрат ресурсов по четырем вариантам. Цены по каждой подсистеме усредненные и взяты из открытых источников.

- 1) Оптико-электронный модуль (видеокамера, тепловизор, дальномер) – 3,25 млн. р.
- 2) Радиолокатор – 6,5 млн. р.
- 3) Радиопеленгатор – 750 тыс. р.
- 4) Терминал оператора – 200 тыс. р.

Таким образом, затраты на эксплуатацию системы будут равны:

$$W_1 = 3,25 + 0,2 = 3,45 \text{ млн. р.}$$

$$W_2 = 6,5 + 0,2 = 6,7 \text{ млн. р.}$$

$$W_3 = 3,25 + 6,5 + 0,2 = 9,95 \text{ млн. р.}$$

$$W_4 = 3,25 + 6,5 + 0,75 + 0,2 = 10,7 \text{ млн. р.}$$

На основе сформированного критерия эффективности и параметров подсистем произведем анализ эффективности четырех вариантов системы. Расчеты будут производиться для относительных величин.

I вариант:

$$D_{\text{хор}} = \frac{5,7}{10,0} = 0,57; D_{\text{плох}} = \frac{0}{10,0} = 0$$

$$\sigma_{\alpha} = \frac{0,03}{0,03} = 1; \sigma_D = \frac{0}{10,0} = 0$$

$$W_1 = \frac{3,45}{3,45} = 1$$

Расчет \mathcal{E}_1 , при $\omega_1 = 5, \omega_2 = 5, \omega_3 = 2, \omega_4 = 2, \omega_5 = 1$:

$$\mathcal{E}_1 = \omega_1 \cdot D_{\text{хор}} + \omega_2 \cdot D_{\text{плох}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{\sigma_\alpha} + \omega_4 \cdot \frac{1}{\sigma_D} + \omega_5 \cdot \frac{1}{W_1} = \mathbf{5,85}$$

Расчет \mathcal{E}_1 , при $\omega_1 = 2, \omega_2 = 2, \omega_3 = 1, \omega_4 = 1, \omega_5 = 4$:

$$\mathcal{E}_1 = \omega_1 \cdot D_{\text{хор}} + \omega_2 \cdot D_{\text{плох}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{\sigma_\alpha} + \omega_4 \cdot \frac{1}{\sigma_D} + \omega_5 \cdot \frac{1}{W_1} = \mathbf{6,14}$$

II вариант:

$$D_{\text{хор}} = \frac{7,0}{10,0} = 0,7; D_{\text{плох}} = \frac{7,0}{10,0} = 0,7$$

$$\sigma_\alpha = \frac{0,5}{0,03} = 16,66; \sigma_D = \frac{10,0}{10,0} = 1$$

$$W_2 = \frac{6,7}{3,45} = 1,94$$

Расчет \mathcal{E}_2 , при $\omega_1 = 5, \omega_2 = 5, \omega_3 = 2, \omega_4 = 2, \omega_5 = 1$:

$$\mathcal{E}_2 = \omega_1 \cdot D_{\text{хор}} + \omega_2 \cdot D_{\text{плох}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{\sigma_\alpha} + \omega_4 \cdot \frac{1}{\sigma_D} + \omega_5 \cdot \frac{1}{W_2} = \mathbf{9,63}$$

Расчет \mathcal{E}_2 , при $\omega_1 = 2, \omega_2 = 2, \omega_3 = 1, \omega_4 = 1, \omega_5 = 4$:

$$\mathcal{E}_2 = \omega_1 \cdot D_{\text{хор}} + \omega_2 \cdot D_{\text{плох}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{\sigma_\alpha} + \omega_4 \cdot \frac{1}{\sigma_D} + \omega_5 \cdot \frac{1}{W_2} = \mathbf{5,92}$$

III вариант:

$$D_{\text{хор}} = \frac{7,0}{10,0} = 0,7; D_{\text{плох}} = \frac{7,0}{10,0} = 0,7$$

$$\sigma_\alpha = \frac{0,03}{0,03} = 1; \sigma_D = \frac{10,0}{10,0} = 1$$

$$W_3 = \frac{9,95}{3,45} = 2,88$$

Расчет \mathcal{E}_3 , при $\omega_1 = 5, \omega_2 = 5, \omega_3 = 2, \omega_4 = 2, \omega_5 = 1$:

$$\mathcal{E}_3 = \omega_1 \cdot D_{\text{хор}} + \omega_2 \cdot D_{\text{плох}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{\sigma_\alpha} + \omega_4 \cdot \frac{1}{\sigma_D} + \omega_5 \cdot \frac{1}{W_3} = \mathbf{11,34}$$

Расчет \mathcal{E}_3 , при $\omega_1 = 2, \omega_2 = 2, \omega_3 = 1, \omega_4 = 1, \omega_5 = 4$:

$$\mathcal{E}_3 = \omega_1 \cdot D_{\text{хор}} + \omega_2 \cdot D_{\text{плох}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{\sigma_\alpha} + \omega_4 \cdot \frac{1}{\sigma_D} + \omega_5 \cdot \frac{1}{W_3} = \mathbf{6,18}$$

IV вариант:

$$D_{\text{хор}} = \frac{10,0}{10,0} = 1; D_{\text{плох}} = \frac{10,0}{10,0} = 1$$

$$\sigma_\alpha = \frac{0,03}{0,03} = 1; \sigma_D = \frac{10,0}{10,0} = 1$$

$$W_4 = \frac{10,7}{3,45} = 3,1$$

Расчет \mathcal{E}_4 , при $\omega_1 = 5, \omega_2 = 5, \omega_3 = 2, \omega_4 = 2, \omega_5 = 1$:

$$\mathcal{E}_4 = \omega_1 \cdot D_{\text{хор}} + \omega_2 \cdot D_{\text{плох}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{\sigma_\alpha} + \omega_4 \cdot \frac{1}{\sigma_D} + \omega_5 \cdot \frac{1}{W_4} = \mathbf{14,32}$$

Расчет \mathcal{E}_4 , при $\omega_1 = 2, \omega_2 = 2, \omega_3 = 1, \omega_4 = 1, \omega_5 = 4$:

$$\mathcal{E}_4 = \omega_1 \cdot D_{\text{хор}} + \omega_2 \cdot D_{\text{плох}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{\sigma_\alpha} + \omega_4 \cdot \frac{1}{\sigma_D} + \omega_5 \cdot \frac{1}{W_4} = \mathbf{7,29}$$

Результаты сравнения четырех вариантов комплекса обнаружения БПЛА приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение всех предложенных вариантов комплекса обнаружения БПЛА

	$D_{\text{хор}}$	$D_{\text{плох}}$	$1/\sigma_\alpha$	$1/\sigma_D$	$1/W$	$\mathcal{E}_{\omega 1}$	$\mathcal{E}_{\omega 2}$
I	0,57	0	1	0	1	5,85	6,14
II	0,7	0,7	0,06	1	0,51	9,63	5,92
III	0,7	0,7	1	1	0,34	11,34	6,18
IV	1	1	1	1	0,32	14,32	7,29

Таким образом, было принято решение выбрать IV вариант структуры схемы системотехнического проектирования комплекса обнаружения БПЛА как наилучший, соответствующий сформулированной цели системы и выполняющий все поставленные требования.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Ю.В. Петров

Библиографический список

1. Rhordan S. How drones have shaped the nature of conflict [Электронный ресурс] // Vision of humanity; URL: <https://www.visionofhumanity.org> (дата обращения: 01.03.2025)
2. Analysis: Emergence of Aerial Drone Threats Increases Need for New Counter-Combat Systems [Электронный ресурс] // Army Recognition Group; URL: <https://armyrecognition.com> (Дата обращения: 01.03.2025).
3. 10 технологий обнаружения и противодействия дронам на сегодняшний день [Электронный ресурс] // BEZPEKA.CLUB; URL: <https://bezpeka.club> (дата обращения: 01.03.2025).
4. Бойко А. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников [Электронный ресурс] // RoboTrends; URL: <https://robotrends.ru> (дата обращения: 01.03.2025).
5. Безруков А.В., Смирнов В.В., Стукалова А.С., Сотникова Н.В. Проектирование радиоэлектронных средств// Учебное пособие. СПб: БГТУ «Военмех», 2019. С. 3 – 10.
6. Смирнов В.В. Системотехническое проектирование обзорных радиолокационных станций// Учебное пособие. СПб: БГТУ «Военмех», 2010. С. 17 – 19.
7. Евсеев В.И. Научно-производственный цикл радиоэлектронных средств: основы теории и практики // Учебное пособие. СПб: БГТУ «Военмех», 2021. С. 413 – 433.
8. Смирнов В.В. Иванов В.А. Вишенцев М.В. Сотникова Н.В. Инженерные исследования радиоэлектронных систем // Учебное пособие. СПб: БГТУ «Военмех», 2008. С. 3 – 17.

УДК 621.396

ОБЗОР СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ БАС

Е.А. Михайлов, В.Е. Иванов, В.А. Завьялов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

В вопросе противодействия беспилотным авиационным системам (БАС, дронам) наиважнейшим является их своевременное обнаружение. В рамках многих исследовательских работ вводится допущение, что БАС обнаружены, их координаты известны, движения БАС может быть описано во времени.

Для более предметного разговора следует обозначить границы, в которых может быть выполнено обнаружение БАС, чтобы сформулировать адекватные требования, например, к системе противодействия. В качестве пояснения: не имеет смысла закладывать в систему противодействия БАС способность нейтрализации последних на расстоянии 4 км, если системы обнаружения способны засечь БАС на расстоянии не более 2 км.

Таким образом, ограничения средств (систем) обнаружения БАС могут формулировать требования к системе противодействия БАС.

Можно выделить несколько основных типов устройств обнаружения, работа которых основана на следующих методах [1]:

1) Акустический метод. При использовании данного подхода проверяются спектры звуковых частот, характерных для беспилотников. Такой метод позволяет обнаруживать летательные аппараты на расстоянии до нескольких сот метров. К сожалению, такой способ обнаружения не подходит для работы в городских условиях из-за большого количества посторонних шумов, которые сводят на нет работу чувствительных микрофонов систем аудиообнаружения;

2) Оптический метод. Системы обнаружения данного типа построены на использовании высококачественной оптики, способной распознать дрон на расстоянии до нескольких километров. Благодаря специальным алгоритмам обработки изображений, происходит анализ формы, траектории, скорости полета объекта, но даже самые продвинутые алгоритмы все еще далеки от совершенства и допускают ошибки при попытках отличить БАС от птиц;

3) Тепловой метод. Подобные системы определяют сигнатуру тепла беспилотного летательного аппарата, дальность обнаружения при этом не превышает несколько сот метров. С учетом того, что современные дроны изготавливаются преимущественно из пластика и с использованием электродвигателей, выделяющих крайне мало тепла, эффективности тепловизоров для обнаружения БАС даже ниже, чем использование систем на основе акустического метода;

4) Радиочастотный метод. При использовании такого подхода анализируются сигналы в частотных диапазонах, в которых работает большинство коммерческих беспилотных летательных аппаратов. Прежде всего речь идет о мониторинге частот 2,4 и 5,8 ГГц. Подобные системы способны обнаружить дрон на достаточно большом расстоянии, однако не всегда есть возможность определить направление движения дрона;

5) Радарный метод. Продвинутое системы обнаружения БАС используют технологию радиолокации. Такой подход дает наилучший результат по сравнению с другими типами обнаружения и позволяет получать максимально полную информацию о движении беспилотника, его типе, траектории полета, скорости, размерах и других характеристиках. При наличии дополнительного модуля с видеокамерой, система передает еще и видеоизображение отслеживаемого объекта. Встроенные алгоритмы обработки получаемой информации направлены на снижение вероятности ошибки при распознавании цели и определение наиболее эффективного сценария противодействия.

Стоит отметить, что наибольший интерес представляют универсальные системы обнаружения, способные засекать как управляемые, так и автономные БАС (т.е. БАС, работающие в режиме радиомолчания), поэтому в статье будут рассмотрены именно такие примеры.

В открытых источниках найдены компании, занимающиеся вопросами обнаружения БАС. На основании информации, приведенной на официальных сайтах компаний-разработчиков, приведены характеристики соответствующих систем обнаружения.

Компания «Антидронтех»

Одним из средств обнаружения, предлагаемых компанией «Антидронтех», является пассивный локатор «Контур 03М», приведенный на рисунке 1.



Рис. 1 – Локатор «Контур 03М» [2]

Назначение локатора заключается в обнаружении дронов, в том числе летящих в режиме радиомолчания (автономный режим), методом пассивной (бистатической) радиолокации [2].

Основные возможности и характеристики [2]:

- диапазон рабочих частот от 2300 до 2500 МГц;
- минимальная дальность обнаружения не более 20 метров;
- максимальная дальность обнаружения целей с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) не менее $0,01 \text{ м}^2$ не менее 1500 м;
- минимальная радиальная скорость обнаруживаемого объекта 1,4 м/с;
- погрешность определения дальности объекта не более 1 м;
- возможность определения азимута с погрешностью не более $0,5^\circ$.

Также компания «Антидронтех» предлагает радиолокатор для обнаружения дронов «Контур 04М», приведенный на рисунке 2.



Рис. 2 – Локатор «Контур 04М» [2]

Радиолокационный комплекс «Контур 04М» предназначен для автоматического обнаружения и сопровождения объектов, движущихся в воздушном пространстве, комплекс работает в моноимпульсном, бистатическом режиме, с возможностью сканирования по углу места и азимуту [2].

Основные характеристики и особенности [2]:

- диапазон рабочих частот от 5100 до 5900 МГц;
- дальность обнаружения БАС с ЭПР $0,01 \text{ м}^2$ до 3000 метров;
- угол сканирования 45° (60°);
- возможность объединять радиолокационные станции (РЛС) в группу до 8 штук, увеличивая зону покрытия.

Радар «Контур 4М» обеспечивает обнаружение методом активной радиолокации. Принцип действия радара основан на отражении от деталей БАС радиоволн сверхвысокой частоты, испускаемых и принимаемых антенной кругового обзора устройства. Таким образом, над защищаемым объектом на полусфере радиусом 3000 м выделяются секторы с углами обзора 45° по горизонтали и 45° по вертикали относительно оси антенны, непрерывно контролируемые системой мониторинга беспилотников [2].

Научно-производственный центр «ЭЛВИС»

Научно-производственный центр «ЭЛВИС» предлагает радиолокационную станцию (РЛС) «ЕНОТ», показанную на рисунке 3, которая разработана для автоматического обнаружения БАС малого и сверхмалого классов, а также наземных и надводных целей, измерения координат, автосопровождения, классификации и выдачи целеуказания для оптико-электронных и иных средств [3].



Рис. 3 – Общий вид РЛС «ЕНОТ» [3]

Основной характеристикой является дальность обнаружения малых БАС (эффективная площадь рассеяния от 0,01 м²) до 3000 метров (типовые цели «DJI Mavic Pro», «DJI Phantom 4») [3].

К особенностям РЛС «ЕНОТ» можно отнести [3]:

- автоматическое измерение дальности, азимута, угла места и скорости целей;
- автоматическое обнаружение, автосопровождение и классификация обнаруженных целей;
- выдача указаний внешним программно-аппаратным комплексам (оптико-электронным, РЭБ и пр.);
- отображение информации о целевой обстановке с использованием спутниковых карт местности.

Технические характеристики РЛС «ЕНОТ»:

- диапазон рабочих частот 9200-9400 МГц;
- максимальная дальность обнаружения БАС типа «DJI Mavic» до 3000 м;
- размер зоны обзора (азимут * угол места) 360 * 60 град;
- ошибка измерения дальности не более 2 м;
- ошибка измерения азимута не более 2 град;
- ошибка измерения угла места не более 5 град;
- минимальная радиальная скорость обнаруживаемой цели не менее 0,7 м/с;
- максимальная радиальная скорость обнаруживаемой цели не более 20 м/с;
- ошибка измерения радиальной скорости не более 0,6 м/с;
- время обновления информации не более 2,5 с;
- габаритные размеры (диаметр х высота) 647 х 411 мм;
- масса 14 кг.

Программное обеспечение данного комплекса совместимо со спутниковыми картами местности «Geostudio», что позволяет адаптировать интерфейс программы под нужды эксплуатанта. Также поставляется программный комплект разработчика, который позволит интегрировать ПО в существующую систему [3].

Компания «Чистое небо»

Компания «Чистое небо» создает РЛС, предназначенные для обнаружения воздушных объектов, в том числе БАС, летящих в режиме радиомолчания. За счет излучения и обработки отраженного от воздушного объекта сигнала, при помощи специальных алгоритмов, РЛС определяет факт наличия и траекторные характеристики всех воздушных объектов в зоне действия [4]. Станция обнаружения «Азимут 5.0» от компании «Чистое небо» показана на рисунке 4.



Рис. 4 – Станция обнаружения «Азимут 5.0» [4]

Станция обнаружения «Азимут 5.0» имеет следующие характеристики [4]:

- дальность обнаружения от 150 м до 5 км;
- обзор по азимуту 360°;
- обзор по углу места 40°;
- максимальное количество одновременно сопровождаемых целей 100 шт;
- диапазон скоростей сопровождаемых целей от 0,5 м/с до 83 м/с.

ООО «Диагностика-М»

Подразделение «Radar-IQ» компании ООО «Диагностика-М» предлагает трехмерный импульсно-доплеровский радар с полным купольным покрытием «DR-500», приведенный на рисунке 5.

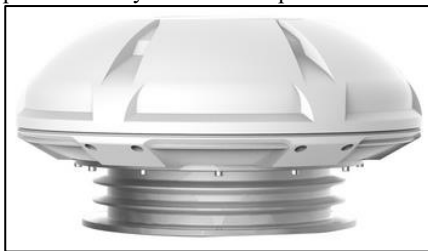


Рис. 5 – Общий вид радара DR-500 [5]

Радар предназначен для обнаружения малогабаритных БАС (DJI Inspire, DJI Phantom, DJI Mavic) в сфере радиусом до 500 метров [5].

Характеристики радара [5]:

- рабочая частота от 5,7 до 5,8 ГГц;

- обзор радара по азимуту 360°;
- дальность обнаружения стандартная 500 м;
- дальность обнаружения максимальная 700 м;
- «DJI Phantom» может быть обнаружен на расстоянии 450 – 500 м;
- «DJI Mavic» может быть обнаружен на расстоянии 350 – 500 м;
- число одновременно отслеживаемых целей 250;
- минимальная эффективная площадь рассеяния 0,01м²;
- интеллектуальный фильтр ложных тревог.

Помимо радара предлагается камера «DV-EYE» на опорно-поворотном устройстве, которая обеспечивает обзор верхней полусферы для радара «DR-500». Данная камера объединяется с радаром в систему «Radar-IQ» [5].

Система «Radar-IQ» работает в несколько этапов [5]:

- 1) радиолокационное обнаружения цели;
- 2) видео подтверждение и сопровождение цели;
- 3) выдача пространственно-динамических характеристик цели.

Для большей наглядности элементы системы «Radar-IQ» и подфункции, которые они выполняют в рамках обнаружения, приведены на рисунке 6.



Рис. 6 – Система «Radar-IQ» и ее составляющие (с функционалом) [5]

Компания «РУБЕЖ ИНЖИНИРИНГ»

В компании «РУБЕЖ ИНЖИНИРИНГ» разработан радар «DT-RD3000», способный обнаружить БАС с ЭПР 0,01м² [6]. Данный радар приведен на рисунке 7.



Рис. 7 – Общий вид системы «DT-RD3000» [6]

Технические характеристики системы обнаружения «DT-RD3000» [6]:

- дальность обнаружения до 3000 м при ЭПР = 0,01 м²;
- частота излучения радара составляет 24 ГГц;
- радар выполняет механическое сканирование со скоростью 60°/с;
- имеет разрешение +/- 1,5м при ЭПР = 0,01 м²;
- обзор (горизонт) 0° - 360°;
- обзор (вертикаль) 14° - 90°;
- угловая точность +/- 0,7° при ЭПР = 0,01 м²;
- скорость цели от 0,2 до 20 м/с (при ЭПР = 0,01 м²);
- одновременное отслеживание 50 целей;
- габариты 740 * 600 * 600 мм;
- масса 30 кг.

Компания «Kaspersky Antidrone»

Компания «Kaspersky Antidrone» имеет несколько систем, способных обнаружить БАС. Одна из них – это Лидар, приведенный на рисунке 8.

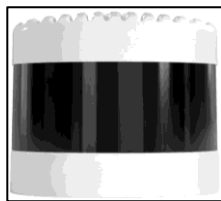


Рис. 8 – Общий вид Лидара от «Kaspersky» [7]

Лидар основывается на технологии дистанционного зондирования, которая использует лазерный луч для измерения расстояний и создания точной трехмерной картины окружающей среды [7].

Технические характеристики Лидара [7]:

- дальность обнаружения объектов до 300 м;
- угол по вертикали 40°, угол по горизонтали 360°;
- масса 1 кг.

Также у «Kaspersky» имеется специальный радар для обнаружения автономных БАС (БАС, функционирующих в режиме радиомолчания), приведенный на рисунке 9.



Рис. 9 – Общий вид радара от «Kaspersky» [7]

Технические характеристики [7]:

- дальность обнаружения до 1800 м;
- угол по вертикали 60°, угол по горизонтали 360°.

Стоит отметить, что полагание только на данные системы радиолокационного обнаружения БАС имеет недостаток, выражающийся в большом количестве ложных срабатываний. Радарные станции реагируют на птиц и другие подвижные объекты. Чтобы избежать проблем, необходима программная обработка данных, а также комплексная работа с другими устройствами, например, радиочастотными сканерами, оптикой [7].

Поэтому «Kaspersky» предлагает опорно-поворотный модуль. Данный модуль оптического обнаружения классифицирует беспилотник в любое время суток благодаря тепловизионным камерам, определяет расстояние до объекта и выполняет ведение цели [7].



Рис. 10 – Опорно-поворотный модуль обнаружения БАС [7]

Технические характеристики модуля с оптическим обнаружением [7]:

- дальность обнаружения до 800 м;
- угол по вертикали +45° до 90°;
- угол по горизонтали от 0° до 360°;
- скорость вращения 8 оборотов в минуту;
- точность 0,01°;
- масса 20 кг;
- габариты 400 * 380 * 310 мм.

Научно-исследовательский институт (НИИ) «Вектор»

Научно-исследовательский институт (НИИ) «Вектор» предлагает полуактивную радиолокационную станцию (ПАРЛС), предназначенную для определения местоположения движущихся и радиомолчащих целей. Принцип работы системы заключается в обнаружении и обработке отраженных от цели сигналов [1].



Рис. 11 – ПАРЛС от НИИ «Вектор» [1]

Основные преимущества, выделяемые разработчиком системы [1]:

- определение местоположения радиомолчащих целей;
- сектор обзора 360°;
- максимальная дальность обнаружения до 11,3 км.

Технические характеристики [1]:

- размер сектора обзора по азимуту 360°;
- размер сектора обзора по углу места не менее 60°;
- максимальное количество одновременно сопровождаемых целей 50 шт;
- рабочие частоты 470 – 790 МГц.

Компания «Umirs»

Компания Umirs предлагает систему «Радескан-Антидрон», включающую в себя как возможности РЛС, так и возможности средств радиоэлектронной борьбы. Общий вид системы приведен на рисунке 12.



Рис. 12 – Общий вид системы обнаружения от Umirs [8]

Для данной системы приводятся следующие технические характеристики [8]:

- определение автономных БАС;
- дальность обнаружения дронов типа DJI Mavic до 2000 м;
- возможность изменения сектора обнаружения от 90° до 360°;
- рабочие частоты при обнаружении 2,4 ГГц и 9,5 ГГц;
- идентификация целей и защита от ложных срабатываний на основе программного обеспечения, информации от видеокамер и участия человека-оператора при необходимости.

Рассмотренные системы являются общедоступными примерами средств обнаружения БАС, представленными в открытых источниках. Приведённой информации достаточно для аналитической оценки пределов, в которых можно обнаружить БАС.

Таким образом, можно сделать вывод, что малогабаритный БАС в идеальных условиях может быть обнаружен на расстоянии до 3000 метров. При этом все системы гарантируют обнаружение на 300 метрах. Поэтому для дальнейших исследований можно принимать дальность обнаружения БАС в интервале от 300 до 3000 метров.

Библиографический список

1. НИИ «Вектор». Противодействие БАС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nii-vektor.ru/protivodejstvie-bpla/> (дата обращения: 13.12.2024).
2. AntidroneTech. О компании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://antidronetech.ru/> (дата обращения: 13.12.2024).
3. Эльвис. О компании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elvees.ru/> (дата обращения: 13.12.2024).
4. АВРЛА. Противодействие беспилотным летательным аппаратам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://abpla.ru/> (дата обращения: 13.12.2024).
5. Radar IQ. Противодействие БАС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://radar-iq.ru/> (дата обращения: 13.12.2024).
6. РУБИН. Противодействие беспилотным летательным аппаратам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rub-in.ru/> (дата обращения: 13.12.2024).
7. Kaspersky Anti-Drone. Противодействие беспилотникам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://antidrone.kaspersky.com/ru/> (дата обращения: 13.12.2024).

УДК 621.396.67

РАЗРАБОТКА ПОЛОТНА КЛАСТЕРИЗОВАННОЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ

Г.С. Аникин, С.С. Сидоренко

Московский авиационный институт (Национальный Исследовательский университет)

В настоящее время фазированные антенные решётки (ФАР) находят широкое применение во многих областях радиоэлектроники, например, в радиолокации, навигации, дистанционном зондировании, радиоастрономии и в других областях, связанных с приёмом и передачей радиосигналов. В ходе освоения всё более высокочастотных диапазонов радиоволн появляется возможность построения антенных решёток (АР) с большим количеством элементов. С ростом характерных размеров АР удаётся добиться больших значений коэффициента усиления решётки, что, например, для радиолокации означает рост дальности действия радиолокационной системы, включающей в свой состав фазированную антенную решётку.

На текущий момент на высоком уровне разработаны методики проектирования ФАР, излучатели которых располагаются в узлах регулярной сетки эквидистантно. Эскиз конструкции полотна такой АР представлен на рис.1.

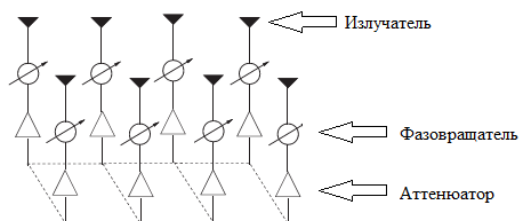


Рис. 1. Эскиз конструкции полотна АР с регулярной сеткой излучателей

В данном случае каждый элемент антенной решётки соединён с собственным приёмопередающим модулем (ППМ), в состав которого входят фазовращатель и аттенюатор, а также элементы взаимодействия с системой управления ФАР. Регулируя амплитуду и фазу сигнала в каждом элементе, достигается требуемое амплитудно-фазовое распределение (АФР), позволяющее осуществлять электронное сканирование лучом АР. Приведём основные разновидности регулярной сетки расположения излучателей на рис.2 и рис.3 [2].

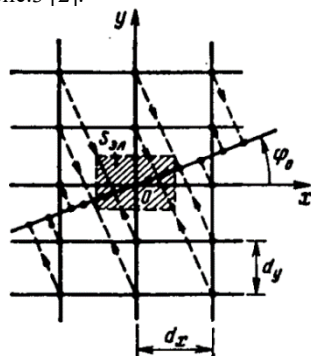


Рис.2. Прямоугольная сетка расположения излучателей и площадка, приходящаяся на один элемент решётки

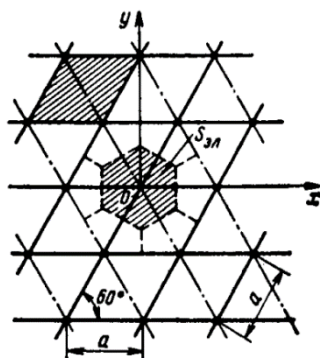


Рис.3. Треугольная сетка расположения излучателей и площадка, приходящаяся на один элемент решётки

Однако, необходимо отметить недостатки такого подхода. В первую очередь, очевидным является рост стоимости такой решётки ввиду достаточно высокой стоимости одного ППМ. Кроме того, есть и конструкторские недостатки, главный из которых – отсутствие места для системы охлаждения ФАР, что приводит к высокой степени перегрева.

Описанные проблемы побудили искать новые нетрадиционные решения. В [1] дан наиболее полный и подробный обзор существующих методов построения антенных решёток, в которых в той или иной мере решены вышеописанные трудности. Перечислим основные описанные решения: построение кластеризованных, разреженных АР, а также решёток, комплексные амплитуды возбуждения элементов которых подвержены временной импульсной модуляции.

Рассмотрим более подробно построение кластеризованных антенных решёток. Кластер (подрешётка) представляет собой совокупность элементов, расположенных в узлах сетки АР, с равноамплитудным и синфазным возбуждением. Элементы, входящие в состав подрешёток, а также геометрические центры кластеров могут располагаться в узлах регулярной и нерегулярной сетки. Стоит отметить, что снижение количества управляющих элементов, с одной стороны, приводит к решению проблем, описанных выше, возникающих при построении АР с традиционной архитектурой, с другой – ввиду снижения количества управляющих элементов ФАР и, фактически, увеличения межэлементного расстояния уменьшается сектор сканирования без появления побочного дифракционного максимума [2]. Однако, в [1], [3] сообщается, что нерегулярность расположения геометрических (фазовых) центров кластеров эквивалентна нерегулярной сетке расположения излучателей, что позволяет расширить сектор сканирования без образования побочного максимума.

Приведём основные способы построения архитектуры кластеризованных ФАР. Первый способ основан на разбиении полотна, на котором в узлах регулярной сетки расположены излучатели, на подгруппы, называемые полимино. Полимино – плоские геометрические фигуры, которые могут иметь форму букв Г, S, Т, форму вертикальных и горизонтальных линеек. Пример полотна, кластеризованного таким образом, представлен на рис. 4. Здесь в роли квадрата выступает одиночный излучатель ФАР.

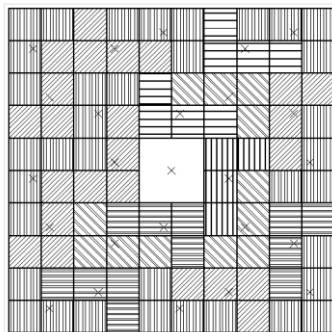


Рис.4. Пример полотна ФАР, кластеризованного методом полимино

Крестиками на этом рисунке обозначены геометрические центры подрешёток. Сектор сканирования с сохранением уровня боковых лепестков (УБЛ) не хуже -10 дБ составляет 20 градусов, что подтверждает сказанное в [2]. Объясняется это периодичностью повторения комбинаций из полимино Г-образной формы. На рис. 5 показано сечение амплитудной характеристики направленности плоскостью $\varphi = 0^\circ$.

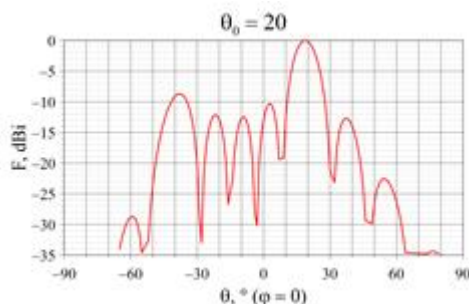


Рис.5. Сечение амплитудной характеристики направленности при сканировании на угол $\theta = 20^\circ$

Рассмотрим (рис.6) пример кластеризованного полотна ФАР, при разработке которого предпринята попытка нарушения периодичности следования геометрических центров подрешёток. В этом полотне применены кластеры двух типов: линейки излучателей и кластеры, состоящие из единственного элемента АР, для повышения плотности следования геометрических центров.

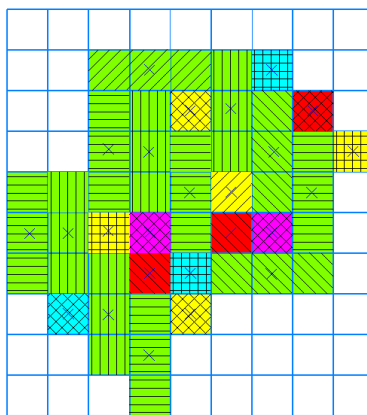


Рис.6. Пример полотна ФАР, кластеризованного методом полиомино (№2)

Сектор электронного сканирования расширился до 40° по критерию УБЛ не хуже -10 дБ. Приведём на рис.7 сечение амплитудной характеристики направленности при сканировании в плоскости $\varphi = 0^\circ$.

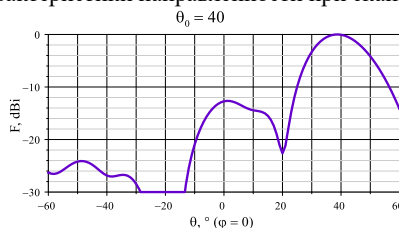


Рис.7. Сечение амплитудной характеристики направленности при сканировании на угол $\theta = 40^\circ$

Разрушение регулярности следования геометрических центров кластеров действительно приводит к расширению сектора сканирования по сравнению с кластеризованным полотном ФАР, где геометрические центры расположены с определённой периодичностью.

На рис.8 приведём пример кластеризации методом мозаики Пенроуза.

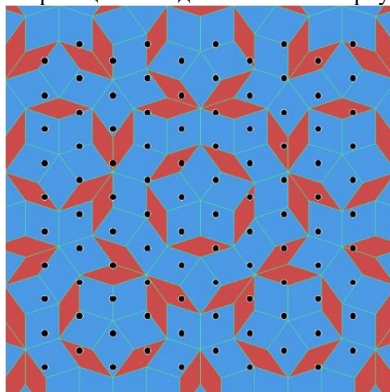


Рис.8. Пример полотна ФАР, кластеризованного методом мозаики Пенроуза

В литературе приводятся сведения о том, что при кластеризации таким методом достигается значительная степень разрушения периодичности следования геометрических центров кластеров, однако доказательство этого остаётся за рамками данной статьи.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Д.В. Багно

Библиографический список

1. Rocca P., Oliveri G., Mailloux R.J., Massa A. Unconventional phased array architectures and design methodologies – A Review // Proceedings of the IEEE. – 2016. – Vol.104, No.3. – March.
2. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. – М: Энергия, 1975. – 528 с.
3. Dicandia F.A., Genovesi S. Wide-scan and energy-saving phased arrays by exploiting Penrose tiling subarrays / IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2022. – Vol. 70, No.9. – P.6336-6344.

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДОВ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

В.К. Курбаналиев

АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

Настоящее время отличается динамичным развитием и интеграцией разнообразных средств связи, открывающих новые возможности для пользователей. Рост объема передаваемой информации требует использования всё большего числа каналов как радиосвязи, так и проводных сетей.

В условиях отсутствия полной априорной информации о параметрах принимаемого сигнала многие задачи обработки, такие как настройка основной полосы селекции приёмника, настройка демодулятора и определение параметров модуляции, требуют максимально точного знания модуляционной структуры сигнала, поступающего из эфира. Эти факторы подчеркивают необходимость интеграции в средства автоматизированного определения параметров и видов модуляции в процессы обработки.

Вид модуляции является одной из ключевых характеристик, используемых для идентификации сигнала. Наибольшее распространение в системах беспроводной связи получила цифровая модуляция, которая применяется в спутниковой связи, теле- и радиовещании, сотовой телефонии, навигационных системах и других областях.

Наиболее распространёнными видами цифровой модуляции в приложениях спутниковой связи являются фазовая манипуляция и квадратурная амплитудная модуляция (QAM) [1-3].

В данной работе рассматривается актуальная задача автоматического распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов.

В литературе представлены и проанализированы различные подходы к распознаванию модуляции, включая традиционные методы, такие как статистический анализ и циклические спектры, и современные алгоритмы, основанные на машинном обучении и нейронных сетях [4-6].

Определение априорно неизвестных модуляционных параметров для широкого класса сигналов представляет собой сложную задачу, требующую значительных вычислительных ресурсов. Это создает определенные трудности при разработке автоматизированных систем распознавания видов и параметров модуляции, способных работать в реальном времени.

Цель настоящего исследования – разработка методики автоматического распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов в условиях ограниченной априорной информации. Для решения данной задачи предлагается подход, основанный на кумулянтном анализе с использованием технологий искусственного интеллекта.

1. Постановка задачи исследования

Принятый сигнал, искаженный шумами, подвергается предварительной обработке, которая включает перенос на нулевую частоту, фильтрацию и дискретизацию сигнала. Образцы, полученные в синфазном и квадратурном каналах группируются в комплексные отсчеты r_k и описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[r_k] &= \sqrt{\frac{E_s}{2}} \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\theta) + n_i(t) \\ \operatorname{Im}[r_k] &= \sqrt{\frac{E_s}{2}} \sin(2\pi\Delta f t + \Delta\theta) + n_q(t) \end{aligned}$$

где E_s – энергия сигнала, $\Delta f = f_0 - f_r$ отстройка несущей частоты и $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_r$ отстройка начальной фазы, f_0 – несущая частота сигнала, θ_0 – начальная фаза сигнала, f_r и θ_r частота и начальная фаза сигнала гетеродина, $n_i(t)$ и $n_q(t)$ – синфазная и квадратурная составляющие аддитивного белого гауссовского шума.

Полученные комплексный и комплексно-сопряженный сигналы являются исходными данными для вычисления кумулянтных признаков. Главной причиной выбора кумулянтов в качестве информативных признаков в настоящей работе является то, что кумулянты выше второго порядка для гауссового процесса равны нулю [7-8], а шумы в сетях связи в большинстве случаев подчиняются нормальному закону распределения.

Применение кумулянтов высокого порядка в качестве признаков распознавания обусловлено следующими преимуществами:

- кумулянты высокого порядка нечувствительны к гауссовскому шуму, что позволяет определять вид модуляции даже при низком ОСШ (порядка 0 дБ);
- алгоритм вычисления кумулянтов обладает относительно низкой вычислительной сложностью, что делает его пригодным для реализации в системах реального времени и могут быть вычислены непосредственно из комплексной огибающей сигнала.

В данной работе для распознавания видов цифровой модуляции были выбраны три смешанных $C_{2,0}$, $C_{4,0}$ и $C_{6,1}$ кумулянта в качестве информативных признаков, опираясь на правила выбора кумулянтных признаков, предложенные в работе [9].

Ниже приведены формулы их вычисления:

$$\begin{aligned} C_{2,0} &= m_{2,0}, \\ C_{4,0} &= m_{4,0} - 3m_{2,0}^2, \end{aligned}$$

$$C_{6,1} = m_{6,1} - (10m_{4,1}m_{2,0} + 5m_{4,0}m_{2,1}) + 2 \cdot 15m_{2,1}m_{2,0}^2,$$

$$m_{n,r}(X) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X^{n-r}(i) \cdot X^{*r}(i).$$

где N – число отсчетов случайного процесса $X(i)$, $X^*(i)$ – комплексно-сопряженный ему, n – порядок кумулянта, r – количество сопряжений, $m_{n,r}$ – смешанный момент.

Значения кумулянтов являются комплексными числами. В условиях отсутствия синхронизации рассмотрим значения модуля кумулянтов в качестве различительных признаков.

На рис. 1 представлены сигнальные созвездия сигнала с 16-QAM принятого сигнала при отношении сигнал/шум (ОСШ) равным 20 дБ: а) при отсутствии отстроек по частоте и фазе, б) при отстройке по частоте, равной $\Delta f = 200$ кГц и в) при отстройке по фазе, равной $\Delta \theta = 30^\circ$, количество обрабатываемых отсчетов в сигнале равно 1024.

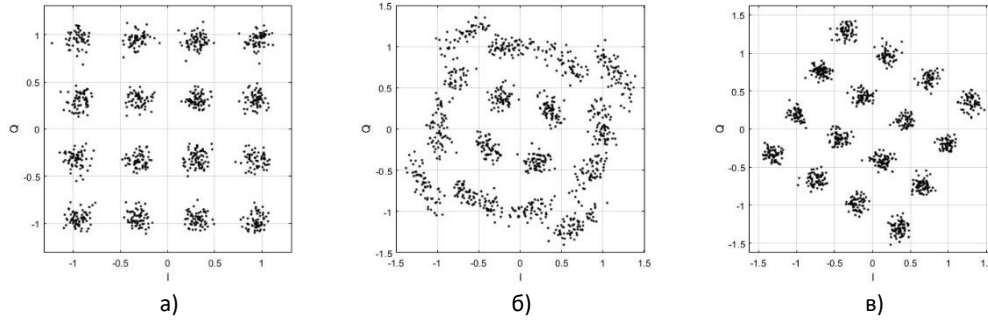


Рис. 1. Сигнальное созвездие: 16-QAM

На рис. 2 представлены различительные свойства модуля кумулянтов $C_{2,0}$, $C_{4,0}$ и $C_{6,1}$ от ОСШ для сигналов с BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-QAM и 32-QAM.

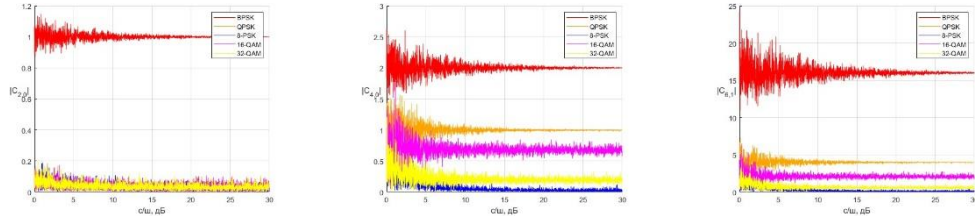


Рис. 2. Графики зависимости значений модуля кумулянтов $C_{2,0}$, $C_{4,0}$ и $C_{6,1}$ от ОСШ

Графики зависимости модуля кумулянтов от ОСШ демонстрируют их устойчивость к шуму.

На рис. 3 представлены зависимости модуля кумулянтов $C_{2,0}$, $C_{4,0}$ и $C_{6,1}$ от отстройки несущей частоты.

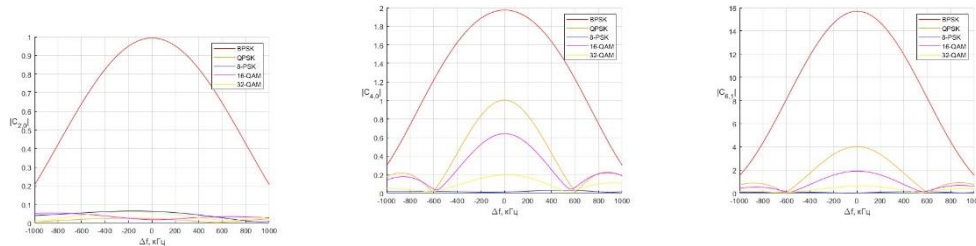


Рис. 3. Графики зависимости значений модуля кумулянтов $C_{2,0}$, $C_{4,0}$ и $C_{6,1}$ от отстройки несущей частоты

Анализ полученных значений модуля кумулянтов показывают, что информативность того или иного кумулянтного признака о виде модуляции сигнала зависит не только от ОСШ, но и от отстройки несущей частоты (Δf). Моделирование проводилось при следующих условиях: количество обрабатываемых отсчетов в сигнале равно 1024, шаг ОСШ задавался равным 0,01 в диапазоне от 0 до 30 дБ.

2. Искусственные нейронные сети

Искусственные нейронные сети (ИНС), основанные на самообучении, применяются для автоматизации процесса распознавания видов цифровой модуляции сигналов. Такие ИНС, например, многослойные перцептроны, показывают высокую эффективность при построении поверхностей разделения в многомерном случае.

Для создания базы данных для обучения и тестирования ИНС было сгенерировано 5000 сигналов с длительностью 1024 отсчетов (по 1000 сигналов для каждого вида модуляции), ОСШ задавалось случайным образом в диапазоне от 0 до 30 дБ, отстройка частоты задавалась в диапазоне от 0 до 200 кГц случайным образом. Количество нейронов в скрытом слое – 2, 5 и 10, функция активация – сигмоидальная, количество циклов обучения – 500.

3. Результаты модельного эксперимента

На этапе распознавания вида модуляции принимаемого сигнала с частотой дискретизацией F_s в полосе частот ΔF , с продолжительностью ΔT , формируется вектор признаков $C_{2,0}$, $C_{4,0}$ и $C_{6,1}$ в

соответствии с (2). Для этого из принимаемого сигнала формируются синфазные и квадратурные компоненты для вычисления кумулянтных признаков. Сформированные вектора признаков поступают на входной слой нейронной сети. Далее в скрытом и выходном слоях нейронной сети значение функции активации вычисляется для каждого нейрона по очереди на основе выходных значений и коэффициентов весового звена. Поскольку каждый нейрон в выходном слое соответствует определенному виду модуляции, то искомым вид модуляции будет определен с максимальным значением в заданном интервале. В противном случае вид модуляции считается неизвестным, требуется повторная запись и анализ.

При проведении тестирования ИНС на тестовой выборке сигналов с различными видами модуляции были получены следующие результаты, которые представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты распознавания

Вид модуляции	Вероятность распознавания, %		
	2 слоя	5 слоев	10 слоев
BPSK	100	100	100
QPSK	89,3	97,2	96,4
8-PSK	79,5	84,6	84,4
16-QAM	86,6	89,9	91,3
32-QAM	75,2	83,1	84,1

Результаты тестирования, приведённые в табл. 1 показывают, что для распознавания видов модуляции с вероятностью не ниже 75% достаточно двух слоев в ИНС. Увеличение количества слоев ИНС не приводит к пропорциональному повышению вероятности распознавания вида модуляции сигнала.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило высокую эффективность кумулянтного анализа для распознавания видов цифровой модуляции, что имеет стратегическое значение для развития систем радиомониторинга. Разработанная методика, базирующаяся на анализе статистических кумулянтов, продемонстрировала высокую точность классификации сигналов в условиях отсутствия полной априорной информации о параметрах принимаемого сигнала, а также при низком отношении сигнал/шум, при этом предъявляя минимальные требования к вычислительным ресурсам.

Экспериментальные результаты, демонстрирующие зависимость кумулянтов от уровня шума, подтверждают универсальность метода для широкого спектра модуляций, таких как QAM и PSK, а также его устойчивость к нестационарным помехам. Актуальность исследования возрастает на фоне увеличения плотности радиозфира, когда традиционные методы, основанные на спектральном анализе, утрачивают эффективность ввиду перекрытия сигналов и применения адаптивных схем кодирования в современных стандартах связи.

Дальнейшие перспективы исследования связаны с расширением перечня распознаваемых видов модуляции, включая такие технологии, как OFDM, PSK и FSK, посредством интеграции кумулянтного анализа с методами машинного обучения, в частности свёрточными нейронными сетями. Важным направлением является адаптация алгоритмов к динамически изменяющимся условиям, таким как импульсные помехи и негауссовские шумы, что позволит повысить надёжность решений в условиях помех.

Практическая значимость разработанной методики заключается в возможности идентификации источников излучения по уникальным «радиоотпечаткам», что имеет решающее значение для выявления несанкционированных источников радиоизлучений.

Научный руководитель – к.т.н., Фесенко М.В.

Библиографический список

1. Пехтеров С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190-255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255.
2. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 1-34. URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf>
3. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Inmarsat // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 64-91. URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2018-04/04-Makarenko.pdf>
4. Аджемов С.С., Кленов Н.В., Терешонок М.В., Чиров Д.С. Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. № 6. С. 19-27.
5. Аведьян ЭД, Дам В.Н. К выбору кумулянтных признаков в задаче распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов Информатизация и связь, 2015, С. 4:11-15.
6. Парамонов А. А., Нгуен В. М., Нгуен М. Т. Многозадачная нейронная сеть в задаче распознавания вида QAM- и PSK-модуляции в условиях параметрической априорной неопределенности. Russian Technological Journal. 2023. Т. 11. № 4. С. 49-58.
7. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений: пер.с англ. М.: Наука; 1966. 588 с.
8. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М.: Сов. радио, 1978. 376 с.
9. Курбанаев В.К., Фесенко М.В., Горбунов Ю.Н. Использование кумулянтного анализа для распознавания цифровых видов модуляции радиосигналов // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 5. С. 39-49. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202405-04>.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БЮДЖЕТА КАНАЛА СВЯЗИ

А.С. Долматов, А.С. Стукалова, В.Е. Алексеев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Введение

В настоящее время разработка и эксплуатация космических аппаратов (КА) для изучения Луны является актуальной задачей в связи с постоянно возрастающим интересом к исследованию спутника Земли и его ресурсов.

Так, при проведении научных исследований поверхности Луны с помощью КА, возникает необходимость в передаче накопленной научной информации с борта КА на земную станцию приема (ЗС) с целью ее дальнейшей обработки и интерпретации.

Для решения данной задачи необходимо иметь надежную систему передачи информации (СПИ), связывающую КА, функционирующий на орбите искусственного спутника Луны (ОИСЛ), с ЗС и способную обеспечить высокую скорость и точность передачи информации. Потому при проектировании подобных систем возникает необходимость в оценке энергетического бюджета канала связи между передающей и приемной аппаратами на КА и ЗС соответственно.

Цель данной работы – путем проведения расчета энергетического бюджета канала связи оценить производительность исходной СПИ, связывающей КА на ОИСЛ с ЗС.

Постановка задачи

Для проведения расчета энергетического бюджета исходной СПИ сперва стоит определиться с перечнем исходных данных. Расстояние между КА на ОИСЛ и ЗС фиксировано и составляет 384000 км. В обоих сегментах применяются параболические антенны: диаметр передающей антенны на борту КА составляет 3 м, в то время как на ЗС рассматриваются антенны с диаметрами 9, 12 и 20 м. Невозможность рассмотрения на борту КА антенн больших диаметров обусловлено конструктивными ограничениями на габариты размещаемой аппаратуры. Мощность усилителя мощности на борту КА – 100 Вт.

Службой, проводящей исследование лунной поверхности, является служба космических исследований (СКИ) [1], которой в соответствии с [1] на приоритетной основе отводится диапазон рабочих частот от 8,4 до 8,5 ГГц, относящийся к X-диапазону частот. Отсюда максимальная разрешенная полоса частот составляет 100 МГц.

Типовым значением вероятности битовой ошибки в современных СПИ является ошибка порядка 10^{-6} . Для модуляции передаваемой информации за базу взято семейство фазовых манипуляций (BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-APSK) [2]. В рамках данной работы будет рассматриваться случай передачи информации по линии «КА – ЗС».

Расчетная оценка

Тракт связи следует рассматривать, начиная с информационного источника, формирующего массив

исходных данных, который с помощью передатчика поступает на приемник через физический канал связи, проходя через все этапы кодирования и модуляции, после чего завершается на получателе информации [3].

При расчете бюджета оценка производительности работы СПИ проводится путем сравнения мощности принятого сигнала с мощностью шумов в канале, т.е. отношением сигнал/шум (signal-to-noise ratio – SNR) $P_c/P_{ш}$, которое определяет основной показатель качества работы системы – отношение энергии бита к односторонней спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 . Чем больше это отношение, тем устойчивее становится канал к воздействию помех.

Мощность принятого сигнала ЗС с учетом основных и дополнительных потерь, возникающих на трассе распространения в канале, а также энергопотенциала передающей бортовой аппаратуры описывается выражением (1):

$$P_c = \frac{P_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прм}}}{L_{\text{пр}} \cdot L_{\text{сум}}} [\text{Вт}], \quad (1)$$

где $P_{\text{прд}}$ – мощность передатчика на борту КА, Вт;

$G_{\text{прд}}$ – коэффициент усиления передающей антенны на борту КА;

$G_{\text{прм}}$ – коэффициент усиления приемной антенны на ЗС;

$L_{\text{пр}} = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot D}{\lambda}\right)^2$ – потери при распространении сигнала;

$L_{\text{сум}}$ – суммарные потери в канале.

Мощность шума в канале определяется выражением (2):

$$P_{\text{ш}} = N_0 \cdot W [\text{Вт}], \quad (2)$$

где $N_0 = k \cdot T_{\text{сум}}$ – спектральная мощность шума, Вт/Гц;
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;
 $T_{\text{сум}}$ – суммарная шумовая температура системы, К;
 W – ширина полосы частот, Гц.

Тогда для отношения сигнал/шум справедлива формула (3):

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прм}}}{L_{\text{пр}} \cdot N_0 \cdot W \cdot L_{\text{сум}}} \quad (3)$$

Поскольку в рамках поставленной задачи анализируется энергетика цифровой системы, использующей несколько способов модуляции сигнала, то вместо отношения мощности сигнала к мощности шума (обычная запись для аналоговых сигналов) используется нормированная версия SNR – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 . Энергия бита равна мощности сигнала P_c умноженной на время передачи одного бита T_b , а спектральная плотность мощности шума – это мощность шума $P_{\text{ш}}$, деленная на ширину полосы частот W . Принимая во внимание, что время передачи одного бита обратно пропорционально скорости передачи бита R_b , получается следующее тождество (4) [3]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_c \cdot T_b}{P_{\text{ш}}/W} = \frac{P_c/R_b}{P_{\text{ш}}/W} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cdot \left(\frac{W}{R}\right), \quad (4)$$

В свою очередь при замене мощности шума в тождестве (4) на спектральную мощность шума, можно получить следующее выражение (5) [3]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_c}{N_0} \cdot \left(\frac{1}{R}\right), \quad (5)$$

Входящая в выражение (5) скорость передачи информации (скорость передачи битов) рассчитывается в соответствии с формулой (6):

$$R = R_s \cdot \log_2(M) \text{ [бит/с]}, \quad (6)$$

где $R_s = 1/\tau$ – символьная скорость, обратно пропорциональная длительности передачи одного символа, бод;
 $\tau = 1/W$ – длительность передачи одного импульса, обратно пропорциональная полосе занимаемых частот, с;
 M – порядок модуляции.

В цифровых системах при использовании отношения E_b/N_0 стоит руководствоваться графиком зависимости вероятности битовой ошибки P_b от E_b/N_0 (показан на рис. 1), т.к. он является весьма важной метрикой качества системы.

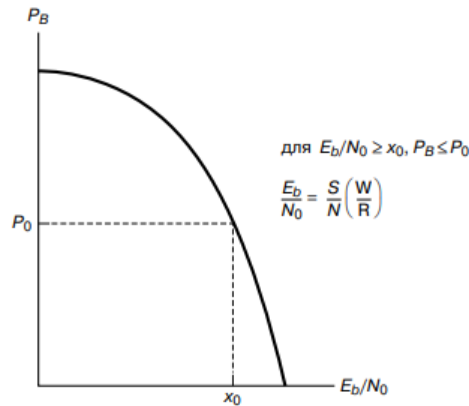


Рис. 1. Общий вид зависимости P_b от E_b/N_0

При проведении энергетического расчета в процессе создания цифровой СПИ важно оперировать двумя значениями E_b/N_0 , а именно: требуемым отношением $(E_b/N_0)_{\text{треб}}$ и принятым (или реальным) отношением $(E_b/N_0)_{\text{прин}}$ для вычисления пределов рабочего диапазона или энергетического запаса M , обеспечивающего на несколько дБ большее отношение E_b/N_0 , чем требуется, потому что на практике при создании СПИ для компенсации потерь при распространении радиосигнала такой запас необходимо иметь.

Иллюстрация, на которой обозначены две рабочие точки в связи с вводом двух отношений E_b/N_0 , приведена на рис. 2.

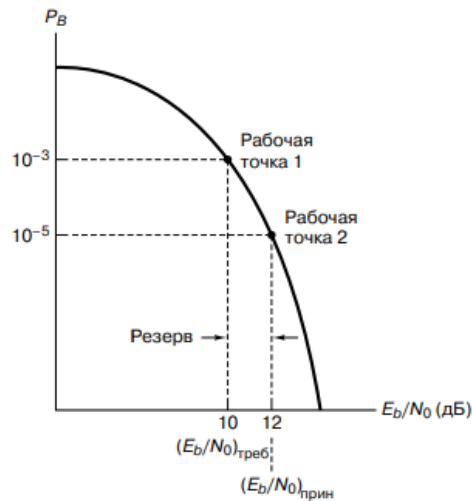


Рис. 2. Общий вид зависимости P_b от E_b/N_0

Исходя из вышеизложенного и иллюстрации, показанной на рис. 2, энергетический запас в децибелах будет рассчитываться как разность $(E_b/N_0)_{прин}$ и $(E_b/N_0)_{треб}$ (7):

$$M[\text{дБ}] = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{прин} [\text{дБ}] - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{треб} [\text{дБ}] \quad (7)$$

По данным открытых источников определить требуемое отношение $(E_b/N_0)_{треб}$ можно по уже известным графикам зависимостей P_b от E_b/N_0 для заданной достоверности.

Зависимости требуемых отношений $(E_b/N_0)_{треб}$ от вероятности битовой ошибки P_b для способов модуляции информации в поставленной задаче показаны на рис. 3.

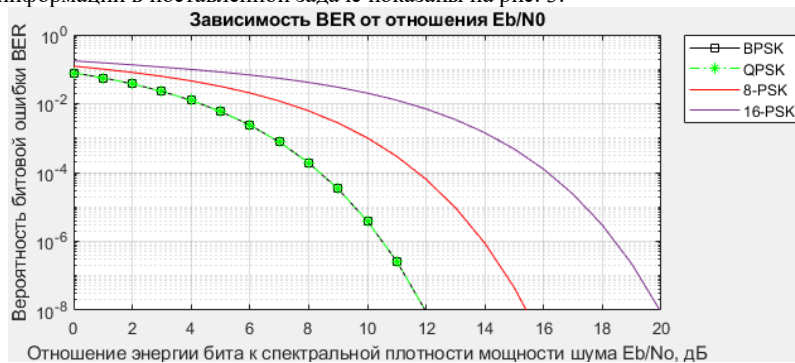


Рис. 3. Зависимость P_b от E_b/N_0 для нескольких способов модуляции

Стоит обратить внимание на то, что выражение (5) используется для расчета принимаемого отношения $(E_b/N_0)_{прин}$. Таким образом, переводя (5) и (6) в логарифмический вид и предварительно рассчитав суммарную шумовую температуру системы, суммарные потери на трассе передачи в соответствии с [4 – 8], становится возможным вычисление энергетического запаса для поставленной задачи в соответствии с формулой (7).

Анализ результатов расчетной оценки

Результаты расчета энергетического запаса для каждого способа модуляции представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета энергетического запаса

Наименование параметра	Значение		
Диаметр ЗС, м	9	12	20
Запас при использовании BPSK, дБ	– 3	– 1	3
Запас при использовании QPSK, дБ	– 6	– 4	0
Запас при использовании 8-PSK, дБ	– 12	– 9	– 5
Запас при использовании 16-PSK, дБ	– 17	– 15	– 10

Исходя из результатов, представленных в таблице 1, становится ясно, что для заданной достоверности приема при использовании всех четырех способов модуляции передаваемого сообщения

достигнуть положительного энергетического запаса в канале с применением ЗС с исходными диаметрами практически не удастся, т.к. главным условием наличия запаса в канале является положительное его значение, т.е. $M \geq 0$ дБ ($M \geq 1$). Отсюда можно сделать вывод, что на приемной стороне стоит применять антенны диаметрами более 20 м, для обеспечения положительного запаса для всех заданных способов модуляции. Об этом же говорит анализ выражений (4) и (5), т.к. невозможность увеличения полосы занимаемых частот приведет к уменьшению скорости передачи информации, и необходимости увеличивать либо геометрические размеры антенны, либо энергетические параметры передающего тракта.

Убедиться в этом можно по графику зависимости отношения $(E_b/N_0)_{\text{прин}}$ от ширины полосы частот, показанной на рис. 4 при использовании двадцатиметровой антенны.

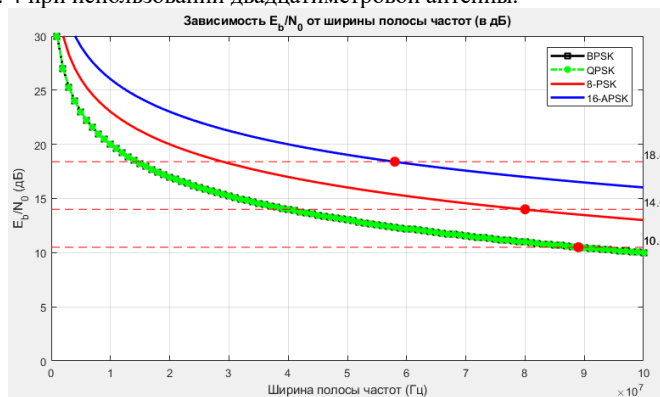


Рис. 4. Зависимость принимаемого отношения E_b/N_0 от ширины полосы частот

По данным рис. 4 можно сделать вывод о том, что при фиксированной полосе пропускания и невозможности ее увеличения приходится выбирать более низкоуровневые виды модуляции, а из таблицы 1 можно сделать вывод, что диаметр зеркала антенны для поставленной задачи не может быть меньше 18 м без увеличения мощности передатчика и чувствительности приемника.

Заключение

Проведенные расчеты показывают, что имеется два пути повышения скорости передачи данных в радиоканале:

- расширение рабочей полосы частот сигнала;
- повышение порядка модуляции сигнала.

Для демодуляции и декодирования принятого сигнала с заданной модуляцией и требуемой вероятностью битовой ошибки необходимо превышение принимаемого отношения (E_b/N_0) относительно минимально требуемого отношения (E_b/N_0) для заданных условий. Соответственно, ключевым показателем, влияющим на определение скорости в канале связи, является принимаемое отношение (E_b/N_0) , которое определяется энергопотенциалом передающего устройства, коэффициентом усиления приемной антенны и уровнем шумов приемника.

Научный руководитель – д.т.н., профессор С.Ю. Страхов

Библиографический список

1. Постановление Правительства РФ от 18.09.2019 № 1203 «Об утверждении Таблицы распределения полосы радиочастот между службами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Российской Федерации» // Правительство Российской Федерации. С.211.
2. Выбор оптимального метода модуляции сигнала в современных цифровых системах радиосвязи [Электронный ресурс] // Физический факультет Кафедра радиофизики сверхвысоких частот МГУ им. Ломоносова; URL: http://photonics.phys.msu.ru/vyibor_optimalnogo_metoda_modulyatsii_signala_v_sovremennyih_sistemah_besprovodnoy_tsifrovoy_peredachi_informatsii.pdf (дата обращения: 12.01.2025).
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.
4. Ерохин Г.А., В.И. Мандель, Ю.А. Нестеркин, А.П. Струков. Методика расчета энергетического запаса радиолинии «космический аппарат – станция» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018, том 5, выпуск 1, с.65 – 74.
5. Верещагин А.В. Радиоэлектронные системы передачи информации: сборник задач. Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2023. 101 с.
6. Рекомендация МСЭ-R P.840-6. Ослабление из-за облачности и тумана. [Электронный ресурс]: Международный союз электросвязи; URL: <https://studylib.ru/doc/2669199/rekomendaciya-mse-r-p.840-6> (дата обращения 23.01.2025).
7. Рекомендация МСЭ-R P.839-4. Модель высоты слоя дождя, используемая в методах прогнозирования. [Электронный ресурс]: Международный союз электросвязи; URL: <https://studylib.ru/doc/4406384/r-p.839-4-09-2013> (дата обращения 23.01.2025).
8. Рекомендация МСЭ-R P.372-11. Радишум. [Электронный ресурс]: Международный союз электросвязи; URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-11-201309-S!!PDF-R.pdf (дата обращения 30.01.2025).

ВЛИЯНИЕ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЕРЕДАЧУ ЭНЕРГИИ И ДАННЫХ ИНДУКТИВНЫМ СПОСОБОМ

А.Ю. Пронякина, Е.А. Миронова, В.Д. Чудинов

Московский филиал АО «НПО «Поиск»

Приведен анализ влияния корпусных элементов на эффективность передачи информации и энергии беспроводным способом при помощи катушек индуктивности. Измерены коэффициенты взаимной индукции соосных узлов катушек в отсутствие корпуса и в присутствии корпусных деталей, а также в зависимости от взаимного положения узлов катушек.

Ключевые слова: передача энергии индуктивным способом, передача информации индуктивным способом, КПД передачи энергии, скорость передачи информации.

Передача энергии неконтактным способом – это перспективное и востребованное направление исследований. Работы в этой области начались еще в конце 19 века [1]. С тех пор были достигнуты значительные результаты, среди которых летательные аппараты с дистанционным питанием [2], приборы дистанционного обнаружения электрического поля [3], радиосвязь, беспроводная передача энергии (питание ламп, мобильных телефонов, телевизоров [4]). В данной статье исследуется влияние корпусных элементов на качество передачи информации и энергии беспроводным способом при помощи катушек индуктивности.

Магнитное поле элемента с током определяется по закону Био-Савара-Лапласа (см. рисунок 1 [5]).

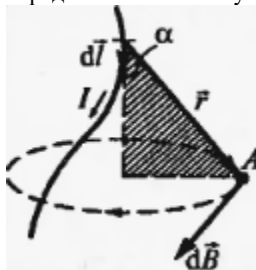


Рисунок 1 – Иллюстрация к закону Био-Савара-Лапласа

Индукция поля dB в точке A рассчитывается по формуле:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3},$$

где μ – магнитная проницаемость среды;

μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м;

I – ток, протекающий в элементе dL , А;

dL – элемент проводника с током, м;

r – радиус-вектор, проведенный из элемента dL в точку A , м.

Модуль вектора dB вычисляется:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin\alpha}{r^2},$$

где α – угол между векторами dL и r .

Полная индукция B по принципу суперпозиции [6]:

$$B = \int dB.$$

Индуктивность – коэффициент пропорциональности между током в витке и магнитным потоком через площадь сечения витка.

Рассмотрим две катушки с радиусами a_1 и a_2 , содержащие n_1 и n_2 витков соответственно. Катушки намотаны проводниками конечного радиуса и ненулевого сечения, расположены на одной оси и ориентированы параллельно, как показано на рисунке 2 [7].

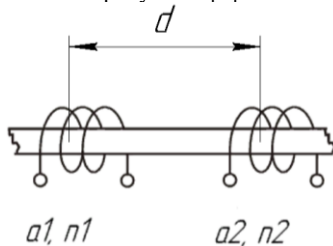


Рисунок 2 – Взаимное расположение катушек

Собственные индуктивности катушек L_1 и L_2 [6]:

$$L_1 = \frac{1}{2} n_1^2 \mu_0 \int_0^{a_1-\delta} \int_0^{2\pi} \frac{(a_1^2 - \rho a_1 \cos\varphi) d\varphi}{(\rho^2 + a_1^2 - 2\rho a_1 \cos\varphi)^{3/2}} \rho d\rho,$$

$$L_2 = \frac{1}{2} n_2^2 \mu_0 \int_0^{a_2 - \delta} \int_0^{2\pi} \frac{(a_2^2 - \rho a_2 \cos \varphi) d\varphi}{(\rho^2 + a_2^2 - 2\rho a_2 \cos \varphi)^{\frac{3}{2}}} \rho d\rho,$$

где δ – радиус сечения провода;

ρ – расстояние от оси витка до точки наблюдения;

φ – полярный угол – угол между радиус-вектором r и осью Ox .

Взаимная индуктивность катушек M_{12} определяется интегральным выражением [6]:

$$M_{12} = \frac{1}{2} n_1 n_2 \mu_0 \int_0^{a_2 - \delta} \int_0^{2\pi} \frac{(a_1^2 - \rho a_1 \cos \varphi) d\varphi}{(\rho^2 + a_1^2 + z^2 - 2\rho a_1 \cos \varphi)^{\frac{3}{2}}} \rho d\varphi.$$

Катушки разделяются на передающую (трасмиттер) и принимающую (ресивер), между которыми вводится коэффициент связи k . На стороне ресивера находится нагрузка z_L , которая может быть комплексной. Основные параметры:

- входное напряжение трасмиттера u_1 , ток i_1 ;
- напряжение ресивера u_2 , ток i_2 ;
- полные импедансы трасмиттера и ресивера z_1 и z_2 ;
- импеданс связи z_3 .

Полные сопротивления определяются выражениями [6]:

$$\begin{aligned} z_1 &= R_1 + j\omega(L_1 - M), \\ z_2 &= R_2 + j\omega(L_2 - M) + R + jX, \\ z_3 &= j\omega M, \end{aligned}$$

где R_1 – сопротивление катушки 1, Ом;

ω – частота, Гц;

L_1 – собственная индуктивность катушки 1, Гн;

R_2 – сопротивление катушки 2, Ом;

L_2 – собственная индуктивность катушки 2, Гн;

M – взаимная индуктивность катушек.

Тогда комплексная мощность s_2 , переданная на ресивер [6]:

$$s_2 = |u_1|^2 z_2 \left| \frac{z_3}{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_2 z_3} \right|^2.$$

Для увеличения мощности передачи применяются:

- увеличение числа витков;
- увеличение радиуса витков;
- повышение частоты сигнала;
- снижение расстояния между катушками;
- введение ферромагнитного сердечника.

Корпусные элементы представляются как короткозамкнутые витки, генерирующие ответные токи под воздействием основного магнитного поля. Рассматриваются катушки L_1 , L_2 , L_3 , L_4 с корпусом из алюминия. Взаимное расположение катушек и корпусных элементов показано на рисунке 3.

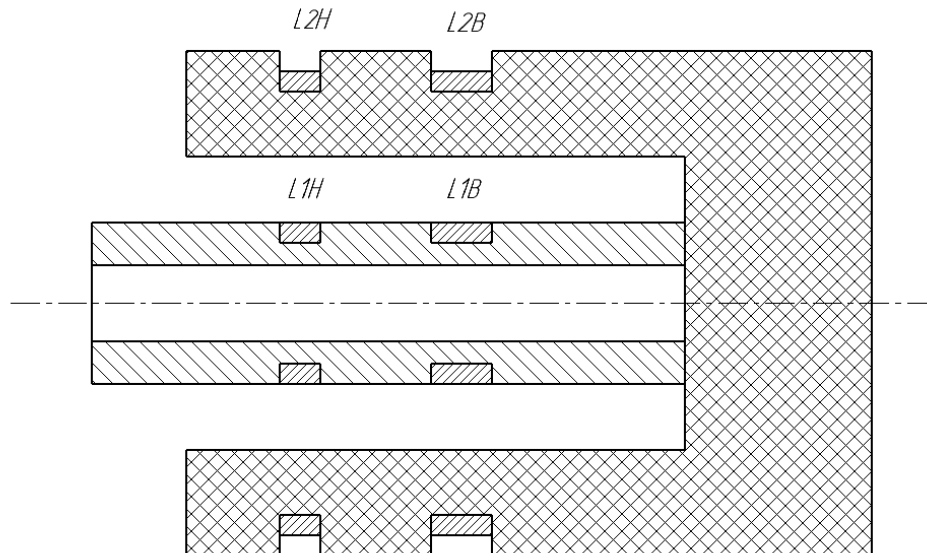


Рисунок 3 – Взаимное расположение катушек

Зависимость индуктивности от взаимного смещения катушек друг относительно друга приведена в таблице 1.

Таблица 1

Обозначение	0 мм	2 мм	4 мм	6 мм	8 мм	10 мм	По отдельности
L_{1B}	402	402	402	-	-	403	404

L_{1H}	1548	1548	1549	-	-	1546	1548
L_{2B}	557	555	554	556	565	576	687
L_{2H}	218	226	230	232	233	233	278

Продолжение таблицы 1

Обозначение	0 мм	2 мм	4 мм	6 мм	8 мм	10 мм	По отдельности
$L_{1H} (L_{1B})$	1528	-	-	-	-	1530	-
$L_{1H} (L_{2H})$	1383	1370	1390	1423	1462	1507	-
$L_{1H} (L_{2B})$	1514	1518	1529	1535	1540	1544	-
$L_{1B} (L_{1H})$	404	-	-	-	-	391	-
$L_{1B} (L_{2B})$	380	381	384	390	393	398	-
$L_{1B} (L_{2H})$	404	385	378	363	367	366	-
$L_{2B} (L_{2H})$	527	522	520	522	531	541	-
$L_{2B} (L_{1H})$	545	545	547	552	562	576	-
$L_{2B} (L_{1B})$	538	538	542	547	558	572	-
$L_{2H} (L_{2B})$	212	-	-	225	-	225	-
$L_{2H} (L_{1H})$	206	212	218	222	226	228	-
$L_{2H} (L_{1B})$	216	-	-	227	-	227	-

Запись $L_{1H} (L_{1B})$ обозначает, что измеряется индуктивность катушки L_{1H} при короткозамкнутой катушке L_{2B} .

Зависимость индуктивности L_{1H} при короткозамкнутой катушке L_{2B} от смещения приведена на рисунке 4. Зависимость индуктивности L_{2B} от смещения приведена на рисунке 5.

Зависимость индуктивности L_{1H} при короткозамкнутой индуктивности L_{2B} от смещения

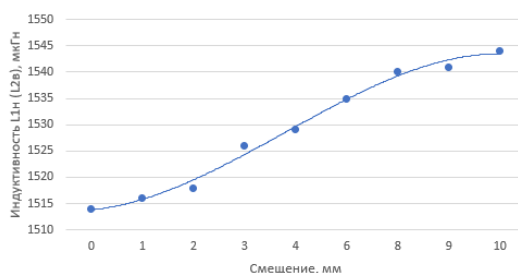


Рисунок 4 - Зависимость индуктивности L_{1H} при короткозамкнутой индуктивности L_{2B} от смещения

Зависимость индуктивности L_{2B} от смещения

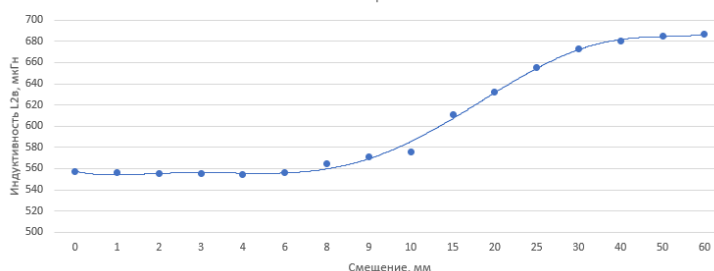


Рисунок 5 – Зависимость индуктивности L_{2B} от смещения

Таким образом, можно сделать вывод, что корпус оказывает значительное влияние (рисунок 5) на передачу энергии индуктивным способом в пределах допустимых смещений (1-4мм) катушек относительно друг друга (рисунок 4). Однако даже без замены алюминия на нержавеющую сталь, которое привело бы к уменьшению влияния корпуса на передачу энергии, влияние недостаточно для того, чтобы полностью препятствовать передаче энергии.

Научный руководитель – к.т.н. И.Н. Маниленко

Библиографический список

1. Патент США №454,622 23.06.1891 Система электрического освещения.
2. The AMA History Project: Biography of WiLLiam Likens (BiLL) Brown IV [Электронный ресурс] URL: <https://www.modeLaircraft.org/sites/default/files/BrownWiLLiamLikensBiLLIV.pdf> (дата обращения: 06.03.2025).

3. Передача электроэнергии без проводов - от начала до наших дней [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/articles/373183/> (дата обращения: 03.03.2025).
4. Патент Корея WO/2019/039684 дата публикации: 28.02.2019.
5. Перышкин А.В. Физика / А.В. Перышкин, Е.М. Гутник – Москва: Дрофа 2014 – 319 с.
6. Беспроводная передача энергии через магнитно-связанные индуктивные катушки [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/articles/407819/> (дата обращения: 28.02.2025).
7. Электрические цепи с магнитно-связанными элементами [Электронный ресурс] URL: <https://studfile.net/preview/10044686/page:2/> (дата обращения: 06.03.2025).

УДК 621.396.67

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ФОРМЫ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

В.С. Споданейко, М.А. Крылова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Введение

В настоящее время активно развиваются технологии, связанные с системами передачи данных и связи, что требует создания эффективных решений для использования в сложных условиях, таких как космическое пространство. Особое внимание уделяется антенным системам, для которых необходимо обеспечивать достаточно высокую надежность и точность работы. Одним из ключевых направлений исследований в данной области является разработка трансформируемых антенн, способных работать в условиях ограничений по массе и объему.

Трансформируемые антенны находят широкое применение в космической индустрии благодаря своей компактности, легкости и возможности разворачивания на орбите. Однако при эксплуатации таких систем возникают проблемы, связанные с деформациями конструкции, которые могут влиять на характеристики диаграммы направленности антенны. Эти искажения могут привести к снижению коэффициента усиления, увеличению уровня боковых лепестков и другим негативным последствиям, вплоть до полной потери работоспособности системы.

Целью настоящей работы является разработка облика антенны космического базирования для решения задач связи и исследование влияния различных искажений формы антенны на ее характеристики, включая коэффициент усиления и направленность излучения. Исследования проводились с помощью компьютерного моделирования в специализированной программной среде (системе электромагнитного анализа).

Описание конструкции трансформируемой антенны космического базирования

Существует несколько типов трансформируемых антенн, различающихся по способу раскрытия рефлектора: зонтичные, ободные, надувные, ферменные. Каркас трансформируемого рефлектора представляют радиальные ребра жесткости или телескопические (вложенные друг в друга) трубчатые спицы, которые крепятся к жесткой центральной части. На них располагается отражающая поверхность, образованная упругой оболочкой из радиоотражающего металлического сетеполотна. На практике наиболее распространенными являются зонтичные рефлекторы, он и был рассмотрен в работе. Конструкция рефлектора зонтичного типа представлена на рисунке 1.

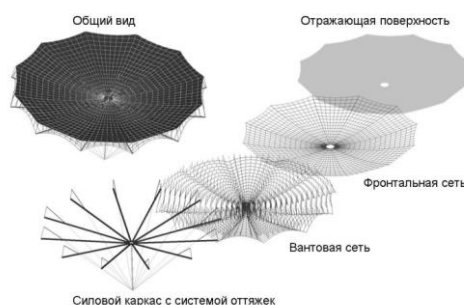


Рисунок 1 – Конструкция зонтичного рефлектора

Зонтичная конструкция рефлектора подразумевает наличие жестких спиц, формирующих силовой каркас. В конструкцию силового каркаса входят:

- система тросовых оттяжек;
- вантовая сеть;
- фронтальная сеть;
- отражающая поверхность.

Трикотажное сетеполотно формирует отражающую поверхность рефлектора. Оно выполнено из тонкой металлической проволоки, а размер ячеек сетеполотна зависит от толщины проволоки, типа плетения и частоты. Максимальный коэффициент отражения зеркальной поверхности достигается при оптимальном натяжении сетеполотна. Недостаточное натяжение снижает коэффициент отражения из-за увеличения контактного сопротивления, тогда как избыточное натяжение приводит к деформации ячеек. Также натяжение сетеполотна определяет его способность противостоять механическим нагрузкам.

Фронтальная сеть обеспечивает натяжение и служит силовым каркасом для сетеполотна. Она выполнена из шнуров с высокой упругостью. Вантовая система формирует параболическую форму отражающей поверхности. Концы вант присоединяются к узлам фронтальной сети, а их натяжение регулируется, обеспечивая правильную геометрию рефлектора.

Силовой каркас принимает основные нагрузки, возникающие в процессе работы вантовой системы и натяжения сетеполотна. Чаще всего он изготавливается из углепластиковых трубчатых элементов и включает мачту, корневые и откидные спицы, соединённые шарнирами. Для регулировки формы поверхности используется изменение натяжения тросовых оттяжек [1].

Для обеспечения равномерного натяжения сетеполотна и механической устойчивости конструкции было выбрано использование 12 спиц. Это количество позволяет достичь баланса между компактностью антенны в сложенном состоянии и её надёжностью в раскрытом положении.

В качестве материала для отражающей поверхности выбрано молибденовое сетеполотно. Этот материал обладает высокой прочностью, низким коэффициентом теплового расширения и устойчивостью к механическим нагрузкам. Оптимальное натяжение сетеполотна минимизирует деформации и обеспечивает эффективное отражение радиоволн.

Для зонтичного рефлектора, предназначенного для задач связи, ключевым критерием выбора облучателя является его способность обеспечивать равномерное облучение параболической поверхности, что необходимо для формирования направленной диаграммы с минимальными потерями энергии. На основании этих требований в качестве базового варианта выбран конический рупор. Благодаря своей геометрии, конический рупор создаёт равномерное распределение амплитуды поля в раскрытом рефлекторе. Это позволяет минимизировать боковые лепестки и сосредоточить энергию в главном лепестке диаграммы направленности (ДН). Кроме того, конический рупор способен обеспечивать круговую поляризацию, что делает его особенно эффективным для спутниковой связи, где важно минимизировать затухание сигнала и обеспечить его устойчивость.

Для осуществления связи антенна-спутник/спутник-наземная антенна трансформируемая антенна должна обладать следующими характеристиками:

- коэффициент усиления – не менее 24,8 дБ (300 раз);
- ширина ДН – не более 7°;
- уровень боковых лепестков – не менее минус 20 дБ;
- поляризация – круговая.

Проблемы, влияющие на форму трансформируемой антенны

Одной из основных проблем, которые могут возникнуть при использовании трансформируемой антенны космического базирования, является изменение ее формы.

1) Возникновение радиальной складки.

Радиальная складка представляет собой линейную деформацию, идущую от центра рефлектора к его периферии. Такие складки могут возникать по различным причинам, включая механические воздействия, неравномерные нагрузки на конструкцию и температурные перепады, которые особенно актуальны в условиях космоса. Внешние факторы, такие как солнечное излучение или тень Земли, могут создавать значительные температурные градиенты на поверхности антенны. Это приводит к неравномерному расширению или сжатию материалов, что, в свою очередь, вызывает появление складок. Такие деформации способны нарушать симметрию рефлектора, что может привести к изменению характеристик антенны. Особенно это важно для антенн, работающих в системах передачи данных, где точность направленности играет критическую роль.

2) Нераскрытие штанги.

Полное или частичное нераскрытие одной из опорных штанг представляет собой потенциальную проблему для развёртываемых антенн в космических условиях. Подобные ситуации могут возникать из-за конструктивных недостатков, ошибок при сборке или влияния внешних факторов, таких как столкновение с космическим мусором или воздействие вибрационных нагрузок при запуске. Нераскрытие штанги приводит к нарушению симметрии конструкции, что неизбежно влияет на натяжение сетеполотна рефлектора. В результате изменяется его геометрия, что может вызвать искажения в распределении энергии в диаграмме направленности. Эти искажения могут ухудшать направленность сигнала, увеличивать уровень нежелательного бокового или обратного излучения и снижать общую эффективность антенны.

3) Возникновение отверстия.

Повреждения в виде отверстий в рефлекторе антенны могут возникать вследствие столкновения с космическим мусором, который представляет постоянную угрозу для аппаратов на орбите. Величина и расположение отверстия могут варьироваться, от небольших дефектов до значительных повреждений. Такие дефекты нарушают целостность поверхности рефлектора, что приводит к перераспределению отраженной энергии. Часть сигнала может проходить через отверстие или рассеиваться в ненужных направлениях, что изменяет направленность диаграммы излучения. В сложных условиях эксплуатации такие повреждения могут оказать значительное влияние на стабильность передачи и приема сигналов.

4) Возникновение точечной складки.

Точечная складка – это локальная деформация, которая обычно имеет небольшие размеры, но может оказывать заметное влияние на характеристики антенны. Такие складки могут образовываться из-за локальных напряжений в конструкции, внешних механических повреждений или воздействия температурных перепадов. Несмотря на кажущуюся незначительность, точечные складки способны создавать локальные искажения в геометрии рефлектора, которые могут приводить к рассеиванию части энергии в нежелательных направлениях. Это особенно критично для антенн, использующихся в условиях, где требуется высокая точность направленности, например, в спутниковых системах связи или радиолокации.

Компьютерное моделирование антенны без искажения формы отражающей поверхности

Для моделирования был выбран S диапазон излучения (2-4 ГГц) [2]. Частота излучения 3,4 ГГц, длина волны при этом примерно равна 8,82 см.

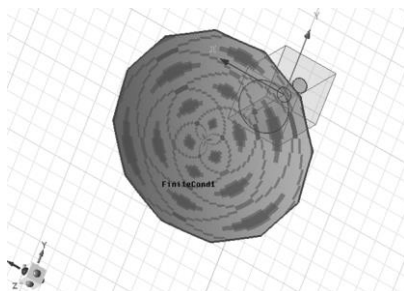


Рисунок 2 – 3D модель отражающей поверхности и облучателя в виде конического рупора

При моделировании были достигнуты следующие характеристики:

- ширина главного лепестка на уровне минус 3 дБ: $6,65^\circ$;
- направление максимума диаграммы направленности: минус 180° ;
- коэффициент усиления: 27,19 дБ;
- уровень боковых лепестков: минус 16,98 дБ и 16,62 дБ;
- рабочая частота: 3,4 ГГц.

На рисунке 3 представлены ДН моделируемой антенны без искажений отражающей поверхности в логарифмическом масштабе в декартовой и полярной системе координат, а также трехмерная ДН.

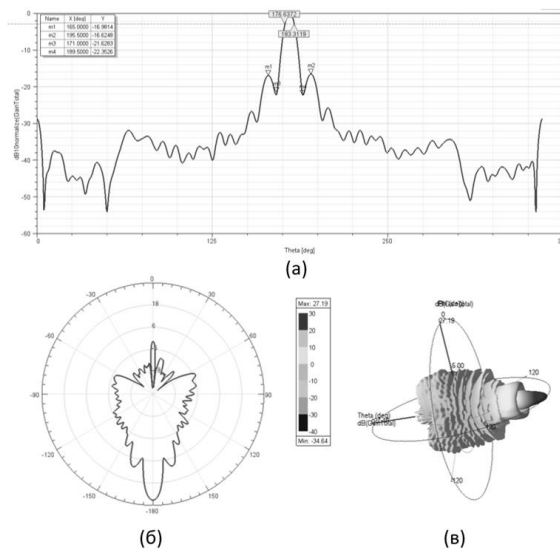


Рисунок 3 – Диаграммы направленности антенны в логарифмическом масштабе в декартовой системе координат (а), полярной системе координат (б), трёхмерном представлении (в)

Компьютерное моделирование антенны с искажением формы отражающей поверхности

Первой рассмотренной нештатной ситуацией является радиальная складка. В рамках моделирования были симитированы складки шириной: 0,02 м (рисунок 4), 0,03 м и 0,04 м, которые смещались относительно центра рефлектора к краю

Рассматривались следующие характеристики антенны (рисунок 5):

КУ – максимум коэффициента усиления;

УБЛ – уровень боковых лепестков (УБЛ 1 – слева от главного лепестка, УБЛ 2 – справа от главного лепестка);

ШГЛ₀₅ – ширина главного лепестка по уровню минус 3 дБ;

ШГЛ₀ – ширина главного лепестка по нулевому излучению. КОИ – коэффициент обратного излучения.

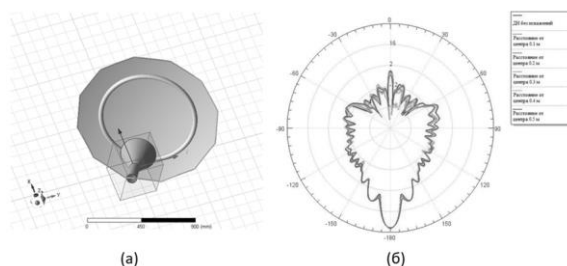


Рисунок 4 – Модель антенны с радиальной складкой 0,02 м (а) и ДН антенны в логарифмическом масштабе при перемещении радиальной складки (б)

Расстояние от центра, м	КУ, дБ	Направление максимума, °	УБЛ 1, дБ	УБЛ 2, дБ	ШГЛ ₀₅ , °	ШГЛ ₀ , °
Значения характеристик без воздействий	27,19	-180	-16,98	-16,62	6,65	19
0,1	27,11	-180	-16,68	-16,50	6,83	19
0,2	27,05	-180	-16,62	-16,62	6,99	19
0,3	26,98	-180	-16,66	-16,47	7,05	20
0,4	27,01	-180	-16,53	-16,45	7,03	20
0,5	26,99	-180	-16,51	-16,53	7,1	20

Рисунок 5 – Результаты изменения характеристик антенны при перемещении радиальной складки размером 0,02 м

Из результата анализа характеристик антенны можно сделать вывод, что форма ДН изменяется незначительно. Таким образом, возникновение радиальной складки на рефлекторе оказывает минимальное влияние на характеристики антенны, при этом увеличение её размеров не вызывает существенных изменений.

Следующей исследуемой нештатной ситуацией в космическом пространстве является частичное нераскрытие одной из опорных штанг.

Было произведено моделирование, в котором смещалось положение опорной штанги относительно нормального состояния с шагом 0,1 м (рисунок 6 и 7).

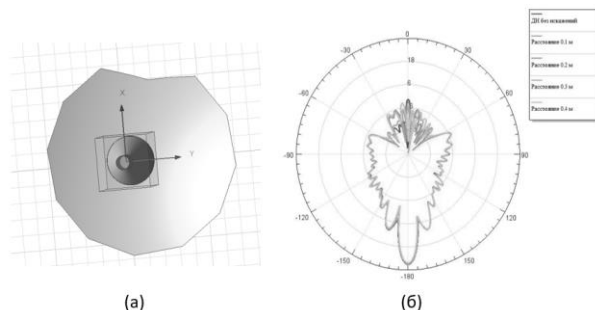


Рисунок 6 – Модель антенны с частично нераскрытой опорной штангой (а) и ДН антенны в логарифмическом масштабе при изменении положения опорной штанги относительно нормального состояния (б)

Расстояние до нормального состояния, м	КУ, дБ	Направление максимума, °	УБЛ 1, дБ	УБЛ 2, дБ	ШГЛ ₀₅ , °	ШГЛ ₀ , °
Значения характеристик без воздействий	27,19	-180	-16,98	-16,62	6,65	19
0,1	26,96	-180	-16,53	-16,66	6,62	19
0,2	26,71	-180	-16,42	-16,58	6,53	18,5
0,3	26,63	-180	-16,23	-16,61	6,51	18,5
0,4	26,42	-180	-16,14	-16,75	6,46	18

Рисунок 7 – Результаты изменения характеристик антенны при частичном нераскрытии одной из опорных штанг

Нераскрытие штанги оказывает более сильное влияние на характеристики антенны по сравнению с радиальной складкой.

Ещё одна рассматриваемая нештатная ситуация – возникновение отверстия в рефлекторе антенны. По аналогии с радиальной складкой были смоделированы отверстия различных диаметров, которые смещались от центра рефлектора к краю (рисунок 8 и 9).

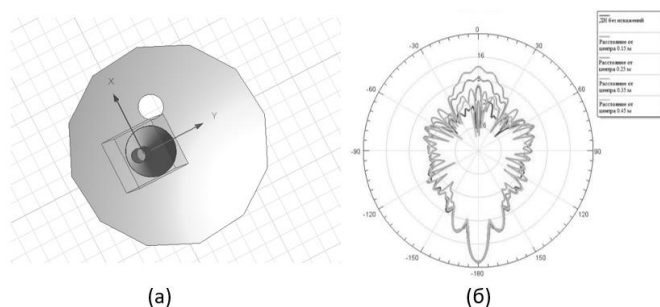


Рисунок 8 – Модель антенны с отверстием диаметром 0,2 м (а), ДН антенны в логарифмическом масштабе при перемещении отверстия (б)

Расстояние от центра, м	КУ, дБ	Направление максимума, °	УБЛ 1, дБ	УБЛ 2, дБ	ШГЛ ₀₅ , °	ШГЛ ₀ , °
Значения характеристик без воздействий	27,19	-180	-16,98	-16,62	6,65	19
0,15	26,51	-180	-17,35	-17,08	6,22	16
0,25	26,38	-180	-16,13	-15,77	6,52	17,5
0,35	26,92	-180	-17,59	-17,17	6,59	18,5
0,45	26,99	-180	-17,22	-16,78	6,58	19

Рисунок 9 – Результаты изменения характеристик антенны при перемещении отверстия диаметром 0,2 м

Возникновение отверстия значительно влияет на характеристики антенны, сильнее, чем радиальная складка и нераскрытие штанги. Увеличение диаметра отверстия приводит к значительным изменениям характеристик антенны. Наибольшее воздействие наблюдается при расположении отверстия на расстоянии 0,15 м от центра рефлектора.

Следующей анализируемой деформацией была точечная складка.

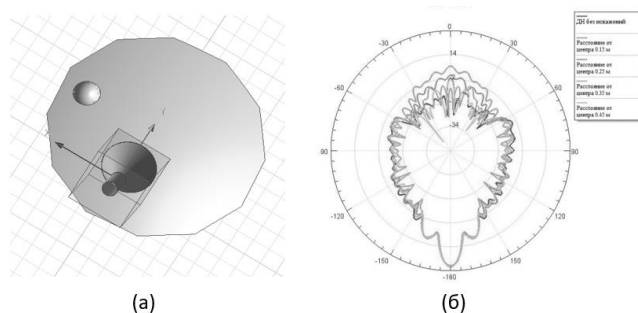


Рисунок 10 – Модель антенны с точечной складкой диаметром 0,15 м (а), ДН антенны в логарифмическом масштабе при перемещении точечной складки

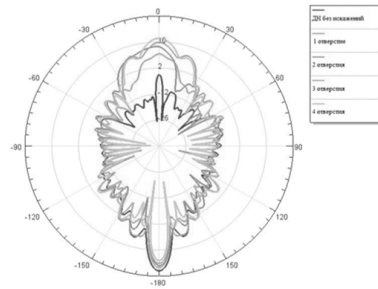
Расстояние от центра, м	КУ, дБ	Направление максимума, °	УБЛ 1, дБ	УБЛ 2, дБ	ШГЛ ₀₅ , °	ШГЛ ₀ , °
Значения характеристик без воздействий	27,19	-180	-16,98	-16,62	6,65	19
0,15	26,70	-180	-17,16	-17,05	6,52	18
0,25	26,59	-180	-16,08	-16,15	6,78	18
0,35	26,95	-180	-16,77	-16,74	6,90	19
0,45	26,95	-180	-16,69	-16,68	6,82	19

Рисунок 11 – Результаты изменения характеристик антенны при перемещении точечной складки

Точечная складка оказывает более сильное влияние на характеристики антенны, чем ранее рассмотренные дефекты. Как и в случае с отверстием – с увеличением диаметра складки изменения в характеристиках антенны становятся более значительными и максимальное воздействие наблюдается при расположении складки на расстоянии 0,15 м от центра рефлектора.

Также было проведено моделирование множественных отверстий диаметром 0,3 м в рефлекторе антенны (рисунок 12). С увеличением количества отверстий изменения становятся критическими, а при наличии четырёх отверстий антенна теряет работоспособность (что будет доказано далее).

Количество отверстий	КУ, дБ	Направление максимума, °	УБЛ 1, дБ	УБЛ 2, дБ	ШГЛ ₀ , °	ШГЛ ₀ , °
Значения характеристик без воздействий	27,19	-180	-16,98	-16,62	6,65	19
1	25,49	-180	-16,04	-15,52	6,15	15
2	24,30	-180	-19,34	-17,72	6,24	25
3	23,17	-180	-21,94	-22,24	6,20	19
4	21,64	-180	-17,76	-17,81	5,62	14



(а)

(б)

Рисунок 12 – Результаты изменения характеристик антенны при имитации нескольких отверстий (а) и ДН антенны в логарифмическом масштабе (б)

Для проверки возможности обеспечения связи наземная антенна-спутник/спутник-наземная антенна был проведен расчет канала связи по методике, описанной в [3].

В таблице 1 представлен расчет бюджета канала связи в децибелах для антенны без искажений сетеполотна.

Таблица 1 – Расчет бюджета радиолинии (оценка энергетического резерва) для антенны без искажения формы отражающей поверхности

№	Параметр	Значение	Значение, дБ	Знак
1	Переданная мощность (дБВт)	20 Вт	13,01 дБ	$P_{\text{пер}}$
2	Потери в передатчике (дБ)		< 2 >	$L_{\text{пр}}$
3	КНД передающей антенны (максимум дБ)		27,19	$G_{\text{пер}}$
4	EIRP терминала (дБВт)		38,2	EIRP
5	Потери в тракте (дБ)		<171,283>	L_s
6	Атмосферные потери (дБ)		<6,543>	L_{add}
7	Принятая изотропная мощность (дБВт)		-139,626	$P_{\text{пр,из}}$
8	КНД принимающей антенны (максимум дБ)		27	$G_{\text{пр}}$
9	Мощность принятого сигнала (дБВт)		-112,626	$P_{\text{пр}}$
	Шум-фактор приемника в порту антенны (дБ)		11,5	F
	Температура приемника (дБК)	3806 К	35,8	T_R
	Температура принимающей антенны (дБК)	301,99 К	24,8	T_a
10	Температура системы (дБК)	4108 К	36,137	T_s
11	$G_{\text{пр}}/T^0$ системы (дБК)	0,121		Q
12	Постоянная Больцмана (дБВт/КГц)		-228,6	$k_{\text{дБ}}$
13	Спектральная плотность шума (дБВт/Гц)		<-192,463>	N_0
14	Принятое $P_{\text{пер}}/N_0$ (дБГц)		79,837	$P_{\text{пер}}/N_0$
15	Скорость передачи данных (дБбит/с)	2 Мбит/с	< 63,01 >	$U_{\text{дБ}}$
16	Принятое E_b/N_0 (дБ)		16,827	E_b/N_0
17	Потери реализации (дБ)		< 1,5 >	$L_{\text{пр}}$
18	Требуемое E_b/N_0 (дБ)		< 10 >	$(E_b/N_0)_{\text{треб}}$
19	Резерв (дБ)		5,327	$P_c/P_{\text{ш}}$

Бюджета канала состоит из трех столбцов чисел. Бюджетом канала является средний из них. Другие состоят из вспомогательной информации или включают вычисления, дополняющие основную таблицу. Если значение не заключено в скобки – оно представляет усиление. Начиная с вершины среднего столбца алгебраически суммируются все ослабления и усиления.

Окончательный энергетический резерв линии связи заключен в прямоугольник и приведен в пункте под номером 19 таблицы 1. Т.к. итоговый результат положителен, рассматриваемая антенная система способна обеспечить связь наземная антенна-спутник/спутник-наземная антенна.

На основании результатов компьютерного моделирования установлено, что наиболее критичными нештатными ситуациями являются возникновение точечной складки и появление множественных отверстий. Для оценки их влияния был произведен расчет бюджета радиолинии с параметрами, полученными при моделировании (таблица 2).

Таблица 2 – Результат расчета бюджета канала связи

Случай	Параметр	Значение	Знак
Без искажений	Резерв (дБ)	5,327	$P_c/P_{\text{ш}}$
Возникновение точечной складки в отражающей поверхности рефлектора	Резерв (дБ)	4,398	$P_c/P_{\text{ш}}$
Возникновение множественных отверстий в отражающей поверхности рефлектора	Резерв (дБ)	-0,507	$P_c/P_{\text{ш}}$

Исходя из результатов (таблица 2) можно сделать вывод, что при возникновении четырех отверстий в отражающей поверхности рефлектора система будет не способна обеспечить связь.

Выводы

Полученные результаты показали, что в большинстве случаев изменения характеристик антенны, вызванные деформацией сетеполотна, позволяют сохранить работоспособность канала связи. Однако были выявлены условия, такие как точечная складка и отверстие в сетеполотне, при которых искажения формы антенны могут существенно повлиять на коэффициент усиления, уровень боковых лепестков и другие ключевые параметры диаграммы направленности. При этом возникновение четырёх отверстий в рефлекторе приводит к полной неработоспособности антенны.

Библиографический список

1. Федоров, А. Ю. Обзор конструкции трансформируемого зонтичного рефлектора и основных неполадок, возникающих в процессе эксплуатации / А. Ю. Федоров // Студенческий. – 2022. – № 22-5(192). – С. 7-10. – EDN SBEDNW.
2. Постановление правительства РФ от 18 сентября 2019 г. №1203-47 «Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Российской Федерации». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201909250014/> (дата обращения: 06.02.2024).
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. Пер. с англ. — М. : Вильямс, 2017. — 1100 с. — ISBN 978-5-8459-2071-3.

УДК 62-23

МАТЕРИАЛЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ

В.М. Карнацкий, А. В. Круглов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Эффект памяти формы (ЭПФ) – это явление возвращения металла материала к первоначальной форме, после предварительной деформации, при нагреве. Этот эффект обусловлен термоупругостью мартенситных пластин, в которых во время деформации возникают внутренние напряжения. При нагреве происходит восстановление исходного состояния благодаря превращению аустенита в мартенсит при нагреве и последующее возвращение в аустенитовую фазу. Подобное явление обнаружено у некоторых чистых металлов как цирконий, кобальт, титан и у более чем у 20 сплавов, абсолютным лидером из которых является никелид титана, известный также как нитинол. Такой принцип используется в ряде отраслей, однако требует существенных исследований и доработок. Цель работы заключается в исследованиях возможностей применения ЭПФ в робототехнике, мехатронике и автоматизации процессов в различных областях, таких как производство, медицина и космическая индустрия. Актуальность проблемы обусловлена необходимостью внедрения новых приводов в робототехнике.

На сегодняшний день самым изученным сплавом среди обладающих эффектом памяти формы является нитинол, наибольшее распространение получивший в термочувствительных элементах, однако его иногда применяют и как исполнительный механизм за счет его высокой прочности, высокой демпфирующей способности и хорошей биологической совместимости, что обуславливает его незаменимость в медицинских технологиях.

Первые исследования в области эффекта памяти формы были получены в 1930-х годах для сплава кадмий-золото ученым Арне Оландером, который ввел для таких материалов термин «каучукоподобного» поведения, далее те же признаки все чаще обнаруживались у других сплавов. Так в 1948 году в Советском Союзе этот эффект получил название «эффект Курдюмова», и к 1950-м был получен первый двигатель на основе сплава кадмий-золото – двигатель Джонсона, который превращал тепловую энергию в механическую (рис 1), а открытый спустя 10 лет интерметаллид никеля и титана, благодаря дешевизне материалов позволил сделать исследования в этой области более практически применимыми.

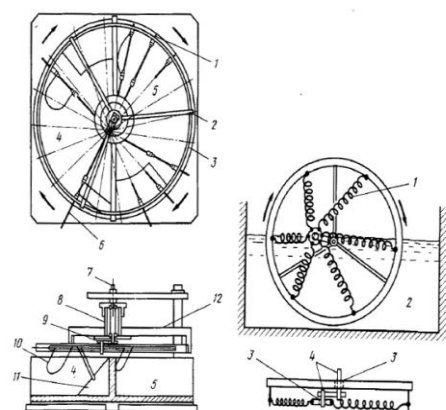


Рис. Двигатель Бенкса с кривошипно-шатунным механизмом:
1 – положение наибольшего выпрямления стержня; 2 – опора оси; 3 – приводной шкив; 4 – холодная вода; 5 – горячая вода; 6 – положение наибольшего изгиба стержня; 7 – фиксированная ось; 8 – выходной вал; 9 – фиксированный вал; 10 – стержень из сплава Ti – Ni; 11 – поднимающаяся пластина; 12 – опора вала приводного шкива

Рис. Двигатель Гинеля с кривошипно-шатунным механизмом:
1 – спираль из сплава Ti – Ni; 2 – горячая вода; 3 – подшипник; 4 – фиксированные оси

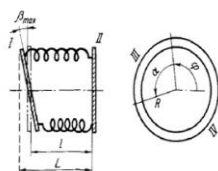


Рис. Принципиальная схема двигателя с наклонной пластиной:
I – диск 1; II – диск 2; III – интервал нагрева; IV – интервал охлаждения

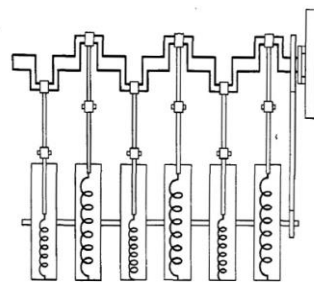


Рис. Двигатель с кривошипно-шатунным механизмом и возвратно-поступательным движением

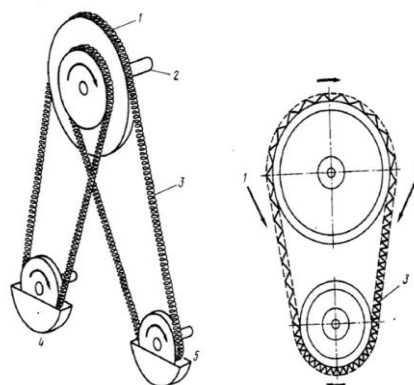


Рис. Турбинный двигатель Джонсона:
1 – дифференциальный шкив; 2 – выходной вал; 3 – непрерывная петля из спирали Ti – Ni; 4 – резервуар с холодной водой; 5 – резервуар с горячей водой

Рис. Турбинный двигатель Хомма:
1 – холодная вода; 2 – горячая вода; 3 – спираль из сплава Ti – Ni

Рисунок 1 - Приводы созданные на основе эффекта памяти формы

Исследования в области применения свойств эффекта памяти формы продолжают и по сей день, на данный момент существует множество приводов, которые в основе своего принципа действия используют нитинол и подобные ему материалы. Мы остановимся на модульных механических устройствах способных генерировать линейное и угловое перемещение и усилие, таким образом исследование фокусируется на модульных элементах, а не новых решениях или предложениях по использованию этого метода.

В робототехнике мини-актуаторы на основе ЭПФ могли бы сыграть значительную роль, благодаря их мощности при малых габаритах. Эти приводы способны обеспечивать линейное или угловое перемещение с высокой точностью и силой.

Одним из таких актуаторов является линейный привод (рис.2), использующий нитиноловую проволоку длиной 1000 мм и диаметром 0,2 мм, намотанную на пару комплектов из семи шкивов с пружиной, закрепленной на одном конце проволоки. Когда приложенная нагрузка превышает максимальное усилие пружины, происходит размыкание цепи с нитинолом и проволока сжимается. В двух режимах работы привод способен достигать усилия в 56 Н при перемещении в 2,2 мм и 30 мм при усилии 4 Н, что для привода размером 75×20×20 мм является хорошей характеристикой.

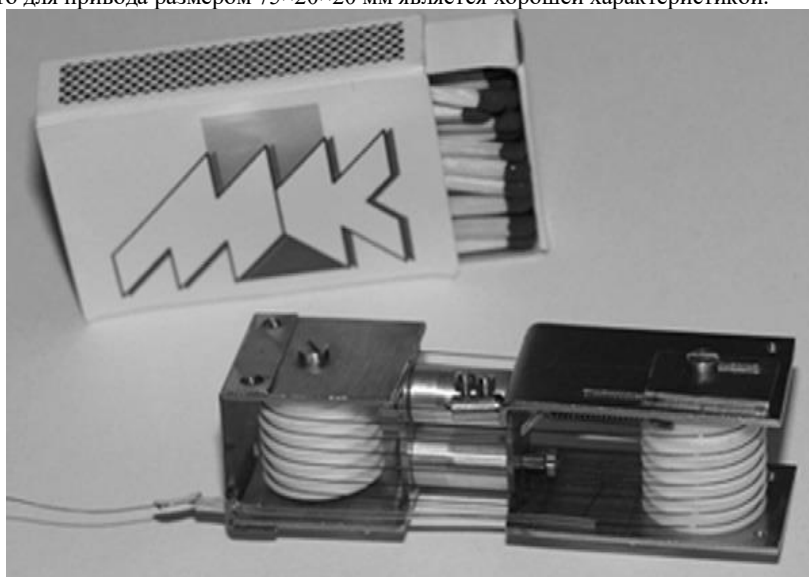


Рисунок 2 – Линейный модуль компании Jansen et al

Для приведения в действие гидравлического клапана компанией Strittmatter и Gümpel был предложен линейный привод на основе памяти формы (рис 5), при подаче электрического тока проволока сжимается, смещая съемный фланец, снабженный валом, передавая движение за пределы закрывающего винта, а после прекращения подачи энергии пружина оттягивает вал назад в исходное положение. Приводы обеспечивают ход 0,8 мм при усилии 98 Н, задержка при срабатывании установлена в 0,4 с, испытания проводились при давлении 200 бар и температуре 24°C

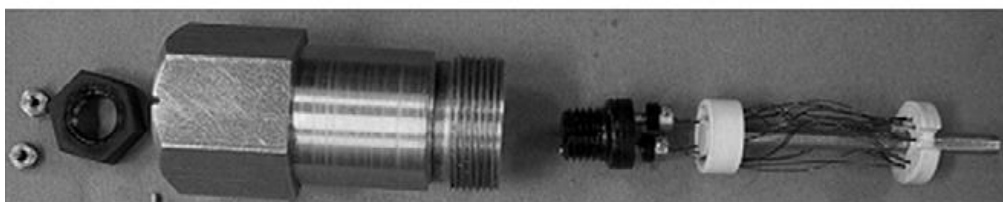
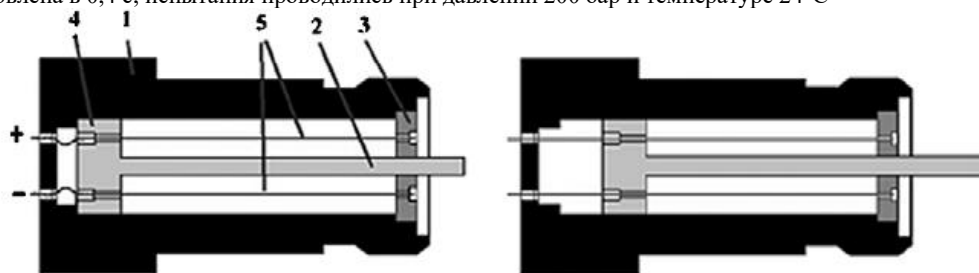


Рисунок 3 – Привод ЭПФ фирмы Strittmatter и Gümpel. Линейное устройство, состоящее из (1) запорного винта, (2) вала, (3) направляющей пластины, (4) фланца, (5) проводов никелида титана

Помимо линейного привода на основе эффекта памяти формы Jansen et al представила прототип привода углового позиционирования (рис.4). Входные провода приводных модулей соединяются со шкивом, расположенным внутри зубчатого модуля привода во вращение приводной вал. Привод обеспечивает диапазон вращений 180°, при крутящем моменте 4 Нм при размерах: 70×67×40 мм.

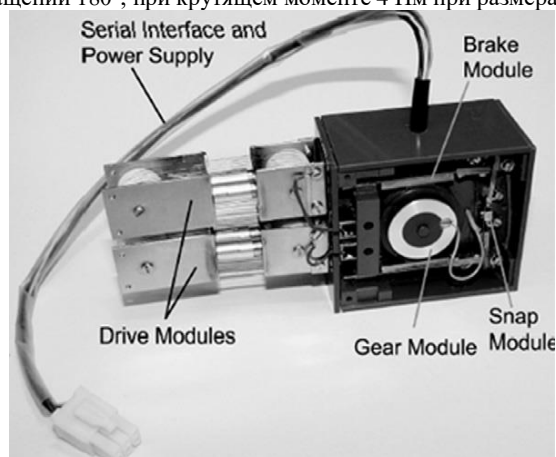


Рисунок 4 – Прототип привода углового позиционирования компании Jansen et al

Некоторые приводы используют в своей основе ферромагнитный эффект памяти формы (ФЭПФ), состоящий в способности сплава восстанавливать свою форму по действием магнитного поля, такие материалы имеют значительно меньшее время отклика и большей нагрузке. В описанных ниже приводах используется ферромагнитный сплав Гейслера (NiMnGa). Так компания AdaptaMat представила линейку приводов на ФЭПФ. Привод A06-3 достигает максимального хода (около 0,6 мм) при частоте 200 Гц и имеет усилие блокировки 2,5 Н; он достигает хода 3 % за 0,2 мс. Привод A-1 2000 имеет железный сердечник и может достигать деформации 2,8 % при напряжении 1,25 МПа. Последний представляет собой линейный привод, который генерирует линейное движение; средняя скорость вращения вала (без нагрузки) составляет 40 мм/с, а прилагаемое усилие составляет 1 Н.

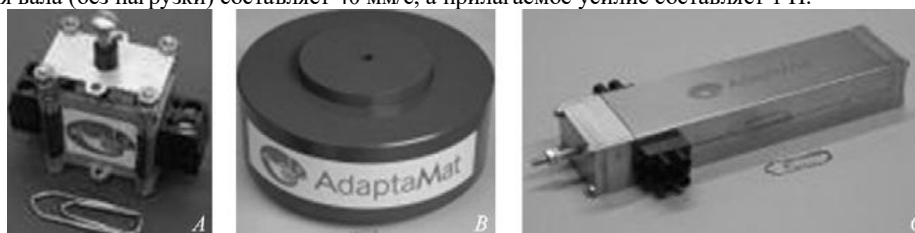


Рисунок 5 – Приводы AdaptaMat

Таким образом данное направление представляет важнейший аспект современной мехатроники и робототехники, позволяет повысить эффективность приводов обеспечивая движение в недоступных для классических актуаторов диапазонах мощности при малых габаритах, позволяют обеспечить большую точность и при увеличенной надежности за счет простоты конструкции. Однако недостаток инновационных решений в этой области приводит к серьезным ограничениям использования этого принципа в современной робототехнике.

Библиографический список

1. Оландер А. Каучукоподобное поведение сплавов кадмий-золото [Электронный ресурс] // СПбПУ: электронная библиотека. – 2018. – URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/r18-27.pdf/download/r18-27.pdf> (дата обращения: 01.10.2023).
2. Chang L. C., Read T. A. Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals: The gold-cadmium beta phase // Journal of Applied Physics. – 1951. – Vol. 22. – P. 1170–1175. – URL: <https://bpb-arse2.wpmucdn.com/uowblogs.com/dist/b/2950/files/2019/12/Review-1x5lz5z.pdf> (дата обращения: 01.10.2023).
3. Обзор применения материалов с ЭПФ в промышленности [Электронный ресурс] / СПбПУ; сост. Н.И. Петров. – СПб., 2020. – URL: https://шляхтен.рф/SPbSTU/Экзамены/6%20курс/Диплом%202.0/НИКИТА/Италия_обзор.pdf (дата обращения: 01.10.2023).
4. Эффект памяти формы: Суть явления [Электронный ресурс] // Википедия. – 2023. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_памяти_формы#Суть_явления (дата обращения: 01.10.2023).
5. Иванов А.В. Нитинол: металл с памятью формы // Хабр. – 2022. – URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/760096/> (дата обращения: 01.10.2023).
6. Нитинол [Электронный ресурс] // Cyclowiki. – 2023. – URL: <https://cyclowiki.org/wiki/Нитинол> (дата обращения: 01.10.2023).

УДК 62-27

ПРИМЕНЕНИЕ МЯГКОГО ПРИВОДА В СОВРЕМЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

А.В. Круглов, В.М. Карнацкий

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

Одним из наиболее перспективных направлений в области робототехники являются мягкие адаптивные захваты. Актуальность проблемы обусловлена растущей потребностью в более безопасных и универсальных решениях для автоматизации процессов в различных отраслях, таких как производство, логистика, медицина и сельское хозяйство. Традиционные жесткие захваты часто оказываются неэффективными при работе с хрупкими или нестандартными предметами, что может привести к их повреждению или снижению качества выполнения задач. Мягкие адаптивные захваты, благодаря своей способности изменять форму и силу захвата, способны решить эти проблемы, обеспечивая более бережное обращение с объектами и повышая общую производительность.

Мягкая робототехника — это новая область робототехники, ориентированная на создание роботов из гибких, мягких материалов, имитирующих движение и адаптируемость к биологическим системам, такие как человек. Сравним мягких роботов и традиционных по ряду критериев.

Таблица 1–Сравнение обычных и мягких роботов.

Критерии	Мягкие роботы	Традиционные роботы
Гибкость и морфология	Изготовлены из гибких материалов, адаптивная морфология	Обычно жесткие с предопределенной структурой
Взаимодействие с людьми	Безопасное взаимодействие с людьми, сниженный риск травм	Небезопасны, требуют дополнительные меры безопасности.
Область применения	Медицина, поисково-спасательные операции, исследования	Технические задачи по производству, повседневное использование
Гибкость и чувствительность	Хорошая гибкость, тактильность к биологическим системам	Отсутствие гибкости, Отсутствие тактильности к биологическим системам.
Производство и изготовление	3D-печать, литье, синтез мягких материалов	Традиционные методы обработки, сборка с применением жестких материалов

Способы приведения в движение	Движения при деформации	Жесткое управление.
-------------------------------	-------------------------	---------------------

Как видим мягкие роботы выигрывают у традиционных роботов. По типу мягкие роботы делятся: мягкие приводы, мягкие захваты, системы управления, датчики, источники питания. По использованию мягкие роботы делятся: здравоохранение и медицинское оборудование, бытовая современная электроника, промышленная автоматизация, сельское хозяйство и агропромышленность. Основные ключевые параметры мягких адаптивных хватов: точность действий, степени свободы (DOF), усилие приложения соответствие конструкции.

Мягкие роботы состоят в основном из материалов с модулем Юнга, сопоставимым с модулем упругости мягких биологических материалов, таких как мышцы, сухожилия и кожа, который обычно составляет около 1 Гпа. Сюда входят такие материалы, как силикон, резина или другие эластомерные полимеры, которые можно легко изготовить с различными форм-факторами и свойствами материала.

Использование гибких материалов сопряжено с проблемами с точки зрения нелинейного отклика, сложности моделирования, необходимости самовосстановления, усталостных характеристик и потенциальных ограничений при изготовлении. Новые материалы, разрабатываются для применения в мягких робототехнике и обладают значительным потенциалом благодаря инновационным свойствам, таким как термонастраиваемость и самовосстанавливающиеся свойства.

Изготовление мягких роботов происходит по трем методам: литье материалов, производство наплавки по форме, мягкая литография. Литье материалов и формирование форм с помощью 3D-принтера для отливки конструкций на основе силикона или эластомера (в т.ч. с пневматическими приводами). Производство наплавки по форме (SDM – технология послойного производства, гибридный процесс формирования и механической обработки нежелательного материала с различными свойствами. Мягкая литография – процесс с использованием форм фотолитографии с созданием рельефной поверхности, с последующим нанесением слоев и включением каналов и различных материалов.

Мягкие роботизированные манипуляторы и руки должны обладать способностью сгибаться, растягиваться и сокращаться. Эластичные и мягкие свойства используемых материалов требуют интеллектуальных приводов, которые, в отличие от электродвигателей, действующих между двумя жесткими звеньями робота-манипулятора, обладают общими свойствами гибкости и деформируемой. С этой целью в мягкой робототехнике было изучено несколько методов приведения в действие: либо путем передачи усилия, исходящего от жестких приводов, через кабели или пневматические каналы, либо путем создания приводов, которые могут деформироваться, таких как сплавы с памятью формы (SMA).

Существует 4 метода тросового управления: пневматическое действие, сплавы с памятью формы, электроактивные полимеры, тросовое управление. Рассмотрим пневматическое действие. Источником питания для пневматического привода обычно является компрессор, но также было исследовано создание давления с помощью химических веществ на борту и оптимизировано с точки зрения эффективности клапана. Рассмотрим сплавы с памятью формы. Сплавы с памятью формы (SMAs) обладают свойством деформироваться и затем возвращаться к первоначальной форме при нагревании. SMA использовались в мягкой робототехнике для создания локомоции, подобной движению червя. Рассмотрим электроактивные полимеры. При приложении электрического поля электроактивные полимеры (EAP) деформируются, что позволяет использовать их в качестве исполнительных механизмов; они способны подвергаться значительной деформации при приложении значительных усилий. Они используются в искусственных мышцах и имеют сходство с биологическими мышцами. Рассмотрим тросовое управление. Чтобы полностью свести к минимуму инерцию манипулятора, усилие привода должно передаваться от источника приведения в действие через конечности манипулятора к точке целевого сочленения. Метод передачи усилия не должен ограничивать движение манипулятора или влиять на его жесткость. Система привода должна создавать значительное усилие в точке приведения манипулятора в действие.

Мягкое роботизированное щупальце, разработанное командой исследователей Гарвардского университета. Щупальце не содержит жестких элементов и представляет собой эластичную трубку, состоящую из нескольких независимых секций. Каждая из секций имеет по 3 воздушных канала. Изгиб щупальца происходит при нагнетании воздуха в каналы. Форма изгиба зависит от наполнения определенных каналов

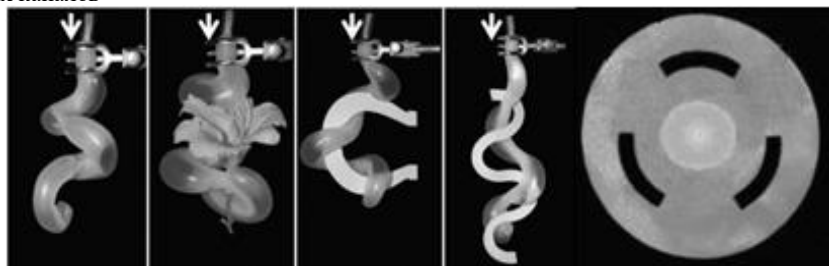


Рисунок 1–Мягкие щупальце

Примером робота, моделирующего поведение реального животного – осьминога, может служить автономный робот Octobot. Движение щупальцами робота происходит за счет энергии вырабатываемой химической реакцией перекиси водорода с платиновым катализатором.

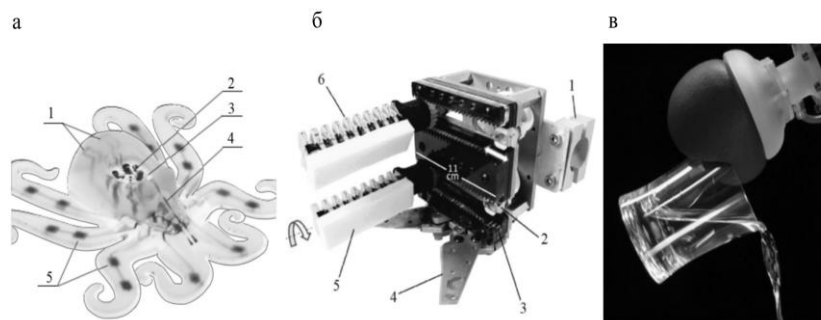


Рисунок 2—Основные типы захватов

В теле Octobot полностью отсутствуют жесткие элементы: топливный бак 1, топливозаборники 2, контроллер 3, реактор 4, система трубок и клапанов - 5, изготовлены полностью из мягких материалов методом литографии.

Представленное на рис. 3 (б) захватное устройство робота для деликатного сбора образцов животных организмов с глубин до 800 м. Рабочими элементами захватного устройства являются пальцы, выполненные из силиконового эластомера. Пальцы состоят из камеры 4 (сильфона), наполненной водой и закрепленного на ней элемента 5, повторяющего форму обхватываемого объекта. Пальцы установлены на корпусе с помощью реечной передачи 3 с возможностью разведения либо сведения под размеры захватываемого объекта. Для зажима захватываемого образца в пальцах повышается давление, заставляя пальцы сгибаться. После захвата образца он отделяется от опоры с помощью ножниц 4. Выключатель 3 служит для быстрого отключения ножниц. Корпус захватного устройства закрепляется на руке робота с помощью зажима 1.

Рассмотрим захват компании iRobot. Универсальный захват, разработанный исследователями Корнуэльского университета, Чикагского университета и компании iRobot. В основе идеи этого захвата выступила всем известная вакуумная упаковка кофе, которая обладает высокой твердостью. Но стоит только нарушить целостность упаковки, она становится мягкой и податливой. Этот эффект называется фазовым переходом гранулированных материалов при изменении значения внешнего воздействия.

Вакуум внутри этой оболочки создается за счет вакуумного компрессора, выкачивающего воздух из внутреннего пространства захвата. Помещая этот манипулятор, находящийся в размягченном состоянии, на любой предмет можно добиться того, что он примет форму этого предмета. После этого из внутреннего пространства захвата откачивается воздух, он твердеет и надежно захватывает предмет, после чего с его помощью можно поднимать, перемещать и удерживать предметы достаточно сложной формы, не нарушая их целостности

Рассмотрим Адаптивный захват Festo FinGripper Захват Festo FinGripper состоит из пневматического привода в виде гармошки и трех пальцев, сделанных по аналогии с формой хвостового рыбьего плавника. В устройстве используются две гибкие пластинки, которые соединяются, образуя треугольник. Когда возникает боковое давление, захват принаравливается к форме предмета, как человеческая рука, только быстрее.

Вес захвата на 90% меньше по сравнению с традиционными металлическими захватами. Пропорциональный пневматический клапан обеспечивает правильное давление и позволяет добиваться его большого диапазона. Давление цилиндра может быть адаптировано к процессу производства или сортировки за счет пропорциональных клапанов.

Сверхбережный роботизированный захват Festo FinGripper сделан из слоев полиамида толщиной 0,1 мм, создающих трехмерный компонент. Образцом при его создании послужил плавник рыбы. FinGripper способен захватывать фрукты неправильной формы или хрупкие шоколадные яйца, не повреждая их легкой обертки из тонкой фольги.

Рассмотрим самообучающийся захват LearningGripper. Пневматический захват с четырьмя пальцами LearningGripper производства компании Festo можно абстрактно сравнить с человеческой рукой. Четыре пальца захвата приводятся в движение двенадцатью пневматическими сильфонными приводами низкого давления. Особенностью бионического захвата является его обучаемость. За нее отвечают алгоритмы обучения, заменяющие крайне сложное программирование. С помощью машинного обучения, захват в состоянии самостоятельно научиться выполнению сложной задачи, например, захвату и ориентированию шара.



Рисунок 3—Самообучающийся захват LearningGripper

Рассмотрим прототип мягкого медицинского робота Прототип мягкого медицинского робота типа оригами для доставки лекарств в желудочно-кишечный тракт пациента. Робот создан на основе фигуры оригами под названием оригами Креслинга. Узор складок обеспечивает возможность телу робота сокращаться в продольном направлении и достаточно высокую способность сопротивляться деформации в поперечном направлении. Тело робота состоит из четырех секций I-IV. Сборка секций обеспечивает конструкции двухуровневую симметрию. Секции составлены таким образом, чтобы при движении имитировать движение червя. Тело робота внутри полое и представляет собой тонкую оболочку из водорастворимой бумаги. В местах стыковки секций закреплены магнитные пластины. Сокращения тела робота при движении происходят под действием магнитного поля. Лекарственное средство цилиндрической пилюли фиксируется в точке 2, оставаясь свободным в точке 1. Таким образом, при сокращении тела робота в процессе движения внутри организма пациента, лекарство сохраняет свое положение и не мешает движению к месту назначения. В конечной точке бумага растворяется, освобождая лекарство для лечения пациента.

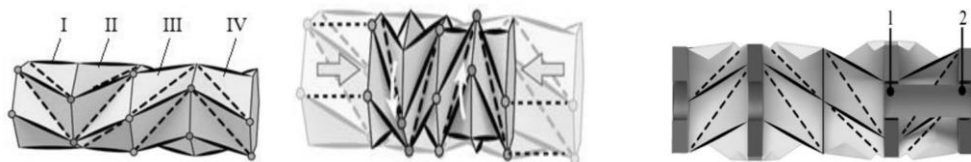


Рисунок 4—Прототип мягкого медицинского робота

Данное направление представляет собой важный аспект современных технологий, позволяя улучшить взаимодействие роботов с окружающей средой и повысить их функциональность. Мягкие адаптивные захваты, благодаря своей способности подстраиваться под форму захватываемых объектов, открывают новые горизонты в области автоматизации и роботизации. Мягкие адаптивные захваты представляют собой важный элемент современного подхода к автоматизации и роботизации. Их применение может значительно повысить эффективность и безопасность работы в различных сферах, от производства до медицины. Для достижения этого необходимо продолжать исследовать и развивать технологии мягких захватов, а также активно внедрять их в практику. Таким образом, можно ожидать, что в будущем мягкие адаптивные захваты займут важное место в робототехнике и станут стандартом для многих приложений.

Библиографический список

1. Электрический мягкий палец пневматический цилиндр ... [Электронный ресурс] // ru.made-in-china.com, https://ru.made-in-china.com/co_egroeco/product_Electric-Soft-Finger-Pneumatic-Cylinder-Adaptive-Gripper-for-Blind-Nut-Rubber-Ring-Bottle-CapStopper_ysnrerreg.html.
2. Захваты и инструменты для роботов [Электронный ресурс] // wrspace.ru, <https://wrspace.ru/catalog/zakhvaty-i-instrumenty-dlya-robotov/>, свободный.
3. Адаптивный держатель для захвата предметов — КОС [Электронный ресурс] // tmkos.ru, <https://tmkos.ru/adaptive-strap>, свободный.
4. Совместный пневматический генератор вакуума [Электронный ресурс] // ru.scic-robot.com, <http://ru.scic-robot.com/collaborative-pneumatic-two-finger-soft-gripper-vacuum-generator-for-robot-automation-product/>.
5. Рука об руку с человеком: бионический манипулятор от Festo [Электронный ресурс]//controlengrussia.com,<https://controlengrussia.com/innovatsii/robototekhnika/bionicsofthand/>, свободный.

УДК 004.94

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SimInTech ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ САУ РЭС

В.В. Вейснер, А.С. Гордиенко

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Рассмотрен подход к построению математических моделей типовых систем автоматического управления радиоэлектронных систем в российском программном комплексе SimInTech. Представлена функциональная схема и упрощённая математическая модель следящего измерителя дальности в виде структурной схемы, уравнения и передаточных функций её звеньев. Модель реализована в среде SimInTech на основе типовых блоков. Представлены результаты моделирования системы при различных ее параметрах.

Ключевые слова: математическая модель, система автоматического управления, следящий измеритель дальности, командно-измерительная система, качество управления

Введение

Разработка и применение радиоэлектронных систем (РЭС) космических комплексов, решающих задачи обнаружения космических объектов, измерения траектории их полета и дальнейшего сопровождения стала возможной благодаря применению систем автоматического управления (САУ) [1]. К основным САУ РЭС КК относятся: следящие измерители направления (СИН); следящие измерители частоты (СИЧ); следящие измерители дальности (СИД); системы автоматической регулировки усиления (АРУ). САУ РЭС нужны для повышения эффективности работы РЭС за счет автоматизации процессов обнаружения, распознавания, сопровождения целей.

В настоящее время происходит резкое увеличение количество малых космических аппаратов (КА), а также числа космического мусора (КМ). Наземные системы способные отследить только крупные фрагменты космического мусора (от 10 см), в то время как серьезный ущерб несет км с характерным размером от 1 до 10 сантиметров. При этом отследить движение такого и предупредить столкновение очень сложно [2]. Поэтому возникает несоответствие между большим количеством КО на орбите и ограниченностью времени их наблюдения с территории РФ. Разрешение несоответствия возможно за счет повышения качества измерений траекторий в течение сеансов управления КО, в частности, повышения точности и быстродействия СИД.

Постановка задачи

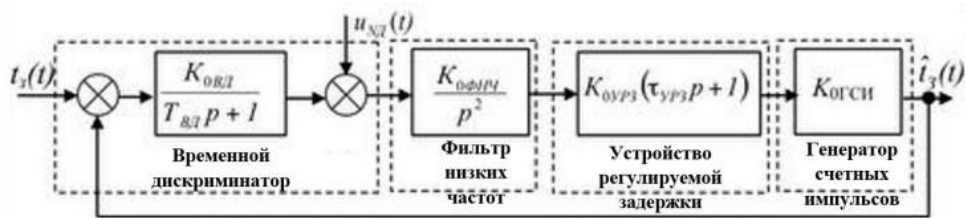
Неопределенность влета КА в зоне радиовидимости командно-измерительных систем (КИС) и отличие их реальных траекторий движения от ожидаемых при действии возмущающих (помеховых) воздействий предопределяет необходимость использования в качестве СИД нелинейную замкнутую САУ, состоящую из следующих функциональных элементов: временного дискриминатора (ВД), фильтра низких частот (ФНЧ), устройства регулируемой задержки (УРЗ) и генератора следящих импульсов (ГСИ) [3]. Задачей СИД является формирование следящих импульсов (СИ), временное положение которых отображает плавное закономерное изменение дальности и почти не изменяется под воздействием хаотических шумовых возмущений. Отсчет дальности по положению СИ обеспечивает высокую точность измерений в условиях различных помех.

Для решения проблемы выбора схемы системы, оптимизации ее структуры и параметров применяются специальные программные комплексы, позволяющие заменить реальные сложные системы, конструкции структурными схемами в виде блоков математических моделей, полностью описывающих эти системы, конструкции. Одним из таких программных комплексов является отечественный программный комплекс SimInTech. Программный комплекс SimInTech относится к системам автоматизированного проектирования (САПР) логико-динамических систем, описываемых во входо-выходных отношениях. Объектом САПР может быть любая техническая система, устройство или физический процесс, математическая модель динамики которого описывается системой дифференциально-алгебраических уравнений и может быть реализована методами структурного моделирования.

По заданной математической модели необходимо реализовать в среде SimInTech модель следящего измерителя дальности КИС, позволяющую оценивать качество его функционирования. Также необходимо произвести настройку параметров системы, и, затем, сравнить полученные результаты.

Моделирование СИД в среде SimInTech

Применение среды SimInTech позволяет спроектировать динамическую модель СИД методом структурного моделирования. В работе рассматривается СИД, в котором реализован наиболее распространенный временной способ измерения (рис.1). Он основан на измерение временной задержки между излучаемым и принимаемым сигналом – t_z . В целях синтеза структурной схемы СИД и ее последующего анализа необходимо провести замену элементов функциональной схемы СИД на типовые элементарные динамические звенья на основе линеаризации методом малых возмущений и обоснованных допущений.



1. Типовая функциональная схема СИД КИС

Рис.

Создадим динамическую модель (рис. 2) в среде структурного моделирования SimInTech на основе функциональной схемы СИД КИС по уравнениям её элементов [2].

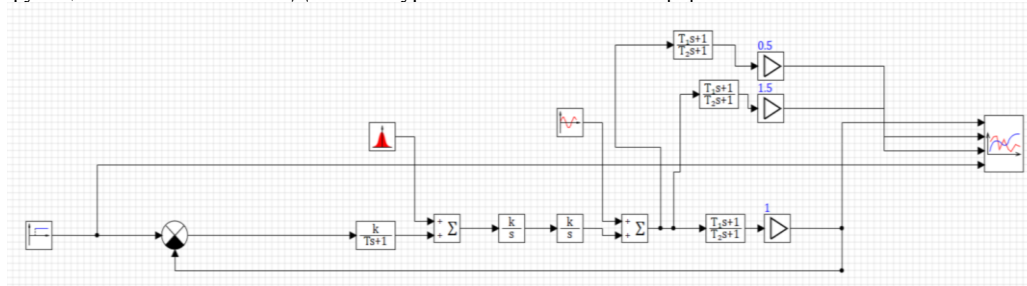


Рис. 2 . Модель СИД, реализованная в проекте SimInTech

Основными задачами анализа СИД в среде SimInTech является оценка устойчивости и качества управления (точности, быстродействия) системы.

Для анализа устойчивости СИД применяется критерий Найквиста. Кроме того, данный критерий может быть использован для оценки запасов устойчивости, то есть стабильности системы при различных условиях. Критерий Найквиста основан на использовании передаточной функции системы для построения годографа. Система считается устойчивой, если годограф не охватывает точку с координатами (-1, 0). Это означает, что после внешнего возмущения система вернется в исходное состояние. Построение годографа Найквиста в среде SimInTech позволяет исследовать устойчивость СИД при различных параметрах системы.

Анализ качества управления СИД будем проводить на основе переходных характеристик, полученных при различных параметрах системы. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

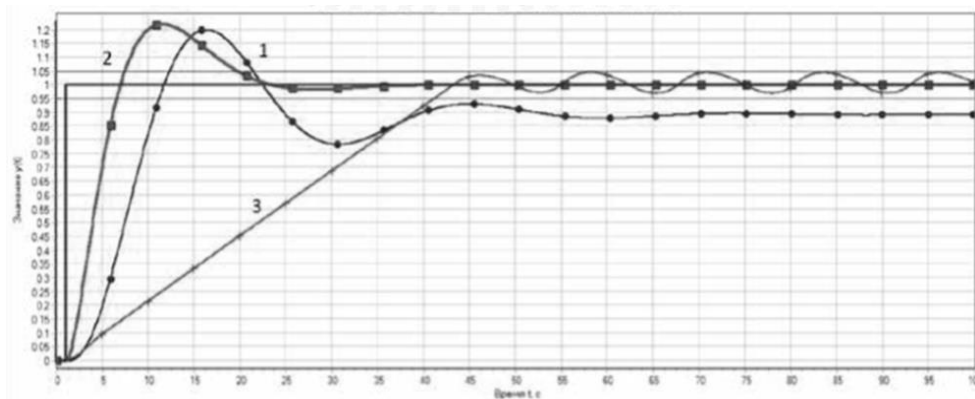


Рис. 3. Графики переходных процессов

На базе спроектированной модели СИД в SimInTech возможно проводить анализ и синтез систем, используя следующие методы:

- включение в состав СИД дополнительного интегратора для уменьшения динамической ошибки;
- настройка параметров фильтров первого и второго порядка, которые позволяют снизить ошибки измерения дальности;
- изменение параметров дискриминационной характеристики для настройки работы СИД по разным типам КА;
- увеличение коэффициента передачи ЭДЗ (это приводит к уменьшению динамической ошибки слежения, но может увеличить шумовую (случайную) ошибку слежения) для обеспечения минимума суммарной ошибки слежения.

Заключение

На основе типовых блоков SimInTech была разработана модель слеящего измерителя дальности командно-измерительной системы, проведена настройка параметров модели. Выполнено

моделирование СИД, исследованы различные методы, обеспечивающие повышение быстродействия для уменьшения времени задержки в САУ.

Функционал разработанной динамической математической модели в программном комплексе SimInTech является достаточным для выполнения задач не только этапа концептуального проектирования следящих измерителей дальности, но и последующих этапов жизненного цикла таких систем.

Научный руководитель – А.В. Демьянов

Библиографический список

1. Автоматические устройства радиоэлектронных систем: учебное пособие / Г.Н. Арсеньев, В.В. Деркач. – М.: Радиотехника, 2006. – 408 с.
2. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. 2018. №. 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93299>
3. Устройства радиоавтоматики космических радиоэлектронных систем: учебное пособие / А.М. Полетаев. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015. – 249 с.

СЕКЦИЯ 6 РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА

УДК 620.1.08

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОВЕРКИ ПЛАТФОРМЕННЫХ ВЕСОВ

В.В. Магдыч, А.О. Каламитцев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Каждый измерительный прибор подвергается поверке, которая служит подтверждением того, что прибор является прецизионным и соответствует всем нормам ГОСТ.

Поверка средств измерений – совокупность операций, выполняемых органами Государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами, организациями) в целях подтверждения соответствия средства измерения установленным метрологическим требованиям [1]. Существуют разные виды весов: от микровесов с минимальными нагрузками в 1 мг до платформенных весов с максимальной нагрузкой 100 кг. Поверка весов осуществляется по протоколу, составленным в соответствии с ГОСТ OIML R76-1-2011. В данный нормативный документ включены следующие испытания: нагружение весов с определением размаха, нагружение весов от минимальной нагрузки до максимальной, проверка соответствия значений при нагружении весов по угловым точкам чаши и нагружение оборудования с дополнительной тарой.

Поверка данного типа весов производится вручную, т.е. человек, используя собственные силы, нагружает весы гирями массой 10, 20, 30 кг. Подобный вид деятельности пагубно влияет на здоровье человека из-за непрерывных подъемов тяжелого предмета, в связи с чем возникает риск возникновения профессиональных заболеваний. Человек имеет свойство уставать, перенапрягаться, он нуждается в отдыхе и перерывах, что сказывается на оперативности выполняемых работ. Дополнительно, если поверитель – женщина, возможность самостоятельно осуществить поверку данного прибора отсутствует. Все вышеизложенное обуславливает актуальность данной проблематики.

Очевидно, что процесс требует автоматизации и возможности внедрения роботизированных приборов или устройств. Поэтому, наиболее рациональными вариантами решения задачи, по нашему мнению, будут варианты, которые основываются на замещении физических усилий человека на усилия роботов и машин.

Для решения задачи предлагается использовать один из следующих приборов: роботизированная рука, грузоподъемный манипулятор, роботизированный экзоскелет. Сравним три варианта между собой и выберем наиболее подходящий.

Роботизированная рука для поднятия грузов

Роботизированная рука для поднятия грузов – это высокотехнологичное устройство, которое имитирует движение человеческой руки с целью выполнения каких-либо манипуляций, в том числе подъем, перемещение и размещение [2]. Рука применяется в различных отраслях: в медицине, робототехнике, промышленности и тд. Управление прибора осуществляется двумя способами: автоматически с помощью программного обеспечения и вручную человеком. Роботизированные руки имеют различную конструкцию. Её сложность зависит от преследуемых целей и задач. Также в целях безопасности в приборы встраиваются механизмы и сенсоры для предотвращения возможных аварий.



Рисунок 1 – Роботизированная рука.

За счет своей высокотехнологичности стоимость роботизированных рук варьируется от 600 000 рублей до 2 500 000 рублей. Цена зависит от максимальной нагрузки, которую может поднять прибор.

Манипулятор для подъема грузов

Грузоподъемный манипулятор — это многозвенный механизм, созданный для перемещения, подъема и установки грузов большой массы. Такое грузоподъемное устройство дополняют электрическим либо гидравлическим оснащением [3]. Механизмы могут быть стационарными и мобильными, включающими в себя дополнительные конструкции для реализации каких-то специализированных задач. Манипуляторы получили широкое применение в логистике, производстве и строительстве.

Конструкция машины состоит из рамы – некий скелет конструкции, гидравлической системы, позволяющей поднимать и опускать грузы, а также грузового крепления и управляющей части.



Рисунок 2 – Манипулятор для подъема грузов

На рисунке 2 представлен манипулятор, поднимающий гирию массой 20 кг. Страна производства Китай. Управляется с помощью встроенных сенсоров, крепится к потолку, имеет 6 степеней свободы, удобен в использовании. Стоимость грузоподъемных манипуляторов с максимальной нагрузкой до 30

кг варьируется от 10 000 рублей до 30 000 рублей. Цена зависит от страны производителя, типа манипулятора и функциональности.

Экзоскелеты для подъема грузов

Экзоскелеты для подъема грузов – это устройства, которые помогают человеку перемещать, поднимать и устанавливать тяжелые грузы с минимальными усилиями [4]. Экзоскелеты напрямую взаимодействуют с человеком и бывают двух видов: активные и пассивные. Активные экзоскелеты включают в себя сенсоры и электродвигатели с целью уменьшения усилий и снижения чрезмерной нагрузки. Пассивные экзоскелеты работают с помощью механических систем для перераспределения веса и нагрузки на организм. Они повышают выносливость человека и сокращают риск возникновения производственных травм.



Рисунок 3 – Экзоскелет для подъема грузов

Стоимость экзоскелетов варьируется от 80 000 рублей до 1 000 000 рублей, в зависимости от сложности и функциональности конструкции.

Сравнительный анализ устройств

Для того, чтобы предпринять меры по оптимизации процесса поверки необходимо провести сравнительный анализ всех представленных выше устройств и выбрать наиболее подходящий вариант.

Таблица 1 – Сравнительный анализ устройств

Устройство	Цена (рубли)	Простота использования
Роботизированная рука	600 000 – 2 500 000 рублей	Ограниченная маневренность, требует привязки к оператору.
Грузоподъемный манипулятор	10 000 – 30 000 рублей	Возможность работать в ограниченном пространстве благодаря удобству крепления, доступна полная автоматизация, т.е. не требует приложения физической силы.
Экзоскелет	80 000 – 1 000 000 рублей	Необходимо надевать и снимать устройство; необходимо обучение для безопасного использования оборудования; слишком тяжелые для длительного использования.

Заключение

В ходе работы были представлены 3 устройства для решения задачи поиска рационального варианта оборудования с целью повышения эффективности процесса поверки. Проводя сравнительный анализ можно выделить то, что наиболее экономически выгодным предложением является манипулятор для подъема грузов. Он является более выигрышным вариантом не только в экономическом аспекте, но и в простоте использования устройства.

Для повышения эффективности процесса поверки платформенных весов предлагается приобрести манипулятор для подъема грузов с целью уменьшения нагрузки на человека, сокращения ускорения процесса поверки, а также сокращение риска возникновения производственных травм.

Библиографический список

1. Главный форум метрологов [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://info.metrologu.ru/spravochnik/obespechenie_edinstva_izmereniy-1/poverka-i-kalibrovka/poverka.html (Дата обращения: 28.01.2025)
2. Роботизированная рука: захватные устройства [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://top3dshop.ru/blog/robotic-arm-grippers.html>

(Дата обращения: 28.01.2025)

3. Манипуляторы – особенности грузоподъемной спецтехники [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ek-autovl.ru/blog/manipulyatory-osobennosti-gruzopodemnoj-spetstehniki/> (Дата обращения: 28.01.2025)

4. Яцун С.Ф., Антипов В.М., Карлов А.Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМА ГРУЗА С ПОМОЩЬЮ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА. // Известия Юго-Западного государственного университета – 2018;22(6):14–
<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-6-14-20>

УДК 53.087.4, 681.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА ПРИВОДА УСТРОЙСТВА ПОВОРОТНОГО СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

В.А. Курбанова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

Аннотация. В статье определяется экспериментальным путем закон изменения статического момента сопротивления лабораторной установки, предназначенной для имитации работы электропривода устройства поворотного солнечной батареи.

Ключевые слова: солнечная батарея, электропривод, статический момент, жесткость.

Солнечные батареи (СБ) в настоящее время являются одним из наиболее надежных и используемых средств энергообеспечения космических аппаратов (КА) – их высокая эффективность обусловлена постоянством солнечной энергии из-за отсутствия атмосферы и погодных условий. В связи с необходимостью управления положением поверхности панели СБ относительно направления излучений солнечной энергии скорость исполнительного привода СБ должна быть небольшой. Обычно диапазон скоростей не превышает $\pm 0,5^\circ/\text{с}$, при этом рабочие скорости могут составлять по абсолютному значению $0,0042^\circ/\text{с}$ (скорость вращения Земли) и менее. Также для сохранения комфортных условий работы целевой аппаратуры КА движение СБ должно быть максимально плавным как в пусковой, так и в установившемся режиме. Факторами, не позволяющими осуществить данный тип регулирования, могут являться: ограничения в передаче силы у механической части привода, инерционность элементов привода, пульсации управляющего момента, работа механики на резонансных частотах, непостоянство статического момента. Под статическим моментом сопротивления M_c подразумевается момент, возникающий в конструкции привода из-за наличия шарикоподшипников и контактных устройств, преодоление которого необходимо для начала вращения СБ.

В данной работе рассматривается способ определения закона изменения статического момента сопротивления с помощью лабораторной установки, имитирующая работу устройства поворотного СБ (УПСБ). УПСБ предназначено для обеспечения вращения СБ вокруг одной оси в любом направлении на неограниченный угол для отслеживания направления на Солнце и транзитной передачи электроэнергии от СБ в полете на рабочей орбите. УПСБ представляет собой моноблок, состоящий из неподвижной и вращающейся частей конструкции, и включает в себя две основные части – электромеханическую и электронную. Электромеханическая часть – прямой, безредукторный, электропривод, построенный на базе вентильного двигателя (ВД). В качестве датчика угла (ДУ) используется двух-отсчетный вращающийся трансформатор. Электронная часть включает блоки обработки сигналов ДУ и управления двигателем.

Лабораторная установка и состоит из следующих элементов:

- 1) УПСБ;
- 2) Имитатор момента инерции СБ;
- 3) Эталонный датчик угла (ЭДУ);
- 4) Персональный компьютер (ПК);
- 5) Блок сопряжения ЭДУ с ПК.

В качестве ЭДУ применён преобразователь углового положения ЛИР-ДА190А с разрядностью выходного кода 25.

Учитывая специфику работы привода СБ, работы при скоростях вращения близких к нулю, наибольшую важность имеет знание статического момента сопротивления, составляющей момента сопротивления не зависящей от скорости вращения, момент, который следует преодолеть, чтобы начать движение.

Методика определения статического момента сопротивления основана на оценке пускового момента двигателя. Момент сопротивления можно выразить, используя дифференциальное уравнение, которое характеризует процессы в механической части двигателя [1]:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{ЭМ}} - M_c, \quad \#(1)$$

где J – суммарный момент инерции СБ и подвижных частей привода, приведённый к ротору двигателя; ω – скорость двигателя; $M_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитный момент двигателя; M_c – момент сопротивления. Тогда:

$$M_c = M_{\text{ЭМ}} - J \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

В случае построения привода на базе вентильного двигателя выражение для M_c принимает вид:

$$M_c = k_{эм} \cdot i \cdot j \cdot \frac{d\omega}{dt}, \#(2)$$

где $k_{эм}$ – коэффициент, равный произведению конструктивной постоянной двигателя на магнитный поток; i – ток двигателя. Если известно значение управляющего тока или электромагнитного момента двигателя, при которых начинается движение установки, то момент сопротивления будет прямо пропорционален этой величине, согласно формуле (2).

Исследование осуществляется с помощью двух программ, установленных на ПК. Первая программа обеспечивает дискретное изменение момента двигателя от нуля до предельного значения $\pm 1,2$ Н·м с шагом 0,0001 Н·м. Вторая программа позволяет фиксировать изменение углового положения выходного вала УПСБ с помощью ЭДУ с точностью (дискретностью) 0,04°

Эксперименты проводятся для двух направлений движения электродвигателя: по часовой стрелке (опыты при подаче положительного управляющего момента) и против часовой стрелки (при подаче отрицательного управляющего момента).

Испытание проходит следующим образом: на вал двигателя, находящийся в исходном неподвижном положении, плавно подается управляющий момент. Из-за увеличения подаваемого момента происходят угловые смещения вала, не приводящие систему в движение. В процессе изменения управляющего момента фиксируются его значение и угла поворота вала. Эти данные будут использованы для оценки коэффициента жесткости подвеса вала. Увеличение управляющего момента происходит до достижения постоянного вращения вала – получившаяся максимальная величина момента будет равна моменту сопротивления системы. После начала движения снимается показание управляющего момента, обнуляется управляющий сигнал и достигается остановка системы, записывается значение углового положения вала. Испытание повторяется сначала.

Для определения численного значения коэффициента жесткости подвеса используется выражение[2]:

$$C = \frac{M_{ст}}{\Delta\alpha},$$

где $M_{ст}$ – значение момента «страгивания» двигателя, Н·м; $\Delta\alpha = \alpha_{ст} - \alpha_{исх}$ – величина изменения угла поворота вала двигателя, градусы.

На рисунках 3 и 4 изображена характеристика изменения коэффициента жесткости подвеса, представляющая собой зависимость значения управляющего момента от углового положения вала двигателя. Эти значения были получены опытным путем при проведении первого этапа эксперимента.

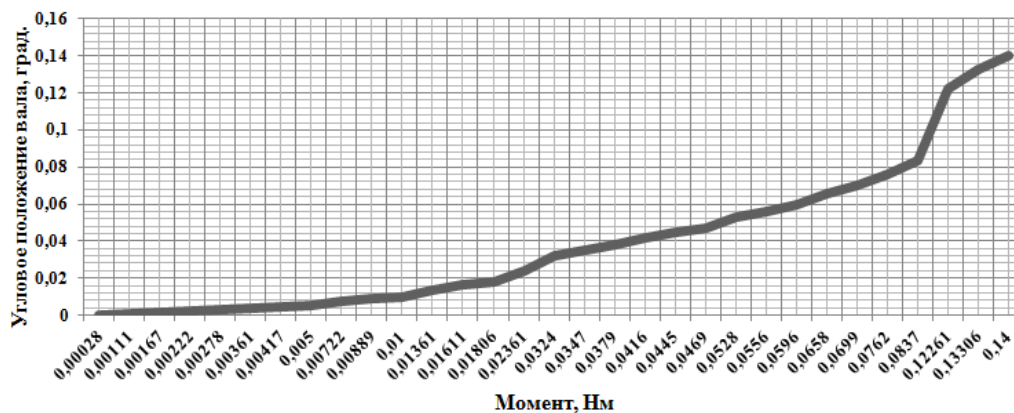


Рис. 1. График зависимости $M(\alpha)$ при направлении движения «по часовой стрелке»

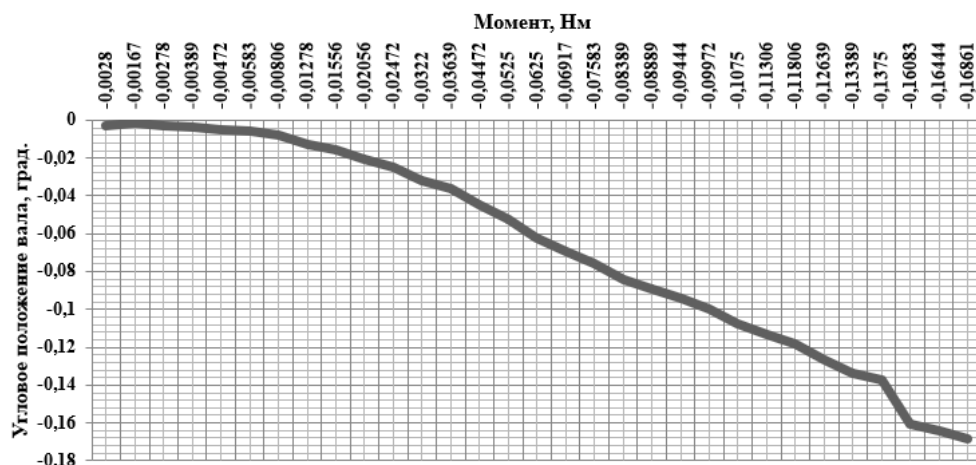


Рис. 2. График зависимости $M(\alpha)$ при направлении движения «против часовой стрелки»

Результаты эксперимента приведены в таблицах 1 и 2, на рисунках 1 и 2 представлены графики зависимости значения момента «страгивания» от соответствующего ему угла.

Таблица 1 Результаты проведения опытов по определению момента «страгивания» при направлении движения «по часовой стрелке»

№ опыта	$M_{СТ}$, Н·м	$\alpha_{ИСХ}$, град.	$\alpha_{СТ}$, град.	$\Delta\alpha$, град.	C , Н·м/град.
1	0,3597	201,77	203,02	1,25	0,2878
2	0,2969	215,07	215,55	0,48	0,6185
3	0,3187	218,47	218,60	0,13	2,4515
4	0,3349	218,63	218,88	0,25	1,3396
5	0,4224	224,88	225,73	0,85	0,4969
6	0,4222	240,15	240,80	0,65	0,6495
7	0,4219	252,93	253,55	0,62	0,6805
8	0,3844	258,53	258,82	0,29	1,3255
9	0,3529	262,57	264,53	1,96	0,1801
10	0,3712	284,80	285,90	1,10	0,3375
11	0,3402	292,85	293,63	0,78	0,4362
12	0,397	296,90	297,67	0,77	0,5156
13	0,397	307,12	307,78	0,66	0,6015
14	0,3933	316,83	317,37	0,54	0,7283
15	0,4032	321,97	322,27	0,30	1,344
16	0,3569	331,33	331,80	0,47	0,7594
17	0,3244	335,28	336,35	1,07	0,3032
18	0,3437	339,87	340,35	0,48	0,716
19	0,3606	344,30	344,93	0,63	0,5724
20	0,296	353,40	354,20	0,80	0,37

Таблица 2 Результаты проведения опытов по определению момента «страгивания» при направлении движения «против часовой стрелки»

№ опыта	$M_{СТ}$, Н·м	$\alpha_{ИСХ}$, град.	$\alpha_{СТ}$, град.	$\Delta\alpha$, град.	C , Н·м/град.
1	-0,2594	355,07	354,37	-0,7	0,3706
2	-0,3077	349,93	349,6	-0,33	0,9324
3	-0,2685	342,43	342,02	-0,41	0,6549
4	-0,2677	339,08	338,97	-0,11	2,4336
5	-0,2632	332,87	332,43	-0,44	0,5982
6	-0,2408	326,92	326,5	-0,42	0,5733
7	-0,2284	323,52	323,1	-0,42	0,5438
8	-0,2644	320,83	320,57	-0,26	1,0169
9	-0,2204	317,55	317,12	-0,43	0,5126

10	-0,2889	313,47	313,15	-0,32	0,9028
11	-0,2888	307,7	307,3	-0,4	0,722
12	-0,2093	298,97	298,47	-0,5	0,4186
13	-0,2275	296,27	296	-0,27	0,8426
14	-0,2433	287,8	287,5	-0,3	0,811
15	-0,2538	283,2	282,8	-0,4	0,6345
16	-0,2211	275,92	275,33	-0,59	0,3747
17	-0,1945	270,5	270,08	-0,42	0,4631
18	-0,2051	266,38	266,13	-0,25	0,8204
19	-0,2127	264,35	264,08	-0,27	0,7878
20	-0,2068	262,35	262,17	-0,18	1,1489

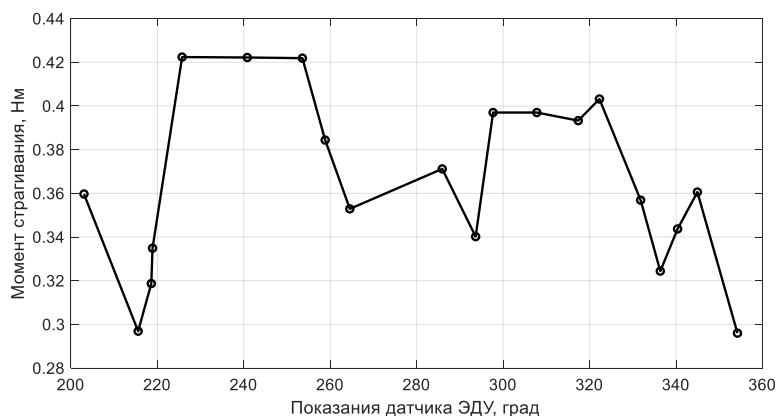


Рис. 3. График опытных данных при направлении движения «по часовой стрелке»

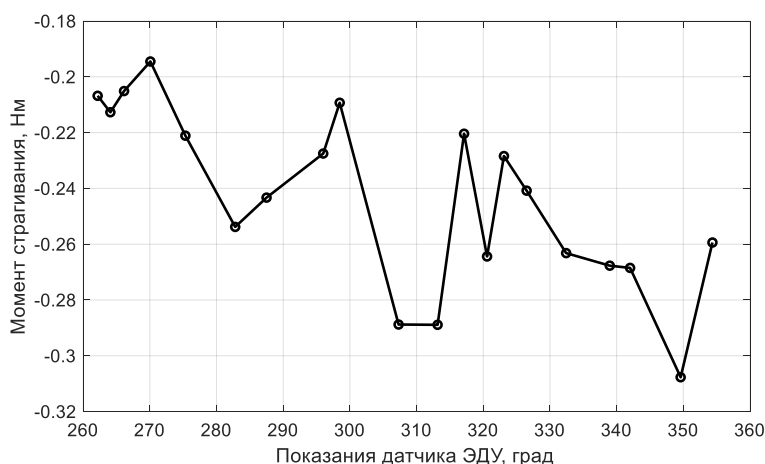


Рис. 4. График опытных данных при направлении движения «против часовой стрелки»

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что:

1) Абсолютное значение статического момента в среднем для движения «по часовой стрелке» составляет 0,3649 Н·м, при этом разброс значений 0,2960-0,4224 Н·м. Для движения «против часовой стрелки» составляет 0,2785 Н·м, при этом разброс значений 0,2051-0,3077 Н·м;

2) Значение коэффициента жесткости в среднем для движения «по часовой стрелке» составляет 0,7357 Н·м/град., при этом разброс значений 0,1801-2,4515 Н·м/град.. Для движения «против часовой стрелки» составляет 0,7781 Н·м/град., при этом разброс значений 0,3706-2,4336 Н·м/град.;

3) Закономерностей в характере изменения статического момента и коэффициента жесткости не обнаружено, необходимы дополнительные исследования.

Изменчивость исследуемых величин может быть объяснена наличием в системе контактных устройств, шарикоподшипников, уплотнительных деталей и других конструкционных решений и элементов.

Закключение:

Апробирована методика оценки момента сопротивления и коэффициента жесткости подвеса вала электропривода СБ.

Значения величины момента сопротивления и коэффициента жесткости подвеса имеют переменный характер, в т.ч. зависящий и от направления движения двигателя.

Зависимость угла поворота вала от прикладываемого управляющего момента близка к линейной. Характеристики, полученные в результате исследования, будут учтены при синтезе модели, имитирующей принцип действия исполнительного электропривода УПСБ, для дальнейшего изучения объекта.

Научный руководитель – доцент, к.т.н., Коротков Е.Б.

Библиографический список

1. Бекишев Р.Ф. Общий курс электропривода: учебное пособие / Р.Ф. Бекишев, Ю.Н. Дементьев; Томский политехнический университет. 2-е изд. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. — 302 с.
2. Васильев В.Н. Системы ориентации космических аппаратов / В.Н. Васильев. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. — 310 с.
3. Казанцев З.А., Ерошенко А.М., Бабкина Л.А., Лопатин А.В. Анализ конструкций солнечных батарей космических аппаратов. [Электронный ресурс] // Космические аппараты и технологии, Том 5, №3 (37). 2021. С. 121 - 134. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konstruktsiy-solnechnyh-batarey-kosmicheskikh-apparatov> (дата обращения: 23.12.24).
4. Положенцев Д. С., Джукич Д. Й., Захаров Д. Н. Система управления исполнительного электропривода устройства поворотного солнечной батареи космического аппарата [Электронный ресурс] // Омский научный вестник. 2019. № 5(167). С. 72-76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-upravleniya-ispolnitelnogo-elektroprivoda-ustroystva-povorotnogo-solnechnoy-batarei-kosmicheskogo-apparata> (дата обращения: 01.02.2025).

УДК 004.896

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ПОЛНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

С.А. Гудков, Е. Ю. Минаев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Введение

Оптимизация траекторий мобильных роботов, включая задачу полного покрытия (Coverage Path Planning, CPP), остаётся одной из центральных задач в робототехнике. Её решение востребовано в системах автоматической уборки, мониторинга территорий, сельскохозяйственных процессах и поисково-спасательных операциях. Целью CPP является построение маршрута, который обеспечит полное покрытие заданной области с минимальными затратами времени и энергии.

Существующие подходы к CPP делятся на оффлайн и онлайн алгоритмы. В первом случае маршрут рассчитывается заранее по известной карте, во втором — траектория строится в процессе движения на основе данных с сенсоров. Каждый из подходов имеет свои ограничения: избыточные перемещения, высокие требования к вычислительным ресурсам и значительные энергозатраты, особенно в сложных или меняющихся условиях.

В последние годы эффективность в задачах полного покрытия показывают методы искусственного интеллекта, особенно нейронные сети. Такие алгоритмы повышают адаптивность робота к динамической обстановке, сокращают количество манёвров и снижают энергопотребление, что делает их перспективным инструментом для современных мобильных платформ.

Биоинспирированная нейронная сеть

Одним из первых примеров применения нейронных сетей в задачах полного покрытия стало решение, предложенное Саймоном Х. Янгом и Чаомином Ло [1], где для работы в статичных средах ими была разработана биоинспирированная нейронная сеть (BINN) на основе вычислительной модели участка мембраны в биологической нервной системе, предложенной Ходжкином и Хаксли в 1952 году.

$$C_m \frac{dV_m}{dt} = -(E_p + V_m)g_p + (E_{Na} + V_m)g_{Na} - (E_K + V_m)g_K \quad (1)$$

Авторы биоинспирированной нейронной сети отмечали высокую эффективность алгоритма, подчёркивая его способность работать без предварительного обучения, что существенно снижало требования к вычислительным ресурсам и позволяло использовать его в системах реального времени [2].

Однако при попытках практической реализации данного подхода выявлены значительные ограничения, которые не позволяют считать BINN полностью работоспособным решением для реальных условий. Во-первых, алгоритм склонен к частым локальным застреваниям, при которых робот многократно возвращается в одну и ту же область, особенно в сложных средах с узкими проходами и препятствиями. Во-вторых, алгоритм демонстрирует хаотичное, несистемное покрытие пространства, что приводит к избыточным перемещениям, увеличению общего пробега и неравномерному распределению покрытия.

Заявленная авторами [1] высокая эффективность BINN не нашла подтверждения при практической проверке. В процессе тестирования алгоритм не выстраивал оптимальный маршрут покрытия, а фактически выбирал траекторию, ориентируясь, в первую очередь, на стоимость изменения

направления движения: вместо выбора глобально оптимального пути с учётом всех доступных направлений и загрязнённости областей, робот часто выбирает направление, минимизирующее только локальные повороты. Аналогичные выводы содержатся и в работах других исследователей [3]. Настоящее исследование направлено на устранение выявленных недостатков и разработку улучшенной версии BINN, способной корректно решать задачи полного покрытия в условиях реальной среды.

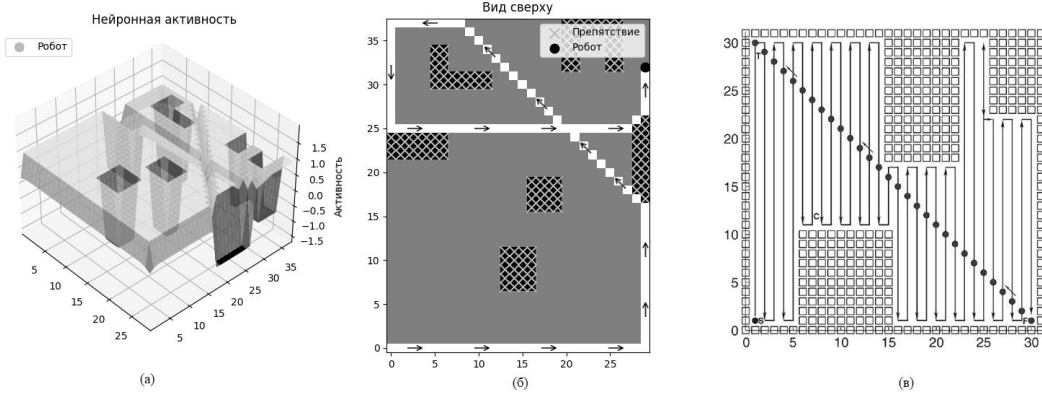


Рисунок 1. Карта нейронной активности, формируемая алгоритмом. (а) – Реальная траектория робота. (б) – Полученная траектория робота. (в) – Заявленная траектория, которой алгоритм должен придерживаться.

В исходной форме алгоритм основывается на модели нейронной активности, описывающей динамику мембранного потенциала с учётом возбуждающих и тормозных сигналов. Каждый нейрон в сети соответствует определённой области рабочего пространства, а его активность обновляется согласно уравнению:

$$\frac{dx_i}{dt} = -Ax_i + (B - x_i)S_i^e - (D + x_i)S_i^i \quad (2)$$

где x_i – это мембранный потенциал i -го нейрона, A , B и D – неотрицательные константы, регулирующие скорость пассивного затухания и верхние и нижние пределы активности нейронов x_i . S_i^e и S_i^i – это возбуждающие и тормозящие входы для нейрона.

Предложенная модель представлена в виде двумерного декартова рабочего пространства W . Позиция i -го нейрона в пространстве состояний нейронной сети, обозначаемая вектором $q_i \in R^2$, уникально соответствует позиции в W . В обсуждаемой модели возбуждающий вход формируется за счёт загрязнённых областей и латеральных нейронных связей, тогда как тормозной вход создаётся только препятствиями. Каждый нейрон имеет локальные латеральные связи с соседними нейронами, которые формируют подмножество P_i в S . Подмножество P_i называется рецептивным полем i -го нейрона. Нейрон реагирует только на стимулы внутри своего рецептивного поля.

По итогу, динамика i -го нейрона описывается уравнением:

$$\frac{dx_i}{dt} = -Ax_i + (B - x_i)([I_i]^+ + \sum_{j=1}^k \omega_{ij}[x_j]^+) - (D + x_i)[I_i]^- \quad (3)$$

где k – количество нейронных соединений i -го нейрона с его соседями в пределах рецептивного поля P_i . Внешний вход I_i для i -го нейрона задаётся:

$$I_i = \begin{cases} E, & \text{если загрязнение} \\ -E, & \text{если препятствие} \end{cases} \quad (4)$$

Члены $[I_i]^+ + \sum \omega_{ij}[x_j]^+$ и $[I_i]^-$ описывают ингибиторные входы S_i^e и S_i^i в уравнении (2). Функции $[a]^+ = \max\{a, 0\}$ и $[a]^- = \max\{-a, 0\}$ задают пороговую обработку входных сигналов. Весовой коэффициент ω_{ij} от i -го нейрона к j -му нейрону задаётся как $\omega_{ij} = f(|q_i - q_j|)$, где $|q_i - q_j|$ представляет собой евклидово расстояние между векторами q_i и q_j в пространстве состояний, а $f(a)$ – монотонно убывающая функция, например, функция, определённая как:

$$f(a) = \begin{cases} \mu/a, & \text{если } 0 \leq a < r_0 \end{cases} \quad (5)$$

где μ и r_0 – постоянные параметры. Следовательно – каждый нейрон имеет только локальные латеральные связи в малой области $[0, r_0]$. Предложенная сеть, описываемая уравнением (3), обеспечивает распространение положительной нейронной активности по всему пространству состояний, в то время как отрицательная активность остаётся локализованной. В результате неочищенные области глобально привлекают робота, а препятствия лишь локально отталкивают его, предотвращая столкновения. Положения неочищенных областей и препятствий могут изменяться со временем, например, из-за движущихся препятствий или повторного загрязнения очищенных зон.

Ландшафт активности нейронной сети динамически адаптируется в ответ на изменяющиеся внешние входные данные от неочищенных областей, препятствий и внутреннего взаимодействия нейронов.

Следующая позиция робота, определяемая как p_n относительно текущей позиции робота p_c вычисляется по формуле:

$$p_n \leftarrow x_{p_n} = \max \{x_j + cy_j, j = 1, 2, \dots, k\} \quad (6)$$

где k – количество соседних с p_c нейронов, то есть – все возможные новые позиции робота, а c – положительная константа. Переменная x_j – нейронная активность j -го нейрона, вычисляемая по формуле (3). y_j – монотонно убывающая функция, зависящая от разницы текущего и будущего углов направления движения робота.

$$y_j = 1 - \frac{\Delta\theta_j}{\pi} \quad (7)$$

где $\Delta\theta_j \in [0, \pi]$ угол поворота между текущим и будущим направлениями движения. То есть, если робот продолжает движение в том же направлении, то $\Delta\theta_j = 0$, а в случае разворота $\Delta\theta_j = \pi$. Угол $\Delta\theta_j$ может быть получен, как:

$$\Delta\theta_j = |\theta_j - \theta_c| = |\text{atan2}(y_{p_j} - y_{p_c}, x_{p_j} - x_{p_c}) - \text{atan2}(y_{p_c} - y_{p_p}, x_{p_c} - x_{p_p})| \quad (8)$$

Таким образом робот перемещается в новую оптимальную позицию, новая позиция становится текущей и начинается поиск следующей оптимальной позиции. Данный процесс продолжается, пока вся область не будет полностью покрыта роботом.

Модификация метода

Ввиду того, что алгоритм пытается минимизировать количество поворотов путём введения штрафа, зависящего от угла поворота – робот часто выбирает траекторию, далёкую от оптимальной. А так как нейронная активность загрязнённых областей всегда находится на пике и друг от друга не отличается, то и существенного вклада в траекторию робота она не вносит. Для решения описанной проблемы в данной работе предлагается ввести вместо константного значения внешнего положительного входа E – градиент нейронной активности, зависящий от расстояния от некоторой грани рабочего пространства, как например:

$$I_i = \left\{ 1 - \frac{i}{\text{rows} - 1}, \quad \text{если загрязнение} \mid \{-E, \quad \text{если препятствие} \right\} \quad (9)$$

где i – это номер строки от 1 до rows. Описанный подход позволяет создать плавный градиент нейронной активности, благодаря чему робот делает выбор следующей позиции исходя из значения нейронной активности, а не исключительно из стоимости перемещения.

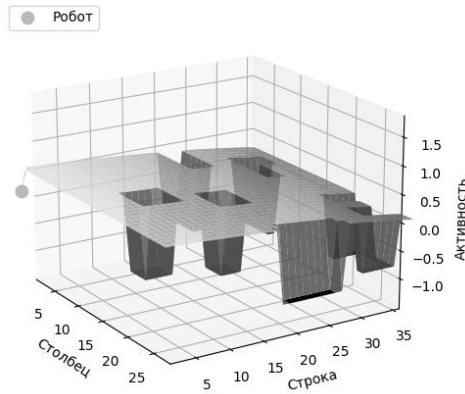


Рисунок 2. Карта градиентной нейронной активности

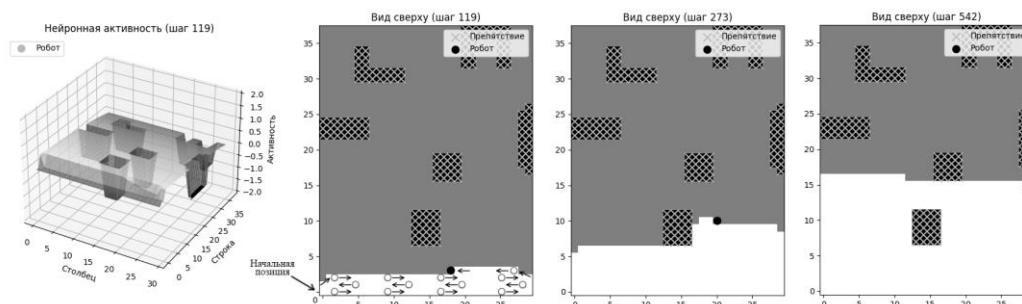


Рисунок 3. Траектории робота по градиентной нейронной активности

Введение градиента позволило роботу двигаться по карте по принципу бустрофедона, но у алгоритма остаются проблемы – из-за наличия латеральных связей нейроны, расположенные рядом с препятствиями или границей карты, имеют меньшую нейронную активность за счёт меньшего количества их окружающих нейронов. Это приводит к тому, что робот при определённых условиях сначала посещает нейроны, расположенные дальше от границ и препятствий.

Выводы

В данной работе проведён анализ метода полного покрытия (CPP) для автономных мобильных устройств, основанный на биологически вдохновлённой нейронной сети (BINN). Несмотря на теоретическую эффективность BINN, её практическая реализация выявила значительные ограничения, включая нестабильность траектории, локальные застревания и приоритет минимизации поворотов над глобальной оптимизацией маршрута. Это приводит к неоптимальному покрытию и увеличению общего пробега робота.

Для устранения указанных недостатков предложена модификация BINN, основанная на введении градиента нейронной активности, который формируется относительно границ рабочей зоны. Такой подход позволяет роботу учитывать не только стоимость изменения направления движения, но и следовать более систематизированной траектории, приближенной к классическому методу бустрофедона. Эксперименты показали, что использование градиента способствует улучшению качества покрытия и уменьшению числа лишних манёвров.

Однако модифицированный алгоритм сохраняет ряд проблем, связанных с неравномерностью распределения активности вблизи границ карты и препятствий, что приводит к нежелательной задержке в обработке краевых областей. Это указывает на необходимость дальнейших исследований, направленных на оптимизацию латеральных связей нейронов и более точное управление распределением активности.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Е.Ю. Минаев

Библиографический список

1. S. X. Yang, C. Luo A neural network approach to complete coverage path planning [Текст] / S. X. Yang, C. Luo // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. — 2004. — Vol. 34, № 1. — С. 718–725.
2. C. Luo, S. X. Yang A bioinspired neural network for real-time concurrent map building and complete coverage robot navigation in unknown environments [Текст] / C. Luo, S. X. Yang // IEEE Trans. Neural Netw. — 2008. — Vol. 19, № 7. — С. 1279–1298.
3. K. Chen, Y. Liu Optimal complete coverage planning of wall-climbing robot using improved biologically inspired neural network [Текст] / K. Chen, Y. Liu // In: Proc. IEEE Int. Conf. Real-time Comput. Robot. (RCAR). — Okinawa, Japan, 2017. — С. 587–592.

УДК 778.64

ОБЗОР АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.Р. Холодилина, А.С. Егоров, Н.А. Корнеев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Аддитивные технологии используются в различных отраслях промышленности, потому что позволяют использовать не только полимеры, но и металлы, а также композитные материалы, благодаря наличию различных способов получения конечного изделия. Ключевыми аддитивными технологиями являются: послойное наплавление (FDM – fused deposition modeling), селективное лазерное спекание (SLS – selective laser sintering), селективное лазерное наплавление (SLM – selective laser melting), стереолитография (SLA), цифровая обработка светом (DLP – Digital Light Processing) [1]. Каждая технология имеет те или иные преимущества для решения конкретного спектра задач.

Говоря о космической промышленности, следует выделить ряд требований, предъявляемых к конечному изделию:

1) Требования к механическим свойствам
Ключевыми требованиями являются устойчивость к вибрациям и ударным нагрузкам при запуске изделия и высокая прочность изделия в целом.

2) Требования к термоустойчивости
Изделие должно иметь широкий температурный диапазон и выдерживать резкие перепады температур без значительных деформаций и разрушений в структуре изделия.

3) Требования к радиационной стойкости
Изделие должно быть устойчиво к радиации, то есть материал не должен деградировать или выделять газы.

4) Масса изделия/конструкции
Изделие должно иметь наименьшую возможную массу для обеспечения заданного функционала.

5) Требования к электромагнитной совместимости изделия
Изделие не должно создавать помех для других устройств системы и экранировать внешние излучения.

6) Требования к надежности изделия
Изделие должно соответствовать заданным параметрам надежности.
Заявленные выше требования к изделию способны обеспечить технологии 3D-печати:

– SLS/SLM-технологии используются для спекания полимерных порошков и дают высокую точность изделия, что важно для деталей космической промышленности для обеспечения работоспособности, прочности и надежности изделия;

– SLA-технология позволяет получить точное и гладкое изделие, но в сравнении с DLP-технологией, которая дает аналогичные результаты, является более медленной [2];

– FDM-технология дает возможность получить менее точное изделие, чем предыдущие технологии, поэтому её следует применять для создания прототипов изделий и неотчетливых деталей в системе [2].

Такие методы 3D-печати позволяют выделить ряд преимуществ, актуальных для космической промышленности:

1) Гибкость проектирования: возможность создания сложных геометрий, которые невозможно или экономически более затратно получить традиционными методами;

2) Сокращение времени производства: ускорение создания прототипов изделия и выпуска мелких серий;

3) Экономия материалов: минимизация отходов за счет послойного нанесения, спекания/отверждения.

Учитывая важность и ответственность назначения космических изделий, возникает задача создания производственной линии на основе аддитивных технологий с минимальным участием человека для снижения влияния на качество изделия человеческого фактора, то есть возможных ошибок при производстве.

Концепция автоматизированной линии 3D-печати для космической промышленности базируется на аналоге компании BMW, которой уже на сегодняшний день удалось внедрить в своё производство автоматизированную производственную линию 3D-печати в автомобильной промышленности. Концепт инновационной производственной линии был создан в 2019 году. Сейчас она представляет собой систему, в которой полностью автоматизированные транспортные системы без водителя (FTS) полностью автоматически перевозят мобильные строительные камеры 3D-принтеров между модулями производственных линий IDAM. Машины управляются центральным блоком управления, который консолидирует все производственные данные с отдельных модулей линии для обеспечения максимальной производительности и качества. В ходе проекта были разработаны инновационные концепции для автоматизированной генерации данных для 3D-печати. Полностью автоматизированные модули теперь транспортируют металлический порошок на рабочие места, где они самостоятельно подготавливают материал. Постобработка изготовленных компонентов происходит на специально разработанных станциях, которые также полностью автоматизированы. Контроль качества готовых деталей осуществляется в процессе лазерной плавки с помощью датчиков, включая контроль выбросов из расплава с помощью CMOS-камеры и пирометра. Для соотнесения собранных данных с фактическим качеством деталей используются алгоритмы искусственного интеллекта. Это означает, что уже в процессе производства можно выявлять отклонения от нормы и оценивать качество компонентов [3]. На рис. 1 представлен один из модулей автоматизированной линии 3D-печати, задачей которого является сортировка деталей.



Рис. 1. Модуль сортировки в IDAM

Таким образом, для автоматизированной линии 3D-печати для космической промышленности следует выделить следующие модули/зоны:

- 1) Модуль загрузки печатных материалов (в данном модуле находятся емкости с порошками, жидкостями и другими веществами, используемыми в процессе 3D-печати);
- 2) Модуль печати (устройство для печати, то есть непосредственно 3D-принтер);
- 3) Модуль просушки/остановки изделия (в данном модуле изделие находится в камере, поддерживающей температуру, для полного затвердевания и просушки изделия. Следует обеспечить плавное перемещение изделия в данную зону во избежание возникновения дефектов);
- 4) Модуль постобработки изделия (в данном модуле проходит последующая обработка изделия для получения заданных форм, точности и других характеристик);
- 5) Модуль сканирования/контроля (в данном модуле проходит проверка изделия на наличие несоответствий/дефектов. В случае возникновения исправимых дефектов изделие может быть вновь перемещено в модуль постобработки);
- 6) Модуль упаковки (в данном модуле происходит упаковка изделия для его последующей транспортировки в необходимую локацию производства).

Цикл производства изделия начинается с его проектирования в CAD-системе, то есть формирования детальной 3D-модели изделия и последующей загрузки полученного файла в компьютерную систему, установленную на автоматизированной линии 3D-печати.

Таким образом можно получить следующую структурную схему производственной линии 3D-печати для космической промышленности, представленную на рис.2.

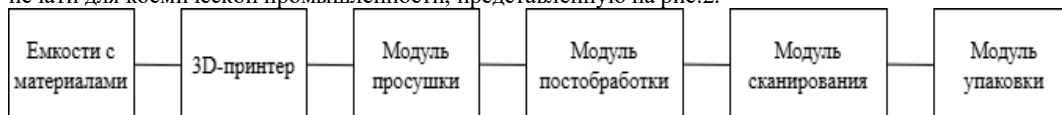


Рис. 2. Структурная схема автоматизированной линии 3D-печати

Данные модули могут быть расположены непосредственной подряд «в линию», однако их также можно расположить, исходя из параметров производственного пространства, а необходимые перемещения изделия будут осуществлять мобильные роботы или роботы-манипуляторы, перемещающиеся по рельсам. Принятие решения о передвижении изделия в производственном цехе напрямую зависит от материальных ресурсов производства и последующих экономических выгод.

Выбор кинематики 3D-принтера зависит от предъявляемых требований, описанных ранее, и применяемой технологии печати. Учитывая это, можно сформировать требования к конструкции печатного агрегата:

- Жесткость конструкции (чтобы избежать вибраций, которые могут привести к дефектам изделия);
- Возможность «быстрой» смены рабочей области (чтобы оперативно перенастраивать автоматизированную линию на производство другого изделия);
- «Хорошая» масштабируемость для точности изделия.

Далее необходимо описать алгоритм работы автоматизированной линии, который состоит из следующих этапов:

- 1) Проектирование изделия в CAD-системе;
- 2) Выгрузка файла с моделью изделия на компьютер автоматизированной линии;
- 3) Проверка наличия необходимых материалов для печати в емкостях;
- 4) Проверка печатающих инструментов (например, экструдера, источников УФ-излучения и др. в зависимости от выбранной технологии 3D-печати);
- 5) Калибровка печатающих инструментов;
- 6) Печать изделия;

- 7) Перемещение изделия в модуль просушки;
- 8) Постобработка изделия (при необходимости);
- 9) Проверка изделия с помощью сканирования (обнаружение наличия дефектов);
- 10) Упаковка изделия (для последующей транспортировки);
- 11) Транспортировка/установка изделия в устройство/систему/агрегат.

Следует отметить, что не каждый этап в приведенном алгоритме является обязательным, то есть какие-то этапы в зависимости от изготавливаемого изделия можно исключить. Например, если согласно отработанной технологии 3D-печати лопасти двигателя, не требуется постобработка изделия, то оно минует данный этап. В дополнение, количество циклов проверки печатающих инструментов и их калибровки устанавливается регламентом на производстве и контролируется автоматизированными системами управления. Для создания подробной блок-схемы алгоритма работы автоматизированной линии необходимо также определиться с системой управления и мониторинга процесса изготовления, а также последующей проверки изделия.

На сегодняшний день в мире информационных технологий лидирует искусственный интеллект (ИИ), который как технология включает в себя машинное обучение (МО) и системы технического зрения (СТЗ) [4]. Данные технологии также необходимо применить в автоматизированной линии 3D-печати для космической промышленности.

ИИ можно использовать на протяжении всего производственного процесса изделия. ИИ будет контролировать параметры печати с помощью информации, получаемой с датчиков, например, скорость, температуру и др, а также состояние печатающих инструментов, например, при перегреве автоматически останавливать процесс для охлаждения. Таким образом, исключаются возможные дефекты изделия.

С помощью МО можно подбирать наиболее оптимальные для выбранной геометрии комбинации настроек печатающего 3D-принтера.

СТЗ рекомендуется использовать для этапа сканирования изделия и этапа печати изделия, чтобы обнаружить дефекты изделия и контролировать параметры печати. Более того, СТЗ необходимо снабдить двухсторонним каналом связи с печатающим 3D-принтером, чтобы система управления могла оперативно обнаружить проблемы и самостоятельно скорректировать параметры печати в реальном времени. В зависимости от типа дефекта, например, несвоевременное застывание материала или расслоение структуры объекта, СТЗ отправляет сигнал 3D-принтеру на коррекцию параметров печати, например, снижение скорости печати и далее дефект устраняется с процессом нанесения следующих слоев.

Таким образом, проанализировав технологии, которые нужно использовать для управления автоматизированной линией 3D-печати, и определив этапы работы линии, составляется алгоритм работы линии, представленный на рис.3.

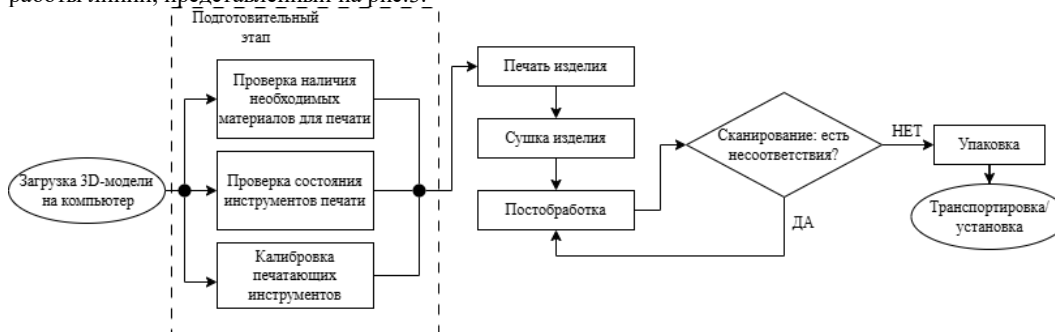


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы автоматизированной линии 3D-печати

Алгоритм на рис.3 демонстрирует случай, когда полученный дефект изделия можно исправить постобработкой. Благодаря МО можно создать классификатор для возможных дефектов изделия и, в зависимости от типа дефекта – принимать меры.

Автоматизация 3D-печати в космической промышленности открывает новые возможности для повышения эффективности производства и качества изделий. Одним из ключевых преимуществ автоматизированной линии 3D-печати является значительное снижение производственных затрат, которое достигается за счет:

- Уменьшения количества ручного труда, что снижает расходы на персонал;
- Оптимального расхода материалов благодаря точному изготовлению;
- Исключения необходимости в дорогостоящих оснастках и пресс-формах, которые требуются при традиционном производстве.

В дополнение, автоматизированная 3D-печать сокращает сроки производства деталей. В отличие от классических методов, таких как литье или механическая обработка, аддитивные технологии позволяют изготавливать сложные конструкции в течение нескольких часов или дней, а не недель или месяцев. Это особенно важно для космической отрасли, где разработка новых компонентов зачастую требует длительного тестирования и сертификации. Также Автоматизация процессов 3D-печати позволяет свести к минимуму участие человека на всех этапах производства. Это особенно актуально в условиях космоса, где автономные системы должны работать без постоянного контроля операторов. Основные преимущества этого подхода включают: снижение вероятности человеческих ошибок при изготовлении и сборке деталей и возможность круглосуточной работы без необходимости сменных графиков.

Несмотря на очевидные преимущества, автоматизация 3D-печати сталкивается с рядом сложностей и технических ограничений:

- 1) Контроль качества и дефектов
 - Автоматизированные системы должны обеспечивать строгий контроль качества деталей, поскольку даже космическая промышленность требует надежности и точности;
 - Необходимы передовые методы неразрушающего контроля, например, лазерное сканирование.
- 2) Ограничения в размерах и материалах
 - Современные 3D-принтеры имеют ограничения по размерам деталей, что требует разработки секционной сборки сложных конструкций;
 - Не все материалы, используемые в традиционной космической промышленности, могут быть адаптированы для аддитивного производства.
- 3) Сложность программного обеспечения и управления
 - Создание эффективных алгоритмов управления автоматизированными линиями требует значительных вычислительных ресурсов и высокой точности моделирования;
 - Необходимость интеграции с роботизированными манипуляторами и системами искусственного интеллекта для оптимизации работы.

Таким образом, автоматизированная 3D-печать обладает огромным потенциалом для космической промышленности, но требует дальнейших разработок в области надежности, масштабируемости и интеграции с другими технологиями. Решение этих вызовов позволит создать полностью автономные производственные линии.

Научный руководитель – к.п.н., доцент В. В. Тимченко

Библиографический список

1. Стеганцева, М. И. Аддитивные технологии / М. И. Стеганцева, Т. А. Сахнович // Инженерная экономика : Сборник материалов 80-й студенческой научно-технической конференции и 22-й международной научной-технической конференции, Минск, 23–25 апреля 2024 года. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2024. – С. 377-382.
2. Технология FDM печати: метод послойного наплавления в 3D моделировании [Электронный ресурс] // Habr; URL: <https://habr.com/ru/companies/top3dshop/articles/822743/> (дата обращения: 26.02.2025).
3. BMW создала полностью автоматизированную линию металлической 3D-печати в Обершляйхайме [Электронный ресурс] // Industry3D; URL: <https://industry3d.webisgroup.ru/at-news/bmw-sozdala-polnostyu-avtomatizirovannuyu-liniyu-metallicheskoj-3d-pechati-v-obershlyayshayme/> (дата обращения: 1.03.2025).
4. Кузнецов, Н. О. Использование нейронных сетей в аддитивном производстве. Влияние на человека / Н. О. Кузнецов // Интеллектуальные технологии в эргономике и когнитивных науках : Сборник материалов всероссийской научно-практической онлайн-конференции с международным участием, Брянск, 04–06 июня 2024 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2024. – С. 189-192.

УДК 681.5

УСТРОЙСТВО И КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ПРОТЕЗА КОЛЕННОГО СУСТАВА

Д. А. Авдонин^{1,2}, В. А. Патлахов², Н. С. Слободзян^{1,2}

¹. ЦНИИ РТК

². Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Введение

Протезирование является крайне востребованной областью медицины, что подразумевает необходимость создания недорогого, многофункционального и удобного протеза. С одной стороны, это связано с увеличением числа травм и заболеваний, требующих замены сустава, а с другой — с развитием технологий и материалов, позволяющих создавать более совершенные и функциональные протезы.

В настоящее время протезирование является одним из наиболее эффективных методов восстановления функции нижней конечности после травм и заболеваний опорно-двигательного аппарата. Применение современных протезов позволяет пациентам вернуться к активному образу жизни, улучшить качество жизни и снизить зависимость от посторонней помощи. В данной статье представлен обзор устройства и конструкции находящегося в разработке экспериментального образца протеза коленного сустава, рассмотрены основные компоненты и принципы работы этих устройств.

Кинематика

Перед тем, как рассматривать конструкцию непосредственно протеза, рассмотрим кинематику опорно-двигательного аппарата человека.

Амплитуда вращательного движения в коленном суставе значительно преобладает над остальными видами движений [1]. При этом само вращательное движение является сложным и происходит во трех плоскостях:

- в сагиттальной плоскости:

- сгибание:
 - до 120° при разогнутом бедре;
 - до 140° при согнутом бедре;
 - до 160° , когда колено согнуто пассивно;
 - разгибание до $10-15^\circ$;
- во фронтальной плоскости: отведение-приведение с общей амплитудой около $5-10^\circ$, большая часть из которой приходится на отведение;
- в горизонтальной плоскости:
 - ротация внутрь до 10° при сгибании на угол 30° и до 15° при полном сгибании;
 - ротация наружу до 30° при сгибании на угол 30° и до 50° при сгибании на 120° .

Информация о движении коленного сустава во фронтальной плоскости разнится, но все источники сходятся на факте того, что даже если оно и существует, то не оказывает существенного влияния на кинематику всей нижней конечности [2].

Кинематическая схема в сагиттальной и фронтальной плоскостях представлена на рис. 1 [3].

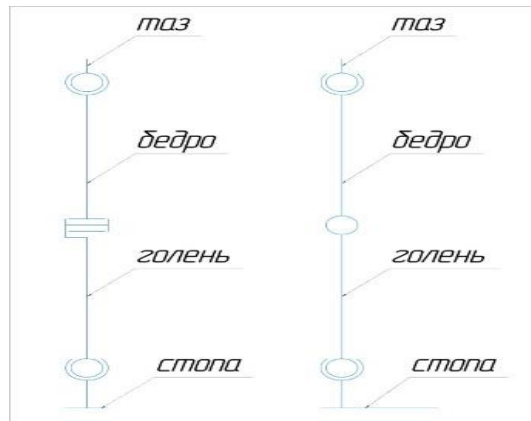


Рис. 1. Кинематическая схема

Как видно из рисунка, нога человека содержит три кинематические пары: две сферические (тазобедренный сустав, голеностопный сустав) и одну вращательную (коленный сустав) [4].

Устройство

Обобщённая функциональная схема представлена на рисунке 2.

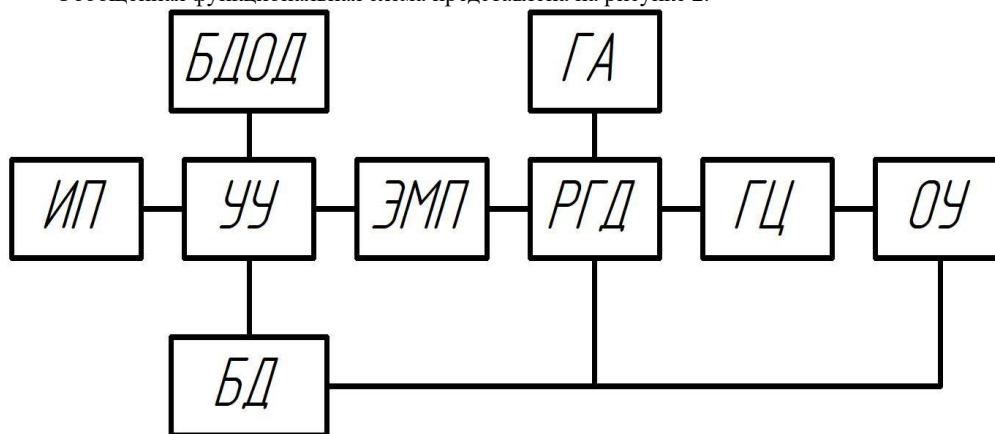


Рис. 2. Обобщённая функциональная схема протеза

Где:

- ИП – источник питания;
- УУ – устройство управления;
- БДОД – блок дистанционного обмена данными;
- БД – блок датчиков;
- ЭМП – электрохимические преобразователи;
- РГД – регулируемые гидроссели;
- ГА – гидроаккумулятор;
- ГЦ – гидроцилиндр;
- ОУ – объект управления.

Конструкция и принцип работы

Прежде всего рассмотрим общую конструкцию протеза. Функциональная схема протеза представлена на рисунке 3.

Общий принцип работы протеза таков: с помощью модуля беспроводной связи с приложения, установленного на смартфон пользователя, поступают настройки на плату управления, которая осуществляет управление гидродвигателями. Питание всей электроники происходит от сменных аккумуляторов. Электродвигатели соединены валами с переменными гидравлическими дросселями щелевого типа, каждый из которых управляется независимо. Положение гидродросселей контролируется датчиками углового положения, соединенными обратной связью с платой управления. Жидкость циркулирует между гидроцилиндром двустороннего действия и гидроаккумулятором. Гидроцилиндр, корпус протеза и крепление к голени образуют треугольник, благодаря чему усилие на шарнир передается через рычаг. Значение положения шарнира коленного сустава также фиксируется датчиком углового положения, а давление, которое оказывает пользователь на протез, фиксируется тензодатчиком. Положение протеза в пространстве определяется с помощью БИМС. Вся собранная информация поступает на плату управления и оттуда передается в приложение, где автоматически записывается в файлы.

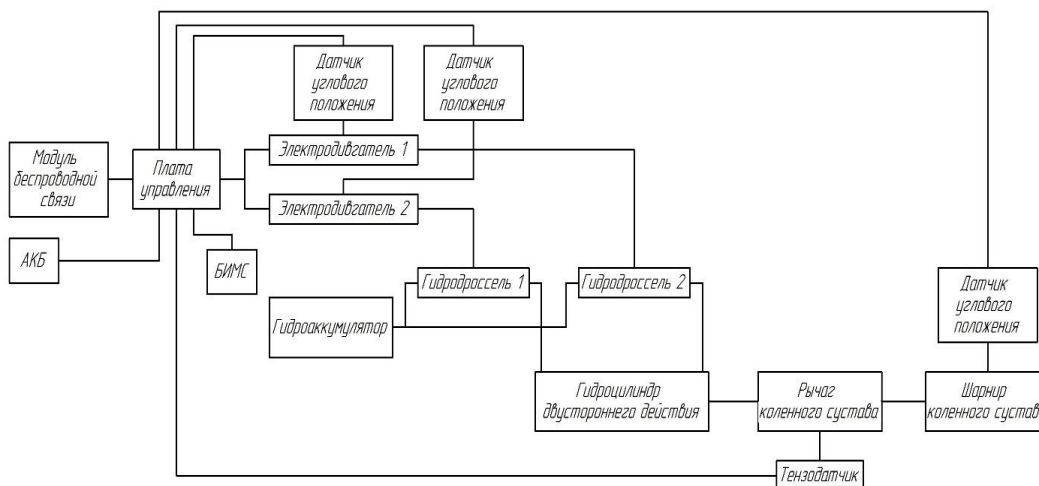


Рис. 3. Функциональная схема протеза

Схематичное изображение протеза в крайних положениях относительно голени представлена на рисунке 4.

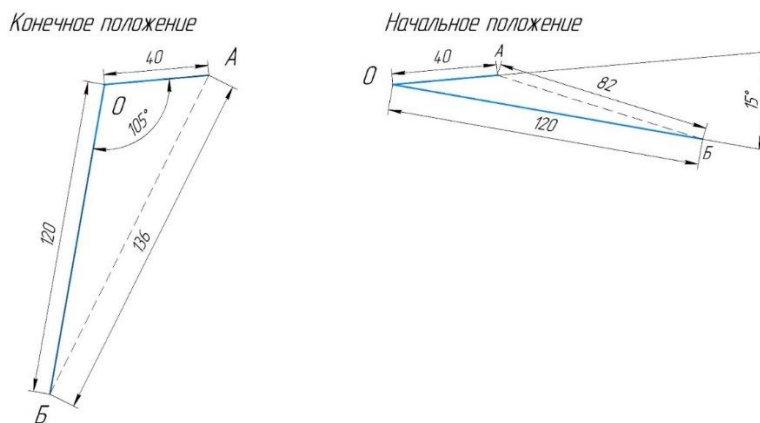


Рис. 4. Крайние положения протеза

Гидравлическая часть

Далее рассмотрим гидравлическую часть системы, схематичное изображение которой представлено на рисунке 4 [5].

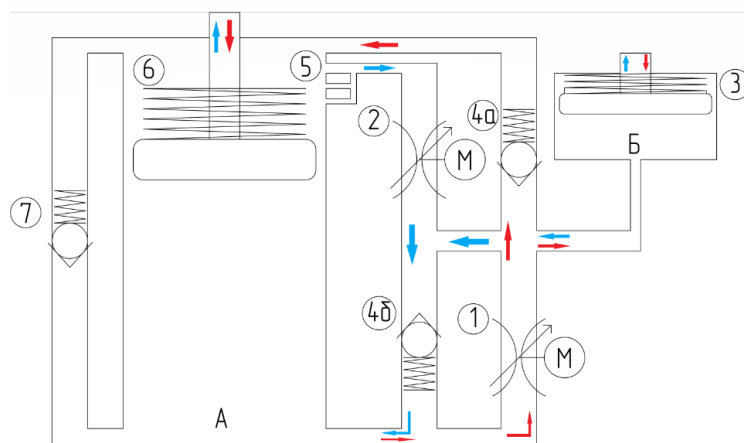


Рис. 5. Схема гидравлической части привода

Принцип работы гидросистемы следующий. В положении максимального сгиба протеза гидравлическая жидкость, находящаяся в полости гидроаккумулятора Б и запасает энергию в сжатой пружине 3. При разгибании протеза жидкость начинает истекать по через обратный клапан 4б в полость поршня А, выдвигая его. Из полости штока гидроцилиндра А жидкость истекает через гидродроссель 2 и обратный клапан 4б в полость поршня. Для мягкой остановки выдвигения предусмотрены дроссель 5 и пружина 6. Для фиксации протеза в нужном положении гидродроссели 4а и 4б полностью перекрываются.

При сгибании коленного сустава жидкость из полости гидроцилиндра А перетекает через гидродроссель 1 частично в гидроаккумулятор, частично через обратный клапан 4а в полость штока, также область поршня соединена с областью штока через обратный клапан 7.

Скорость истечения жидкости в обоих случаях регулируется с помощью изменения положения плунжеров переменных гидравлических дросселей щелевого типа 1 и 2.

Электронно-информационная часть

Перейдём к электро-информационной части. Она представляет из себя аккумуляторную батарею, плату управления, Bluetooth-модуль для обмена данными с приложением, электромеханические преобразователи (электродвигатели) и комплект датчиков, обеспечивающих сбор экспериментальных данных.

Остановимся подробнее на датчиках.

Датчики углового положения необходимы для точного позиционирования валов двигателей и соединённых с ними плунжеров переменных гидравлических дросселей, что обеспечивает качественное управление истечением жидкости и работу протеза. Также датчик угла установлен в самом шарнире коленного сустава и позволяет определить положение протеза относительно голени. Эта информация является потенциально полезной при анализе результатов экспериментального использования.

Тензодатчик необходим для точного определения нагрузки, которую испытывает протез при различных режимах ходьбы и положении в пространстве. Эта информация также является потенциально полезной при анализе результатов экспериментального использования.

БИМС служит для определения положения протеза относительно начала координат. Эта информация, вкупе с данными с других датчиков, позволит определять точное положение протеза в любой момент времени, что позволит как проконтролировать качество управления протеза, опираясь на конкретные значения, так и определить положения с максимальными нагрузками и их точное значение, что является очень важной информацией для последующего анализа и устранения недочётов.

Заключение

В данной статье были рассмотрены основные компоненты экспериментального образца протеза коленного сустава, их функциональность. Дальнейшие исследования в этой области: планируется завершение разработки экспериментального образца, его создание, тестирование, выявление недостатков и их устранение, разработку ещё более совершенных и функциональных протезов, а также на изучение долгосрочных результатов их применения. Это позволит улучшить качество жизни пациентов, перенесших замену коленного сустава, и снизить нагрузку на систему здравоохранения.

УДК 004.5:616.78

ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКИМИ РЕАБИЛИТАЦИОННЫМИ ЭКСОСКЕЛЕТАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

А. А. Мухитов¹, Н. И. Авдеев¹, Д. И. Чекулаев²

Введение

Современные медицинские экзоскелеты нижних конечностей стали перспективным направлением в реабилитации пациентов с двигательными нарушениями, вызванными травмами и неврологическими заболеваниями. Для достижения интуитивного управления экзоскелетом применяется биологическая обратная связь (БОС), которая позволяет регистрировать физиологические сигналы пациента. Использование БОС в задачах контроля движений осуществляется посредством сбора и обработки таких биосигналов, как электромиографических (ЭМГ), электроэнцефалографических (ЭЭГ), а также показателей, полученных от инерциальных сенсоров (IMU – Inertial Measurement Unit). Такой набор данных позволяет адаптировать экзоскелет под индивидуальные особенности человека для более успешной реабилитации.

В основе управления медицинскими экзоскелетами с применением биологической обратной связи лежат три ключевых принципа. Во-первых, требуется высокая точность регистрации биосигналов, чему способствуют современные сенсоры и алгоритмы фильтрации. Во-вторых, важнейшим фактором является корректная интерпретация полученных данных с последующей их трансформацией в управляющие команды для экзоскелета. Наконец, система должна оперативно адаптироваться к изменениям состояния пациента, используя передовые технологии машинного обучения и прогнозирующие модели.

В современных БОС-системах имеет место применение комбинации двух методов: ЭМГ и ЭЭГ [1]. При сочетании этих двух типов сигналов возможность успешного предсказания намерения пациента возрастает в разы.

Методы управления медицинскими экзоскелетами с применением БОС

На сегодняшний день разработано несколько методов управления экзоскелетами на основе БОС. Один из наиболее распространенных подходов включает применение ЭМГ-сигналов, регистрируемых с поверхностных электродов, прикрепленных к коже пациента. Такой метод позволяет анализировать сокращения мышц и использовать полученные данные для управления движением экзоскелета.

Другой метод основан на использовании ЭЭГ, при котором считываются сигналы головного мозга, связанные с моторным воображением или движением конечностей. Такие интерфейсы "мозг-компьютер" позволяют пациентам с тяжелыми двигательными нарушениями управлять экзоскелетом с помощью мысленных команд. Однако данный метод имеет ограничения, связанные с высокой вариабельностью сигналов и необходимостью обучения пользователя. Существуют два вида подобных интерфейсов: инвазивный и неинвазивный. Для более детального отслеживания работы нейронов используется инвазивный подход, но в то же время он является дорогостоящим и требующим куда более длительного наблюдения и анализа, нежели неинвазивные системы.

Хорошо себя зарекомендовал метод с обработкой данных, получаемых с IMU. IMU – инерциальный измерительный модуль, который состоит из различных датчиков, включая акселерометры, гироскопы и, в некоторых случаях, магнитометры. Эти датчики позволяют измерять угловые скорости, линейные ускорения и иногда ориентацию устройства в пространстве. В контексте медицинского реабилитационного активного экзоскелета IMU используется для отслеживания движений суставов, определения положения конечностей и оценки динамики движений пациента [2]. Однако из-за ограниченной точности гироскопов, которые склонны к накоплению ошибок (дрейфу), и чувствительности акселерометров к шумам внешней среды необходимо применять способы фильтрации для устранения шума [3, 4].

Методы и алгоритмы обработки ЭМГ-сигналов

Выделение информативного управляющего сигнала из ЭМГ выполняется за счёт ряда современных алгоритмов. Наиболее распространённым из них считается вычисление среднеквадратичного значения (RMS – Root Mean Square) в скользящем временном окне. Этот метод позволяет быстро определить общий уровень активности конкретной группы мышц.

Однако алгоритм вычисления значения RMS не обладает достаточной точностью для анализа сложных движений. С этой целью используется более детальный анализ с применением спектральных характеристик ЭМГ-сигнала. Основными способами анализа выступают:

- Преобразование Фурье. Происходит сегментирование сигнала на составляющие частоты, чтобы увидеть какие частоты доминируют в активности мышц.
- Вейвлет-преобразование. Анализ сигнала в двух областях сразу: частотной и временной. Позволяет анализировать кратковременные мышечные сокращения.
- Оценка мощности спектра. Даёт возможность оценки какая доля сигнала приходится на разные частоты.

Применение машинного обучения в управлении экзоскелетами подразделяется в основном на скрытые марковские модели (HMM – Hidden Markov Models) [8] и свёрточные нейронные сети (CNN – Convolutional Neural Networks) [8]. HMM представляет собой инструмент для моделирования последовательностей данных, в которых, основываясь на свойстве Маркова, текущее состояние зависит только от предыдущего. Анализируя последовательность мышечных сигналов, этот подход помогает прогнозировать следующее движение пользователя. Исследования показывают, что применение HMM в анализе ЭМГ-сигналов

позволяет достичь точности предсказания движений до 85% при использовании индивидуальной калибровки модели. CNN, в свою очередь, обрабатывают ЭМГ-сигналы, выделяя ключевые паттерны. CNN обучаются на датасетах с более чем миллионом образцов, достигая точности 95–98% [10, 11, 12] и обеспечивая задержку менее 100 мс. При использовании гибридных моделей, объединяющих CNN и рекуррентные нейронные сети (RNN – Recurrent Neural Networks) [11], точность распознавания сложных паттернов движений может достигать 98,5%, а задержка снижаться до 80 мс [12], что особенно важно для реального времени управления экзоскелетом.

Методы и алгоритмы обработки ЭЭГ-сигналов

Применение специализированных методов обработки данных с ЭЭГ обуславливается сложной структурой сигналов нейронов, наличием в них артефактов и различных видов физиологических (биологических) шумов: зрительных (движение глаз, фокусировка на объектах), глоскинетических (глотание, смыкание связей), кардиогенных (сердце), респираторных (дыхание, кашель), терморегулярных (пот), шумов от движения тела (простые движения: тремор, миоклонус, комплексные движения: смена положения тела, движение головы). К нефизиологическим относятся помехи устройства (энцефалографа/компьютера), помехи от внешней среды (50–60 Гц), помехи от уже имеющихся у пациента имплантов. Для минимизации и устранения артефактов применяются полосовые фильтры с диапазоном 0,5–40 Гц, что позволяет удалять низкочастотные дрейфы и высокочастотные шумы. Также применяются методы независимого компонентного анализа (ICA - Independent Component Analysis) для эффективного разделения смешанных сигналов и адаптивная фильтрация, которая позволяет динамически подавлять артефакты в реальном времени [6, 7].

После предварительной фильтрации важно извлечь информативные признаки из ЭЭГ-сигнала для дальнейшей классификации. Для этого применяется быстрое преобразование Фурье, которое позволяет анализировать частотный спектр сигнала и выделять доминирующие ритмы, такие как альфа (8–12 Гц), бета (13–30 Гц) и гамма (30–100 Гц). Вейвлет-преобразование обеспечивает анализ сигнала одновременно во временной и частотной областях, что особенно полезно для детектирования кратковременных изменений [7]. Кроме того, спектральная плотность мощности оценивает распределение энергии сигнала по частотам, помогая идентифицировать изменения в активности мозга, связанные с намерениями или состояниями движения [7].

Машинное обучение, как и в случае с ЭМГ, преобразует полученные признаки в команды управления приводами экзоскелета. Методы машинного обучения:

- Метод опорных векторов (SVM - Support Vector Machine). Эффективен для бинарной классификации состояний мозга, например, определения намерения движения левой или правой ноги [8].
- Рекуррентные нейронные сети (RNN – Recurrent Neural Networks) с механизмом долгой краткосрочной памяти. Способны учитывать временные зависимости в данных, предсказывая последовательности движений на основе предыдущих состояний [8].
- CNN. Улучшают точность классификации сложных паттернов, автоматически выделяя временные и пространственные особенности из ЭЭГ-сигналов [8].

Преобразования общих пространственных шаблонов (CSP - Common Spatial Pattern) в сочетании с линейным дискриминантным анализом (LDA - Linear Discriminant Analysis) позволяет достичь точности классификации от 71,7% до 83,3% в офлайн-режиме [9]. При переходе к онлайн-режиму (система обрабатывает сигнал сразу после его поступления от датчиков) точность может достигать 87–91% при индивидуальном подборе частотных диапазонов и использовании комбинации методов LDA, SVM и нейронных сетей [9].

Методы и алгоритмы обработки данных IMU-датчиков

Основным инструментом обработки сигналов с инерциальных датчиков является фильтр Калмана [3], который позволяет устранять дрейф гироскопов и минимизировать ошибки измерений. В дополнение к калмановскому фильтру могут применяться адаптивные алгоритмы шумоподавления, такие как комплементарный фильтр и методы машинного обучения, которые способны корректировать ошибки за счёт анализа исторических данных [3, 4]. Чтобы повысить точность управления экзоскелетом, IMU-датчики коррелируют с ЭМГ и ЭЭГ. Такой подход называют гибридным.

Сравнение методов управления

Описанные методы управления роботизированными устройствами посредством БОС (в нашем случае является экзоскелет) можно разбить на 3 группы:

1) Биологические сигналы

Включает в себя ЭМГ и ЭЭГ обработку сигналов с последующей трансформацией в управляющие команды для роботизированных систем [12]. Данная группа является высокоточной и индивидуально адаптивной для пациента, но требует предварительного обучения, сложных алгоритмов фильтрации сигналов и классификации паттернов. Исследования показали изменение точности распознавания воспроизведения образа движения от 71,7% до 91% в зависимости от используемого алгоритма машинного обучения [9]. В то же время при использовании CNN точность ЭМГ-управления может достигать до 98% [11, 14, 16]. В таблице 1 предоставлено краткое сравнение применения двух методов, составленное на основе существующих научных работ [12]. Однако в перспективе метод управления

посредством сигналов мозга лучше, поскольку он позволяет управлять устройством даже полностью парализованным пациентам, в то время как ЭМГ требует активности мышц. Современные алгоритмы ИИ, включая глубокие нейросети, уже повышают точность ЭЭГ-управления до 91%, а с развитием инвазивных нейроинтерфейсов точность и стабильность возрастут [17]. Будущие интерфейсы мозг-компьютер и искусственные нейроны обеспечат мгновенную реакцию экзоскелетов на мысли пользователя, делая их более интуитивными и универсальными [18]. Всё же лучшим вариантом является одновременное использование двух подходов в достижении высокого результата управления, высокой точности и высокой стабильности [12].

Таблица 1. Сравнение методов управления на основе биосигналов

Критерий	ЭЭГ-управление	ЭМГ-управление
Точность предсказания движений	71,7% - 91%	до 98%
Задержка обработки сигнала	Выше (из-за необходимости сложной обработки)	Меньше вычислительной нагрузки
Требования к подготовке пользователя	Требуется обучение и привыкание	Необходимо правильное расположение электродов
Надежность сигнала	Чувствительность к шумам, артефактам	Меньше шумов, чем у ЭЭГ
Гибкость в адаптации к пользователю	Высокая адаптация в перспективе за счёт нейропластичности мозга	Легко адаптируется к индивидуальным движениям
Сложность обработки данных	Сложные алгоритмы обработки	Спектральный анализ, машинное обучение
Стоимость оборудования	Высокая стоимость за счёт ЭЭГ-гарнитуры и специализированного ПО	Стоимость ниже, чем у ЭЭГ. Компактные ЭМГ-датчики.

2) Интуитивное управление на основе кинематических сенсоров

Предполагает использование инерциальных датчиков (IMU) и датчиков давления, встроенных в подошву экзоскелета [18]. Эти методы позволяют реализовать автоматическую подстройку под движения пользователя без необходимости в активном управлении. Их преимущества – низкая задержка и простота использования, однако такие системы менее адаптивны для пациентов с серьезными двигательными нарушениями, так как требуют минимальной остаточной подвижности. Интуитивное управление с использованием IMU и датчиков давления требует остаточной подвижности, поэтому не подходит для полностью парализованных пациентов. Метод чувствителен к изменениям походки и условий среды, а также подвержен ошибкам из-за дрейфа сенсоров и неравномерного распределения давления. Кроме того, он реагирует на движение, а не предсказывает его, что снижает плавность управления экзоскелетом. Для повышения точности этот метод лучше комбинировать с ЭЭГ или ЭМГ-управлением.

3) Гибридные системы управления

Включает в себя сочетание БОС и IMU для повышения точности, стабильности и адаптивности управления экзоскелетом [18]. Такой подход сочетает физиологические сигналы и кинематические данные, что позволяет значительно улучшить предсказуемость и синхронизацию движений. БОС фиксирует намерения пользователя посредством регистрации нейромышечной активности (ЭМГ) или активности головного мозга (ЭЭГ), обеспечивая возможность управления даже при ограниченной двигательной способности. В то же время IMU (акселерометры, гироскопы, магнитометры) контролируют фактическое выполнение движения, корректируя траекторию экзоскелета в режиме реального времени [19].

Примеры экзоскелетов с применением БОС

Изучение особенностей существующих экзоскелетов позволяет выявить наиболее эффективные решения для конкретных категорий пациентов, а также определить направления дальнейшего развития технологий управления. В таблице 2 предоставлена краткая характеристика по 4 зарекомендовавшим себя устройствам с описанием направленности их применения [20-24].

Таблица 2. Краткая характеристика реализованных медицинских экзоскелетов

Экземпляр/ Характеристика	Производитель (Страна)	Вес экзоскелета (+аккумулятор) (кг)	Время автономной работы	Применение
HAL (Hybrid Assistive Limb)	Cyberdyne Inc. (Япония)	23 (+10)	2,5	Реабилитация пациентов с инсультом и травмами спинного мозга

ReWalk	ARGO Medical Technologies (Израиль)	25 (+2,3)	3	Передвижение пациентов с нижним парапарезом по всем поверхностям (пандусы, лестницы)
EksoGT	Ekso Bionics (США)	21,4 (+1,4)	4	Обучение пациентов ходьбе и переносу веса тела
Indego	Parker Hannifin (США)	12	4	Реабилитация пациентов с ПСМТ
ExoAtlet II	ExoAtlet (Россия)	23	4-8	Реабилитация пациентов с последствиями травм и заболеваний спинного мозга, инсультов, ДЦП
ExoAtlet Bambini		15	4	

Каждый из приведённых примеров выделяется своей уникальной особенностью. Первым из них выступает экзоскелет, предназначенный для пожилых людей и инвалидов HAL (Hybrid Assistive Limb). Данное устройство помогает снизить тяжесть болевого синдрома, экзоскелет использует нейроинтерфейс с обработкой биоэлектрических сигналов для предсказания намерений пользователя, что позволяет осуществлять более естественные движения [20-21, 24].

Экзоскелет ReWalk израильского производства оснащён инерционными датчиками, определяющими наклон пациента. Данные о наклоне туловища пациента отправляются на приводы ног экзоскелета, что приводит его в движение.

Продукт американской компании Ekso Bionics под названием EksoGt, оснащённый интерфейс-программно-аппаратным комплексом Variable Assist с динамической регулировкой мощности от 0% до 100% [20, 21]. Данная возможность позволяет адаптировать устройство под биологические особенности разных пациентов. Также стоит отметить продолжительное время автономной работы экзоскелета, так как он вмещает в себя два аккумулятора по 4 часа работы каждый. В дополнение ко всему, EksoGT способен разгружать вес пациента в положении стоя [20-21, 24].

Для экзоскелета Indego отличительной особенностью является его небольшой вес по сравнению с предыдущими экземплярами. Вес в 12 кг позволяет обеспечить пациента большей мобильностью, лёгким преодолением пандусов и лестниц, а также Indego прост в настройке [20-21, 24].

Экзоскелет ExoAtlet от российской одноимённой компании ExoAtlet изготавливает свои устройства как для взрослых пациентов, так и для детей. Представлены 2 версии, использующие БОС в процессе реабилитации: ExoAtlet II и ExoAtlet Bambini (детский). Оба устройства оснащены 12-канальной интегрированной функциональной электростимуляцией, позволяющей стимулировать мышцы пациента одновременно с движением приводов экзоскелета [25-27]. Посредством так называемого режима инициации шага система улавливает попытки пациента осуществить шаг и поддерживает его движение, помогая развивать самостоятельность в передвижении [26].

Также существует ещё одна реализация экзоскелета BCI-Eхо с управлением посредством нейроинтерфейса от компании Neuralink предпринимателя Илона Маска. Какой-то конкретной информации об этом устройстве нет. Известно только одно, что метод нейроинтерфейса является инвазивным, что в перспективе имеет куда больший потенциал в точности и естественности управления, но несёт за собой обременения в лице хирургического вмешательства в организм человека.

Описанные в этом параграфе экзоскелеты имеют как свои уникальные особенности и преимущества, так и явные недостатки. Основными недостатками современных экзоскелетов являются высокая стоимость, которая делает их недоступными для большинства пациентов без финансовой поддержки со стороны медицинских учреждений или государственных программ, а также ограниченная адаптивность – многие модели требуют определенного уровня остаточной двигательной активности, что исключает их использование людьми с полной парализацией. Вес конструкции также может быть препятствием для длительного использования, особенно в бытовых условиях.

Заключение

Развитие медицинских экзоскелетов с применением биологической обратной связи представляет собой одно из перспективных направлений в области реабилитации пациентов с двигательными нарушениями. В ходе анализа существующих методов управления экзоскелетами были рассмотрены ключевые подходы, включающие в себя обработку ЭМГ, ЭЭГ и данных с IMU. Выявлено, что комбинированное использование нескольких типов биосигналов позволяет достичь более высокой точности предсказания движений и адаптации системы к индивидуальным особенностям пациента.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Н. Г. Яковенко

Библиографический список

1. Гордлеева С. Ю. и др. Разработка аппаратно-программного комплекса по управлению роботизированными устройствами посредством биоэлектрических сигналов мозга и мышц // Наука и инновации в медицине. – 2016. – №. 3. – С. 77-82.
2. Горохова Н. М., Головин М. А., Чежин М. С. Методы управления протезами верхних конечностей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19. – №. 2. – С. 314-325.
3. Понятский В. М., Зенов Б. В. Применение фильтра Калмана для задач управления подвижными объектами // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14. – №. 3. – С. 609-615.
4. Ижболдина В. В., Будков В. Ю., Денисов А. В. Анализ траектории движения конечности на основе данных с микромеханических датчиков // Научный результат. Информационные технологии. – 2018. – Т. 3. – №. 4. – С. 48-61.
5. Гордлеева С. Ю. и др. Разработка аппаратно-программного комплекса по управлению роботизированными устройствами посредством биоэлектрических сигналов мозга и мышц // Наука и инновации в медицине. – 2016. – №. 3. – С. 77-82.
6. Иванов А. А. Обзор методов математического анализа ЭЭГ. Количественная ЭЭГ // Эпилепсия и пароксизмальные состояния. – 2023. – Т. 15. – №. 2. – С. 171-192.
7. Поллер Б. В., Щетинин Ю. И., Орлов И. С. Адаптивная цифровая фильтрация сигналов в системах анализа электроэнцефалограмм (ЭЭГ) // Системы анализа и обработки данных. – 2013. – №. 1. – С. 31-38.
8. Павленко Д. В., Татарис Ш. Э., Овчаренко В. В. Применение глубокого обучения в интерфейсах мозг-компьютер для распознавания движений // Программные продукты и системы. – 2024. – Т. 37. – №. 2. – С. 164-169.
9. Капралов Н. В., Нагорнова Ж. В., Шемякина Н. В. Методы классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых движений // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20. – №. 1. – С. 94-132.
10. Бодин О. Н., Солодимова Г. А., Спиркин А. Н. Нейроинтерфейс для управления роботизированными устройствами // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – №. 4 (30). – С. 70-76.
11. Васильев А. В., Мельников А. О., Лесько С. А. Применение робастной нейросетевой фильтрации в задачах построения интеллектуальных интерфейсов // Russian Technological Journal. – 2023. – Т. 11. – №. 2. – С. 7-19.
12. Богданов Е. А. и др. Разработка нейроустройства с биологической обратной связью для восполнения утраченных двигательных функций // Вестник Российского государственного медицинского университета. – 2016. – №. 2. – С. 31-38.
13. Kozyr P. S. et al. Analysis of the effectiveness of machine learning methods in the problem of gesture recognition based on the data of electromyographic signals // Computer research and modeling. – 2021. – Т. 13. – №. 1. – С. 175-194.
14. He Y. et al. Brain-machine interfaces for controlling lower-limb powered robotic systems // Journal of neural engineering. – 2018. – Т. 15. – №. 2. – С. 021004.
15. Lebedev M. A., Nicolelis M. A. L. Brain-machine interfaces: from basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation // Physiological reviews. – 2017.
16. Ahkami B. et al. Electromyography-based control of lower limb prostheses: a systematic review // IEEE transactions on medical robotics and bionics. – 2023. – Т. 5. – №. 3. – С. 547-562.
17. Крючков Ю. А., Шуковский Н. В., Шоломов И. И. Применение интерфейса "мозг-компьютер" в реабилитации пациентов с моторными нарушениями после перенесенного инсульта // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2019. – №. 1. – С. 8-16.
18. Jiang C. et al. Review on Portable-Powered Lower Limb Exoskeletons // Sensors (Basel, Switzerland). – 2024. – Т. 24. – №. 24. – С. 8090.
19. Tucker M. R. et al. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review // Journal of neuroengineering and rehabilitation. – 2015. – Т. 12. – С. 1-30.
20. Романов А. И., Ступин В. А., Силина Е. В. Перспективы и значение аппаратов внешнего управления (экзоскелетов) для эффективной реабилитации пациентов с нарушениями двигательной функции // Здравоохранение Российской Федерации. – 2021. – Т. 65. – №. 3. – С. 287-294.
21. Даминов В. Д., Ткаченко П. В. Экзоскелеты в медицине: мировой опыт и клиническая практика Пироговского центра // Вестник национального медико-хирургического Центра им. НИ Пирогова. – 2017. – Т. 12. – №. 4-2. – С. 17-22.
22. Воробьев А. А. и др. Экзоскелет как новое средство в абилитации и реабилитации инвалидов (обзор) // Современные технологии в медицине. – 2015. – Т. 7. – №. 2. – С. 185-197.
23. Вережкин А. А. и др. Анализ и выбор кинематической структуры исполнительного механизма экзоскелета // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2014. – №. 7. – С. 72-93.
24. Карякин Н. Н. и др. Потенциальные преимущества и ограничения использования, роботизированных экзоскелетов у пациентов, перенесших позвоночно-спинномозговую травму: состояние вопроса // Вестник восстановительной медицины. – 2020. – №. 2 (96). – С. 68-78.
25. Письменная Е. В. и др. Клинико-биомеханическое обоснование применения экзоскелета «Экзоатлет» при ходьбе больных с последствиями ишемического инсульта // Российский журнал биомеханики. – 2019. – Т. 23. – №. 2. – С. 204-230.
26. Мосина М. О. и др. Роботизированные технологии в комплексной реабилитации детей с двигательными нарушениями // журнал «детская и подростковая реабилитация». – С. 66.
27. Голубова Т. Ф. и др. Изучение биомеханической эффективности экзоскелета exoatlet в комплексной санаторно-курортной реабилитации пациентов с дцп с формой спастическая диплегия // Вестник физиотерапии и курортологии. – 2021. – Т. 27. – №. 2. – С. 76-76.

ОБЗОР CAN-ПРОТОКОЛОВ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Т.А. Скрыков¹, Н.М. Шевченко¹, Н.А. Кузнецов², П.И. Сидорова²

¹ ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

² Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Введение

Управление группой электроприводов — это одна из наиболее сложных задач в современных промышленных системах, робототехнике и автоматизации. Основная проблема заключается в необходимости синхронизации работы нескольких приводов, обеспечения точности управления, а также минимизации задержек при передаче команд и данных. В традиционных системах, где используются аналоговые сигналы или простые цифровые интерфейсы, часто возникают сложности с масштабируемостью, надежностью и синхронизацией. Эти проблемы особенно актуальны в системах с большим количеством устройств, таких как конвейерные линии, роботизированные комплексы или станки с ЧПУ. Решением этих задач может стать использование CAN (Controller Area Network) протокола в системах управления электроприводами.

CAN (Controller Area Network) — это сетевой протокол, разработанный компанией Bosch в 1980-х годах для использования в автомобильной промышленности [1]. Основная цель CAN — обеспечить надежный обмен данными между электронными устройствами в реальном времени. Благодаря своей простоте, надежности и гибкости, CAN быстро нашел применение в других областях, таких как промышленная автоматизация, медицинское оборудование, робототехника и даже аэрокосмическая отрасль. CAN использует дифференциальные сигналы, что делает его устойчивым к электромагнитным помехам, которые часто возникают в промышленных условиях. Кроме того, CAN поддерживает многоточечную топологию, что позволяет подключать к одной сети до 128 устройств (а с использованием дополнительных инструментов — даже больше). Это значительно упрощает проектирование и монтаж систем управления.

Принцип работы CAN-сети

Для наглядного представления работы CAN-сети в реальных условиях, на рисунке 1 приведена схема сети CAN с несколькими электроприводами, подключенными к контроллеру.

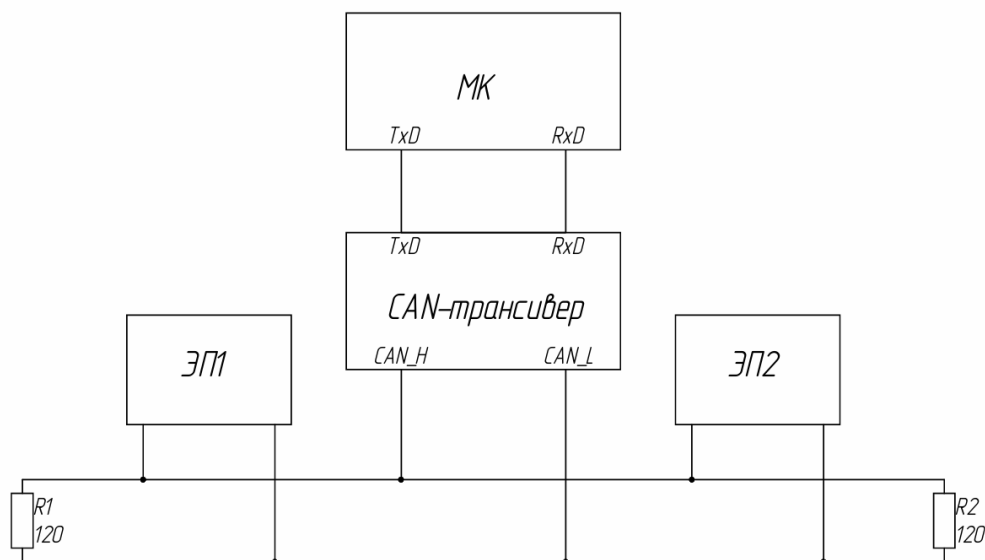


Рисунок 1 – Схема сети CAN с несколькими электроприводами, подключенными к контроллеру

Принцип работы данной схемы заключается в следующем:

1. Микроконтроллер решает, что означают полученные сообщения и какие сообщения он хочет передать. К нему подключены датчики, исполнительные механизмы и устройства управления;

2. Трансивер CAN при приеме преобразует уровни напряжения на шине CAN в уровни, понятные контроллеру CAN, а при передаче — преобразует поток данных от CAN-контроллера на уровни CAN-шины;

3. Оконечные сопротивления (терминирующие резисторы) используются для борьбы с отраженным сигналом (эхом). Отраженный сигнал препятствует нормальной передаче данных, и чем больше длина проводов шины и выше скорость передачи, тем значительнее этот негативный эффект. Правильно подобранные конечные нагрузочные сопротивления компенсируют отраженный сигнал. Обычно это два резистора по 120 Ом внутри блока управления, которые подключены к противоположным концам шины. Если на шине присутствуют промежуточные устройства, то на них резисторы не устанавливаются. Таким образом, терминирование на обоих конечных узлах шины CAN является необходимой мерой. Без оконечной нагрузки 120 Ом на обоих концах возникает отражение сигнала, которое приводит к полной неработоспособности всей шины, особенно на высоких скоростях.

CAN протокол имеет множество преимуществ, которые делают его популярным в различных отраслях. Основные преимущества включают высокую надежность и устойчивость к помехам,

поддержку многоточечной топологии, низкую задержку передачи данных, масштабируемость и гибкость благодаря поддержке различных протоколов верхнего уровня [2], таких как CANopen и DeviceNet. Однако, как и любая технология, CAN имеет и свои недостатки. К ним относятся ограниченная пропускная способность (до 1 Мбит/с для стандарта CAN 2.0), сложность настройки и программирования для новичков, ограниченная длина сети (до 40 метров на высокой скорости), необходимость использования терминаторов для корректной работы, а также несоответствие требованиям систем с очень высокой скоростью передачи данных.

Реализации и расширения CAN-протокола

CAN протокол имеет несколько реализаций и расширений, которые адаптированы для различных задач. Наиболее известные из них:

1. Классический CAN (CAN 2.0) — базовая версия протокола, которая поддерживает два формата сообщений: стандартный (11-битный идентификатор) и расширенный (29-битный идентификатор). Классический CAN широко используется в автомобильной промышленности и промышленной автоматизации благодаря своей простоте и надежности;

2. CAN FD (Flexible Data Rate) — расширение классического CAN, которое позволяет увеличить скорость передачи данных и объем передаваемой информации в одном сообщении. Это делает его более подходящим для систем, где требуется высокая пропускная способность, например, в современных автомобилях или сложных промышленных системах [3];

3. CAN XL — новейшая разработка в семействе CAN протоколов. Он поддерживает передачу данных объемом до 2048 байт и скорость до 10 Гбит/с, что делает его идеальным для будущих систем с высокими требованиями к пропускной способности [4];

4. CANopen — протокол верхнего уровня, который использует CAN в качестве физического уровня. Он стандартизирует обмен данными между устройствами, что упрощает интеграцию устройств от разных производителей. CANopen широко используется в промышленной автоматизации, медицинском оборудовании и робототехнике;

5. DeviceNet — еще один протокол верхнего уровня, основанный на CAN. Он был разработан компанией Allen-Bradley и используется в основном в промышленной автоматизации. DeviceNet поддерживает простую конфигурацию устройств и обеспечивает высокую надежность [5].

6. SAE J1939 — протокол, разработанный для тяжелой техники и коммерческих автомобилей. Он использует CAN для передачи данных между компонентами, такими как двигатели, коробки передач и системы управления [6];

7. ISO 11783 — протокол, основанный на J1939, который используется в сельскохозяйственной технике. Он обеспечивает совместимость между различными устройствами и системами [7].

8. NMEA 2000 — протокол, используемый в морской электронике. Он поддерживает стандартные сообщения и 11-битные идентификаторы, что делает его удобным для использования в морских условиях [8];

9. ARINC 825 — протокол, разработанный для авиационной промышленности. Он обеспечивает высокую надежность и безопасность, что делает его идеальным для использования в авиации [9].

10. CANaerospace — протокол, используемый в аэрокосмической электронике. Он обеспечивает передачу данных между бортовыми системами, что делает его важным инструментом для аэрокосмической отрасли [10].

Для наглядности рассмотрим основные характеристики различных CAN протоколов в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики разновидностей протокола CAN

Протокол	Уровень	Основное применение	Особенности
CAN 2.0	Низкий	Автомобили, промышленность	11/29-битные ID, до 1 Мбит/с
CAN FD	Низкий	Современные системы	До 64 байт данных, до 8 Мбит/с
CAN XL	Низкий	Будущие системы	До 2048 байт данных, до 10 Гбит/с
CANopen	Высокий	Промышленность, медицина	Объектный словарь, PDO/SDO, NMT
DeviceNet	Высокий	Промышленность	CIP, питание через шину
SAE J1939	Высокий	Автомобили, тяжелая техника	29-битные ID, SPN, диагностика
ISO 11783	Низкий	Сельское хозяйство	Основан на J1939, совместимость
NMEA 2000	Высокий	Морская электроника	11-битные ID, стандартные сообщения
ARINC 825	Высокий	Авиация	Высокая надежность, безопасность
CANaerospace	Высокий	Аэрокосмическая электроника	Передача данных между бортовыми системами

CAN FD, CANopen и DeviceNet — это три ключевых протокола, используемых для управления электроприводами, каждый из которых обладает своими уникальными характеристиками в плане скорости обмена данными, защиты от помех, количества поддерживаемых устройств и других параметров. Эти особенности делают их подходящими для различных задач в промышленной автоматизации, робототехнике и других областях.

Сравнительный анализ протоколов CAN FD, CANopen и DeviceNet

CAN FD является расширением классического CAN протокола, разработанным для повышения скорости передачи данных и увеличения объема передаваемой информации. Он поддерживает два режима скорости: стандартный (до 1 Мбит/с) и высокоскоростной (до 8 Мбит/с). Это позволяет адаптировать пропускную способность сети под требования системы. Размер данных в одном сообщении увеличен до 64 байт, что особенно полезно для передачи больших объемов информации, таких как параметры конфигурации или данные телеметрии. CAN FD сохраняет механизм арбитража, обеспечивающий приоритетную передачу критически важных данных, таких как команды управления приводами.

В плане защиты от помех CAN FD использует дифференциальные сигналы, что делает его устойчивым к электромагнитным помехам, которые часто возникают в промышленных условиях. Это особенно важно для систем, работающих в сложных условиях, таких как производственные цеха или автомобильные системы. Количество устройств, поддерживаемых CAN FD, зависит от топологии сети, но обычно ограничено 128 устройствами на одной шине. Однако с использованием дополнительных инструментов, таких как мосты или шлюзы, это количество может быть увеличено.

CANopen — это протокол верхнего уровня, базирующийся на CAN. Он стандартизирует обмен данными между устройствами, что упрощает интеграцию приводов от разных производителей. Скорость передачи данных в CANopen зависит от физического уровня CAN и обычно составляет от 10 кбит/с до 1 Мбит/с. CANopen использует объектный словарь для хранения всех параметров и данных устройства [11], что обеспечивает унифицированный доступ к информации, такой как целевая позиция, скорость или момент привода.

Для передачи данных CANopen использует процессные данные (PDO) и сервисные данные (SDO). PDO используются для передачи реальных данных управления, таких как команды и состояния приводов, и могут быть настроены на циклическую или событийную передачу. SDO используются для конфигурации устройств и передачи параметров, например, настроек PID-регулятора или ограничений скорости.

CANopen также обеспечивает высокую устойчивость к помехам благодаря использованию дифференциальных сигналов CAN. Количество устройств в сети CANopen ограничено 127 узлами, что делает его подходящим для систем с умеренным количеством устройств, таких как промышленные линии или медицинское оборудование.

DeviceNet — это протокол верхнего уровня, разработанный компанией Allen-Bradley и основанный на CAN. Он ориентирован на промышленную автоматизацию и обеспечивает простую интеграцию устройств. Скорость передачи данных в DeviceNet может варьироваться от 125 кбит/с до 500 кбит/с, что делает его подходящим для систем с умеренными требованиями к пропускной способности.

DeviceNet использует общий промышленный протокол (CIP) для стандартизации обмена данными между устройствами. Это позволяет передавать как данные управления, так и информацию о состоянии устройств. Одной из ключевых особенностей DeviceNet является поддержка передачи питания через шину, что упрощает монтаж и снижает количество кабелей.

В плане защиты от помех DeviceNet также использует дифференциальные сигналы CAN, что обеспечивает устойчивость к электромагнитным помехам. Количество устройств, поддерживаемых DeviceNet, ограничено 64 узлами на одну сеть, что делает его подходящим для систем с умеренным количеством устройств, таких как конвейерные линии или упаковочные машины.

Скорость передачи данных: CAN FD обеспечивает наибольшую скорость (до 8 Мбит/с), что делает его идеальным для систем с высокими требованиями к пропускной способности. CANopen и DeviceNet работают на более низких скоростях (до 1 Мбит/с и 500 кбит/с соответственно), что подходит для систем с умеренными требованиями.

Защита от помех: все три протокола используют дифференциальные сигналы CAN, что обеспечивает высокую устойчивость к электромагнитным помехам.

Количество устройств: CAN FD и CANopen поддерживают до 128 и 127 устройств соответственно, в то время как DeviceNet ограничен 64 узлами.

Заключение

Выбор протокола для управления группой электроприводов зависит от конкретных требований системы, таких как скорость передачи данных, количество устройств, устойчивость к помехам и сложность интеграции. CAN FD является оптимальным решением для высокоскоростных систем с большим объемом данных, таких как современные промышленные комплексы или автомобильные системы, где требуется высокая пропускная способность (до 8 Мбит/с) и поддержка до 128 устройств. CANopen лучше использовать в системах, где важна стандартизация и интеграция устройств от разных производителей, например, в промышленной автоматизации, робототехнике или медицинском

оборудовании. Он обеспечивает гибкость управления данными через объектный словарь и поддерживает умеренную скорость передачи (до 1 Мбит/с). DeviceNet подходит для простых промышленных систем с умеренными требованиями к скорости (до 500 кбит/с) и небольшим количеством устройств (до 64), таких как конвейерные линии или упаковочные машины. Все три протокола обеспечивают высокую устойчивость к электромагнитным помехам благодаря использованию дифференциальных сигналов, что делает их надежными в условиях промышленной эксплуатации.

Таким образом, выбор протокола зависит от задач системы: CAN FD — для высокоскоростных и сложных систем, CANopen — для стандартизированных и гибких решений, DeviceNet — для простых и компактных систем.

Научный руководитель – доцент А.О. Кузьмин

Библиографический список

1. Bosch, Robert. "CAN Specification Version 2.0." Robert Bosch GmbH, 1991.
2. Lawrenz, Wolfgang. "CAN System Engineering: From Theory to Practical Applications." Springer, 2013.
3. "Introduction to CAN FD." Microchip Technology, Application Note, 2019.
4. CAN XL Specification. "CAN with Extended Data Length and Higher Bit Rates." CiA (CAN in Automation), 2021.
5. DeviceNet Specifications. "DeviceNet™ Technical Overview." ODVA, 2021.
6. SAE J1939 Standards Collection. "Recommended Practice for a Serial Control and Communications Vehicle Network." SAE International, 2021.
7. ISO 11783-1:2017. "Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network — Part 1: General standard for mobile data communication." International Organization for Standardization, 2017.
8. NMEA 2000 Standard. "NMEA 2000® Network Fundamentals." National Marine Electronics Association, 2020.
9. ARINC 825: "CAN Bus Protocol for Aviation Applications." Aeronautical Radio, Inc., 2010.
10. CANaerospace Specification. "A CAN-based Higher-Layer Protocol for Avionics Applications." 2005.
11. Kopetz, Hermann. "Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications." Springer, 2011.

УДК 681.5

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАНИПУЛЯТОРА

Г.Э. Майбородин

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

В наше время робототехника является одной из самых востребованных и сложных областей науки и техники. Различные мехатронные и робототехнические комплексы находят широкое применение во многих отраслях промышленности и повседневной жизни. Это касается и медицинских роботов-манипуляторов, благодаря которым становятся возможными сложнейшие и точнейшие операции, и мобильных роботов, используемых в мирных целях для спасения людей и работы с опасными материалами, и наконец манипуляторов, используемых на производстве для автоматизации, оптимизации и ускорения сборки различных устройств, начиная от чайника и заканчивая автомобилем. Этот список можно продолжать ещё очень долго, однако в данной статье нас интересует одна конкретная группа роботов – промышленные манипуляторы.

Если обратиться к истории, то становится понятно, что свое начало робототехника берет ещё с 300 года до нашей эры, однако то, что мы привыкли называть роботом, появилось значительно позже. Первым же промышленным манипулятором стал представленный миру в 1959 году робот Unimate #001. Его разработчиками являются американский инженер Джозеф Энгельбергер и изобретатель Джордж Девол. В дальнейшем его не раз модифицировали и в итоге получился первый робот для сборки автомобилей.

Как и было отчасти сказано ранее, промышленные роботы обычно являются одним из компонентов автоматизированных производственных систем, применяемых в гибком автоматизированном производстве, которые при неизменном уровне качества позволяют увеличить производительность труда в целом.

Одним из основных этапов разработки таких устройств является их математическое представление, а также создание алгоритма управления рабочим органом, с помощью которого манипулятор и выполняет возложенную на него работу. В данной статье будет рассмотрен процесс разработки именно такого алгоритма для промышленного робота-манипулятора, кинематическая схема которого представлена на рисунке 1.

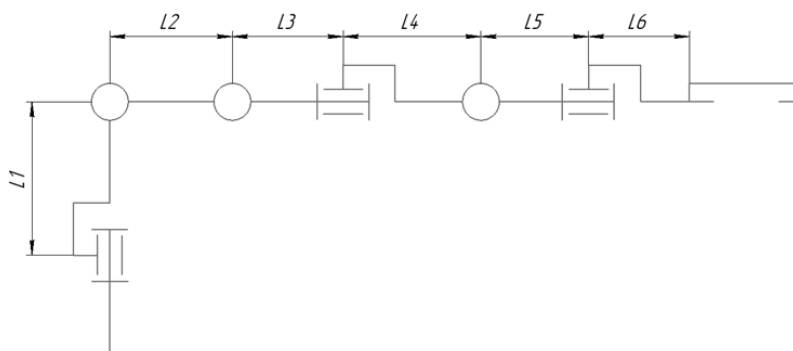


Рис. 1. – Кинематическая схема манипулятора

Для начала стоит разобраться в том, как составить нужный нам алгоритм. В робототехнике существует 2 основных задачи кинематики, благодаря которым можно описать движение манипулятора – прямая и обратная. Прямая задача – это вычисление положения (X , Y , Z) рабочего органа манипулятора по его кинематической схеме и заданной ориентации ($A_1, A_2 \dots A_n$) его звеньев (n – число степеней свободы манипулятора, A – углы поворота). Обратная же задача – это вычисление углов ($A_1, A_2 \dots A_n$) по заданному положению (X , Y , Z) рабочего органа и известной схеме его кинематики, иначе говоря, по известному конечному положению необходимо найти закон движения, который приведет робот в это состояние. Как правило, обратная задача сложнее прямой, поскольку попасть в заданные координаты можно бесконечным количеством способов, в то время как имея определенный закон движения, рабочий орган манипулятора может занять только положение в пространстве.

В нашем случае, поскольку нам требуется управлять конечными координатами рабочего органа, как основную мы будем рассматривать именно прямую задачу кинематики.

На практике применяется несколько способов решения прямой задачи кинематики, однако в данном случае мы будем использовать метод, основанный на преобразовании Денавита-Хартенберга. Суть состоит в том, что каждому звену присваивается собственная система координат, что значительно упрощает анализ кинематики. Ниже, на рисунке 2 представлена схема манипулятора с расставленными по правилам Денавита-Хартенберга системами координат.

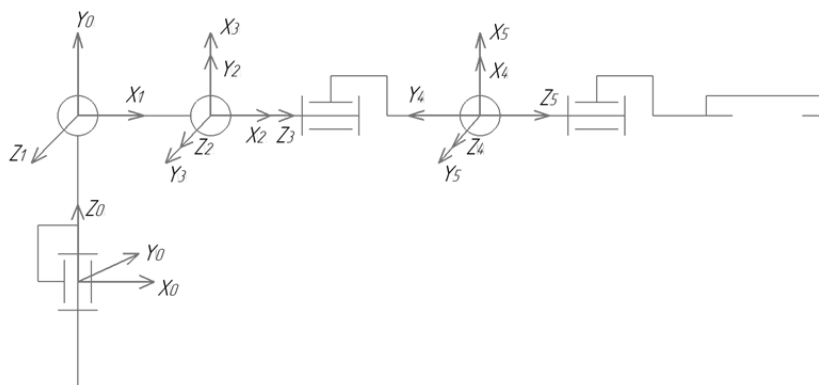


Рис. 2. – Схема систем координат по правилам Денавита-Хартенберга

Теперь необходимо описать нашу систему используя параметры Денавита-Хартенберга (ДХ параметры). ДХ представление твердых звеньев зависит от четырех геометрических параметров, соответствующих каждому звену. Эти четыре параметра полностью описывают любое вращательное или поступательное движение и определяются следующим образом:

- 1) θ_i – присоединенный угол, на который надо повернуть ось X_{i-1} вокруг оси Z_{i-1} , чтобы она стала сонаправлена с осью X_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки);
- 2) d_i – расстояние между пересечением оси Z_{i-1} с осью X_i и началом $(i-1)$ -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси Z_{i-1} ;
- 3) a_i – линейное смещение — расстояние между пересечением оси Z_{i-1} с осью X_i и началом i -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси X_i , т. е. кратчайшее расстояние между осями Z_{i-1} и Z_i ;
- 4) α_i – угловое смещение — угол, на который надо повернуть ось Z_{i-1} вокруг оси X_i , чтобы она стала сонаправленной с осью Z_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки).

Для нашей кинематической схемы с учетом выставленных систем координат мы получим следующую таблицу ДХ параметров (см. таблицу 1).

Таблица 1 – ДХ параметры манипулятора

Сочленение i	$\theta_i, ^\circ$	$\alpha_i, ^\circ$	$a_i, \text{м}$	$d_i, \text{м}$
1	q_1	$\frac{\pi}{2}$	0	$L1$
2	q_2	0	$L2$	0
3	$q_3 + \frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0	0
4	q_4	$-\frac{\pi}{2}$	0	$L3+L4$
5	q_5	$\frac{\pi}{2}$	0	0
6	q_6	0	0	$L5+L6$

Данная таблица в полной мере описывает движение нашего манипулятора в пространстве. Всё, что теперь нужно сделать, это составить программу, которая на основе полученных ДХ параметров реализовывала бы управление рабочим органом робота-манипулятора (в нашем упрощенном случае – крайней точки последнего звена).

Однако внимательно изучив таблицу можно заметить переменную, которая не упоминалась ранее – обобщенная координата q . Обобщенная координата – это независимая переменная, которая описывает положение или конфигурацию манипулятора в пространстве. В робототехнике и механике обобщенные координаты используются для определения состояния системы, например, положения звеньев робота или углов поворота его сочленений.

Если мы хотим получить определенную траекторию, по которой двигался бы наш манипулятор, нам необходимо сначала найти обобщенные координаты, чтобы дальше использовать их при решении прямой задачи кинематики. Сделать это можно разными способами, как просто задать интервал значений для каждой обобщенной координаты, так и найти их при помощи обратной задачи кинематики. В нашем случае мы зададим определенную планируемую траекторию и с ее помощью, используя обратную задачу кинематики, найдем значения обобщенных координат. При этом получать итоговую траекторию и, соответственно, управлять нашим манипулятором мы будем, решая прямую задачу кинематики по методу, описанному выше.

Для реализации алгоритма будем использовать среду MATLAB. В данной статье мы рассмотрим лишь итог выполнения программы, а также упрощенную блок-схему, описывающую принцип ее работы.

Ниже, на рисунке 3 представлена блок-схема, отображающая алгоритм работы программы управления рабочим органом манипулятора.



Рис. 3. – Блок-схема алгоритма работы программы

Изначально в качестве желаемой траектории был задан прямоугольник, имеющий стороны 2 на 1 метр и находящийся под углом 45 градусов к поверхности земли. В результате работы программы манипулятор прошёл по траектории, близкой к той, что была задана (см. рисунки 4 и 5).

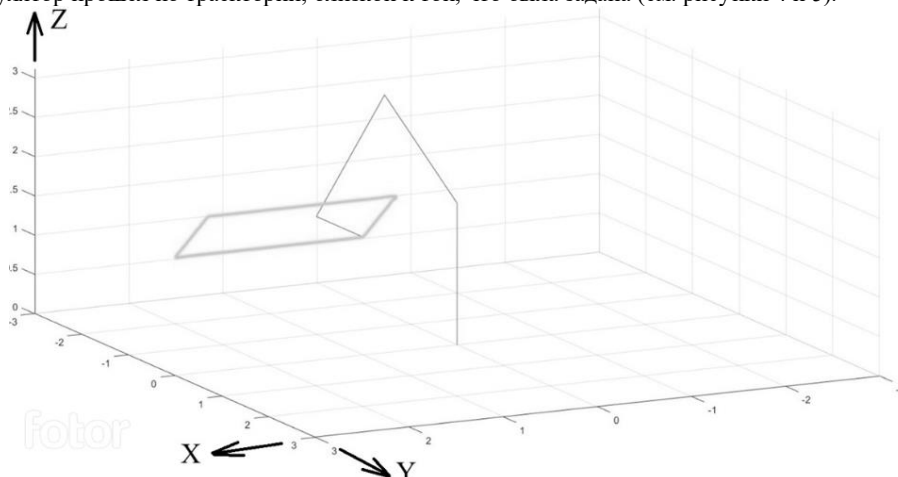


Рис. 4. – Движение рабочего органа: толстая линия – прямоугольная траектория под углом 45 градусов к земле, основанию; тонкая линия – звенья манипулятора

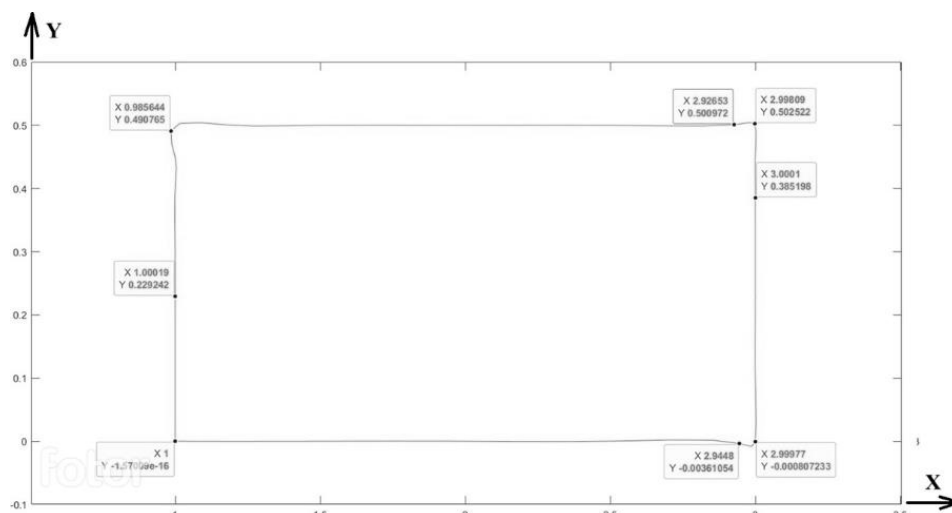


Рис. 5. – Итоговая траектория движения (облако точек)

Как видно из рисунка 4, мы получили достаточно наглядное отображение нашей робототехнической системы (промышленного манипулятора), из которого можно сделать вывод о характере движений и использовать это для дальнейшей оптимизации. В свою очередь по рисунку 5 можно сделать вывод о работе самого алгоритма. Как видно решение прямой задачи методом Денавита-Хартенберга позволило построить такой алгоритм управления рабочим органом манипулятора, которая даёт достаточно неплохую точность позиционирования и минимизирует отклонения от требуемой траектории.

Подводя итог, можно смело сказать, что нам удалось получить достаточно хороший алгоритм управления рабочим органом промышленного манипулятора, обеспечивающий хорошие параметры движения. Материал, приведенный в статье, позволяет повысить качество моделирования алгоритмов управления разрабатываемых робототехнических систем, в частности промышленных манипуляторов.

Научный руководитель – к.т.н., доцент, В.Ю. Кулемин

Библиографический список

1. Метод и программа решения прямой и обратной задачи кинематики для управления роботом-манипулятором [электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/374943322_Metod_i_programma_resenia_pramoj_i_obratnoj_zadaci_kinematiki_dla_upravlenia_robotom-manipulatorom?enrichId=rgreq-2c00091372d7da9653ddb9901747db52-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzM3NDk0MzMzMjBUZoxMTQzMjI4MTIwMTA2MjAxM0AxNjk4MTU5ODk3NTQz&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf. (дата обращения: 11.03.2025).
2. Н.Д. Беклемишев, А.К. Платонов, С.М. Соколов, О.В. Трифонов Алгоритмы управления движением схвата манипулятора. Москва 2017.
3. Конструирование мехатронных модулей [Текст]: методические указания по курсовому проектированию / БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова; сост. Е. И. Агеев. - СПб.: [б. н.], 2001. - 26 с.: ил., граф., табл. - Библиогр.: с. 25. - Приложения: с. 23-25. – 38 экз.

АЛГОРИТМ СЛЕПОГО ПОИСКА ПРОИЗВОЛЬНО РАСПОЛОЖЕННОЙ ПЛОСКОСТИ АВТОНОМНОЙ БЕСПИЛОТНОЙ СИСТЕМОЙ

И. А. Рыжих, М. В. Рыжов

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. Беспилотные системы (БС) очень быстро и прочно вошли в нашу жизнь. Этим термином принято обозначать мобильные комплексы, способные достигать заданного положения в пространстве и выполнять требуемые действия в отсутствие физического контакта с оператором либо автономно – то есть мобильные системы, функционирующие в автоматически или автоматизировано, с дистанционным управлением. Задачи, выполняемые ими зависят от предназначения аппаратов и, помимо прочего, включают в себя перемещение «из пункта А в пункт Б». Наиболее ценным их качеством является существенно меньшая стоимость как самих БС, так и стоимость выполняемых с их помощью действий, по сравнению с обитаемыми аппаратами.

При выборе подхода к управлению БС следует учитывать современный широко известный опыт их эксплуатации. Он свидетельствует, с одной стороны, о высокой результативности дистанционно управляемых аппаратов, что обусловлено возможностью адаптации их движения оператором к текущим условиям. С другой стороны, надежное управление ими возможно не всегда. Поэтому способность БС к автономному функционированию есть и будет их ценным ресурсом.

Независимо от степени влияния оператора на средство доставки, оно действует в рамках «малого» либо «большого» контуров управления. В первом случае контур управления включает в себя:

- 1) датчики для сбора данных о местоположении БС и позиционировании его частей, важных для его применения по назначению;
- 2) модуль обработки информации и принятия решений;
- 3) совокупность исполнительных устройств;
- 4) совокупность внутренних каналов доставки данных от датчиков и к исполнительным механизмам, выполненным на основе каких-либо интерфейсов.

«Большой» контур управления дополнительно включает в себя каналы дальней связи модуля обработки информации с оператором. Общность описанных вариантов состоит в определении местоположения аппарата и ориентации его частей на основе совокупности сигналов датчиков.

В зависимости от условий функционирования БС максимизировать эффективность их применения может использование различных типов датчиков: оптических, акустических, радио-, радиолокационных и других. Для наземных подвижных аппаратов представляет интерес ориентирование на основе тактильных датчиков.

ОПИСАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И ЗАДАЧИ. В качестве такого аппарата предлагается рассмотреть тележку, способную свободно перемещаться по плоской поверхности. На тележке смонтирована полнооборотная в горизонтальной плоскости платформа с манипулятором, $\theta_1 = (-\pi, \pi)$. Сочленения манипулятора выполнены подвижными таким образом, что величины углов могут изменяться в единой для всех плоскости, в пределах: $\theta_2 = (0, \frac{\pi}{2})$ – от нормали к платформе, θ_3 и $\theta_4 = (0, \pi)$ – от оси предшествующего звена, захват может вращаться в произвольном направлении, на произвольный угол: $\theta_5 = (-\pi, \pi)$ (рис. 1).

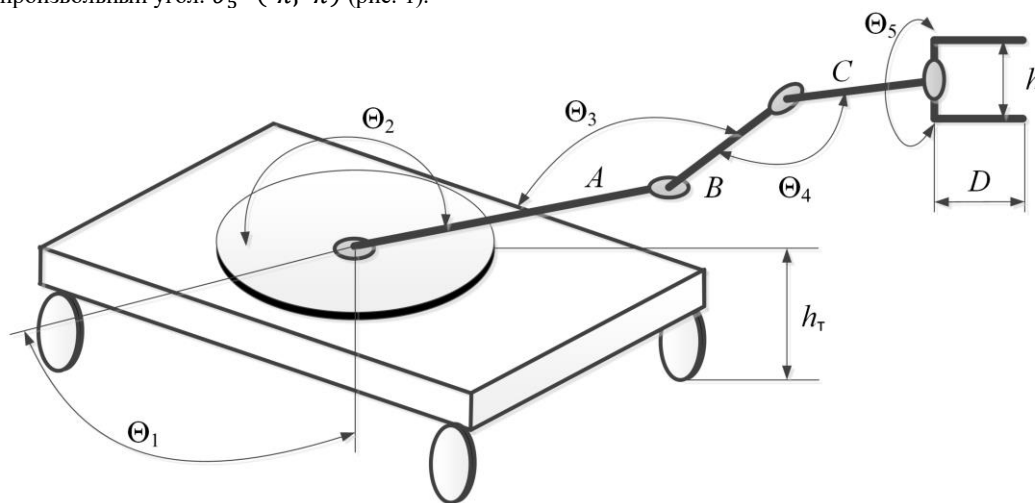


Рис. 1. Тележка с манипулятором

Описанная конструкция обладает шестью степенями свободы $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, h\}$. Положение каждого из звеньев манипулятора изменяется либо удерживается при помощи шаговых двигателей. Считать, что движение тележки и манипулятора происходят беспрепятственно, в среде с нулевой вязкостью, погрешность позиционирования тележки и манипулятора отсутствует.

Пусть задачей БС описанной конструкции является обнаружение и определение положения в пространстве бесконечной неподвижной плоскости, расположенной и ориентированной абсолютно произвольно, расположенной над поверхностью перемещения тележки не выше, например, 0,7 от суммы длины манипулятора и высоты его размещения: $A+B+C+D+h_r$ (рис. 1). Полная информация о плоскости должна быть получена в три касания.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА. Очевидно, что из возможных способов решения поставленной задачи следует отдать предпочтение варианту, позволяющему достичь цели за минимальное время, с наименьшими затратами энергии и технического ресурса БС. Отталкиваясь от целесообразности экономии, прежде всего времени, рациональным представляется сокращение количества совершаемых движений и перемещений. Для выбора подходящего движения предлагается ввести величину, однозначно связывающую временные затраты с материальными затратами при обеспечении гарантированного обнаружения (ГО).

В качестве такой величины приближенно может выступать коэффициент использования времени, показывающий соотношение между затратами времени, энергии, технических ресурсов и объемом области ГО.

$$K_t = m t_{\text{перем}} \frac{V_{\text{ГО}}}{\sum_1^6 N_i} 16 t_j,$$

где: $V_{\text{ГО}}$ – объем области ГО при неподвижной тележке;

$N_i = e_i r_i a_i$ – энерго-ресурсные затраты на изменение параметров, определяющих положение манипулятора $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, h\}$;

e_i – средние энергозатраты на изменение одного из параметров $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, h\}$;

r_i – средние затраты технических ресурсов на изменение одного из параметров;

$a_i = [0, 1]$ – индикатор наличия изменения одного из параметров;

t_j – средняя продолжительность изменения одного из параметров.

m – количество перемещений тележки;

$t_{\text{перем}}$ – средняя продолжительность перемещений тележки.

При сплошном «ощупывании» область ГО наибольшая и совпадает с верхней полусферой радиусом $z = A+B+C+D$ (рис. 1), проведенным из центра вращения поворотной платформы, усеченной на предельной высоте расположения искомой плоскости (рис. 2).

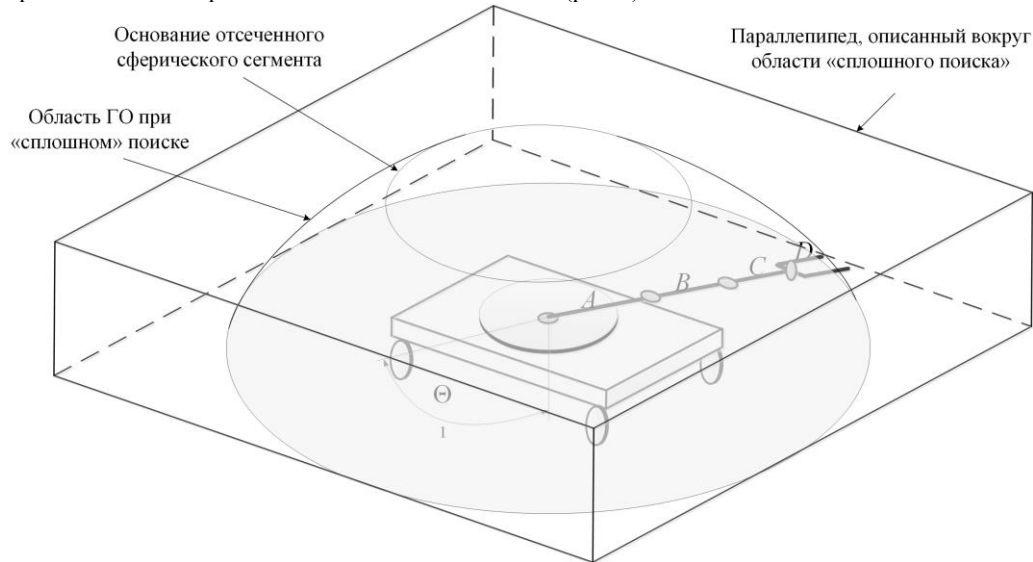


Рис. 2. Область ГО при «сплошном» поиске – 1 и описанный вокруг нее параллелепипед – 2

При сплошном поиске в описанной области и перемещении тележки на расстояние, равное ее удвоенному радиусу часть пространства оказывается неисследованной. Вероятность пропуска объекта в точке старта тележки можно определить, как отношение разности объемов полученной области ГО и описанного вокруг нее параллелепипеда к объему описанного параллелепипеда (рис. 2):

$$P_{\text{проп}} = \frac{2,8z^3 - \frac{2}{3}\pi z^3 + 0,081\pi z^3}{2,8z^3} = \frac{2,8 - \pi\left(\frac{2}{3} + 0,081\right)}{2,8} = 0,343.$$

При проходе тележки по прилегающей траектории пропуск будет только частично скомпенсирован. Таким образом, в дальнейшем вероятность пропуска остается отличной от нуля за счет сферичности областей ГО на краях исследуемого пространства.

Кроме того, при рассматриваемом методе поиска временные и ресурсно-энергетические затраты, даже без учета движения тележки, очень велики.

Очевидно, что пропуски исключаются только при конфигурации области ГО в виде параллелепипеда, а также точном и полном прилегании граней этих областей после перемещений тележки. Также очевидно, что выполняется описанное условие при значительно меньшем количестве движений манипулятора. Простого подсчета достаточно, чтобы определить их минимальное количество: если в исходном положении манипулятор располагается горизонтально, все звенья выстроены в линию, смещенную на $\frac{\pi}{4}$ от направления перемещения тележки, для ГО искомой плоскости в области «экономного» поиска с возвращением инструмента в исходное положение достаточно четырех движений манипулятора – как показано на рис. 3.

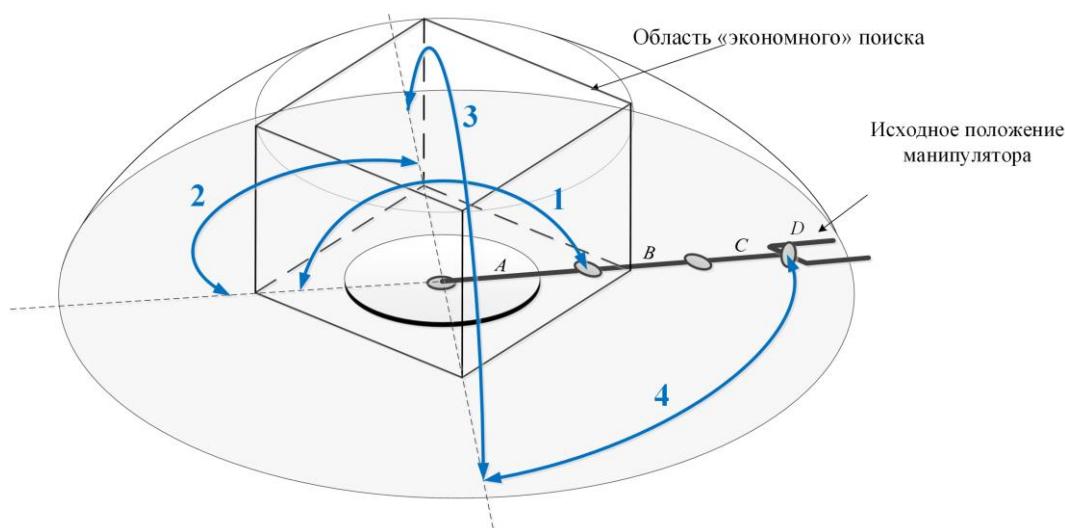


Рис. 3. Движения манипулятора при «экономном» поиске

После перемещения тележки на расстояние, равное длине стороны параллелепипеда, поиск повторяется. В связи с этим, требуется определить длину стороны фигуры. Анализ изображения на рис. 2 позволяет утверждать, что размер горизонтальной части параллелепипеда, образующего область ГО, не может выходить за пределы окружности, образованной основанием отсеченного сферического сегмента. Или, точнее, она представляет собой прямоугольник, вписанный в эту окружность (рис. 3). Ее радиус составляет около $0,714z$. Отсюда, длина стороны вписанного прямоугольника составляет $1,001z$. Боковые стороны при таком размере основания автоматически оказываются также внутри изначальной, криволинейной области ГО.

ТРАЕКТОРИЯ ТЕЛЕЖКИ. Здесь также предпочтение следует отдать экономному варианту. Выбор его зависит от наличия и содержания априорной информации об искомой плоскости и рамках области пространства, в которой она вообще может находиться. При отсутствии каких-либо сведений целесообразно перемещение платформы с манипулятором по спирали. В первую очередь потому, что такая траектория никак не привязана к пространству поиска и позволяет «заполнять» объемами ГО достаточно долго не встречаясь с его границами. В то же время, существенное влияние на выбор траектории оказывает способ обеспечения подвижности тележки. А именно, способность тележки без дополнительных затрат менять направление движения с «прямого» на «перпендикулярное» и так же, с равными затратами двигаться в выбранном направлении. С учетом последнего замечания и использовании в качестве движителей колес, предпочтительна траектория в виде «змейки» с заворотами у границ исследуемой области.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТАКТИЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ. Как манипулятор, так и сама тележка должны позволять отслеживать соприкосновение или столкновение с окружающим предметами. Независимо от взаимного расположения искомой плоскости и вектора скорости средства поиска контакт сопровождается скачком энергопотребления одного или более шаговых двигателей. Таким образом, своевременное обнаружение всплесков потребления двигателями тока с одновременной фиксацией положения БС в целом и всех его составных частей позволяет однозначно определить пространственные координаты точки касания.

Научный руководитель – к.т.н., доцент М. В. Рыжов

Библиографический список

1. Веретягин А.А. Теория обработки сигналов и автоматического управления в радиоэлектронных системах: учебник. – МО РФ, 1992. – 718 с.
2. Конструируем роботов. Дроны. Руководство для начинающих [Электронный ресурс] / Дж. Бейктал; пер. с англ. Ф. Г. Хохлова. – Эл. Изд. – Электрон. Текстовые дан. (1 файл pdf: 226 с.). – М.: Лаборатория знаний, 2018.

3. В. Б. Брагин, Ю. Г. Войлов Ю. Д. Жаботинский и др. Системы осязания и адаптивные промышленные роботы / под общ. Ред. Е. П. Попова, В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
4. Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 312 с.
5. Новые механизмы в современной робототехнике. / под ред. В. А. Глазунова. – М.: Техносфера, 2018 – 316 с.

УДК 629.05

КДМЕ23 – НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ МНОГОЦЕЛЕВЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

Д.А. Комаров, Е.П. Морозов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Робототехника тесно связана с автоматизацией и компьютеризацией современного производства, играя ключевую роль в создании высокоточных и гибких производственных систем. Роботы выполняют широкий спектр задач, повышая точность, скорость и надежность процессов, что критически важно для поддержания конкурентоспособности в условиях глобальной экономики. Однако остаются вызовы, такие как обеспечение безопасности взаимодействия человека и робота, интеграция роботов в существующие производственные линии и повышение их автономии. Решения этих задач требуют баланса между автоматизацией и контролем, что открывает перспективы для дальнейших исследований и разработок в области робототехники.

Большинство современных производств оснащено передовыми системами автоматизации, такими как ERP, MES и SCADA, что позволяет значительно снизить влияние человеческого фактора на производственные процессы. Эти системы обеспечивают автономную работу предприятий, повышают безопасность труда и оптимизируют выполнение бизнес-задач. На многих заводах и фабриках наряду с традиционными промышленными роботами-манипуляторами активно используются мобильные роботы. Они помогают решать сложные логистические задачи, такие как транспортировка материалов и готовой продукции, повышая общую эффективность работы.

Большинство современных роботов являются ограниченными в плане адаптивности решениями, любой изменяющийся фактор или среда ведёт не номинальному использованию изделия, что не позволяет менять их функционал под быстроменяющиеся условия рынка и адаптировать под новые, более выгодные, технологии.

Всё чаще в ходе различных процессов, современные технологии исключают на тех или иных операциях человека, но их части этого сделать невозможно, например многие считают, что исключить человека из процесса проектирования попросту невозможно, и действительно если мы рассмотрим большинство современных методов расчётов, то получим следующую картину:

Современные методы проектирования и инженерных расчетов представляют собой комплексный подход, который включает использование новейшего программного обеспечения, математического моделирования, цифровых технологий и методов анализа данных. Эти методы позволяют инженерам разрабатывать и тестировать проекты до их реализации, минимизируя риски и увеличивая точность конечного результата.

Одной из основных задач для проектирования роботов является обратная задача. Обратные задачи – это те, с которыми так или иначе сталкиваются инженеры, физики, математики и специалисты других направлений, связанных с исследованиями. Инженерия не является исключением. Современные инженерные проекты требуют все более точных моделей и расчетов. Традиционные методы приближения, такие как интерполяция полиномами, байесовский метод, стохастические и градиентные методы, не всегда могут обеспечить необходимую точность и стабильность. В условиях усложнения задач, например, в аэрокосмической отрасли, машиностроении, строительстве и энергетике, возникает потребность в более гибких и эффективных инструментах для решения обратных задач. Во многих инженерных задачах присутствуют зоны с высокой неоднородностью свойств материалов или сложной геометрией конструкций. Применение традиционных методов может привести к искажению данных в таких областях. Использование В-сплайнов позволяет учитывать локальные особенности и обеспечивать высокую точность в критически важных участках, делая этот метод особенно подходящим для инженерных приложений. Применение В-сплайнов в решении обратных задач открывает новые возможности для оптимизации процессов проектирования и производства, позволяя находить решения не только для линейных, детерминированных, корректно поставленных задач с малым числом параметров, но и для более сложных случаев. В отличие от традиционных методов, данный подход позволяет учитывать нечеткость данных, нелинейность связей и многое другое, используя лишь начальный набор данных. Это применимо как для создания новых продуктов, так и для улучшения существующих. Возможность точного моделирования сложных поверхностей и форм позволяет инженерам разрабатывать конструкции, отвечающие предъявляемым требованиям, снижая затраты на материалы и повышая эффективность производственных процессов. Инженерные задачи часто связаны с неопределенностью и ошибками измерений. Метод приближения В-сплайнами учитывает эти факторы и обеспечивает устойчивость решения даже при наличии неполных или зашумленных данных. Это особенно важно в ситуациях, когда необходимо минимизировать риски и гарантировать надежность проектируемых систем. Метод приближения В-сплайнами хорошо

сочетается с современными цифровыми технологиями, такими как компьютерное моделирование и симуляция. Он легко интегрируется в существующие программные комплексы и может использоваться совместно с другими методами, такими как конечные элементы и метод конечных разностей. Это делает его универсальным инструментом для решения широкого круга инженерных задач. Повышение точности расчетов и снижение затрат на проектирование и производство имеют важное значение не только с технической, но и с экологической и экономической точек зрения. Более точные расчеты позволяют сократить количество отходов, снизить энергозатраты и повысить долговечность изделий, способствуя снижению негативного воздействия на окружающую среду и повышению конкурентоспособности продукции.

Основываясь на результатах выполненных расчётов, были выбраны оптимальные начальные компоненты для создания физической модели робота, что послужит основой для дальнейших этапов тестирования и верификации прототипа. Параллельно с этим, команда разработчиков предложила ряд инновационных конструктивных решений, призванных вывести функциональные возможности устройства на качественно новый уровень. Среди наиболее значимых достижений можно выделить внедрение адаптивных сегментных колёс [1], активной подвески с улучшенной жёсткостью [2] и параметрически-настраиваемой системой регулировки развала колёс [3]. Эти технические новшества обладают значительным потенциалом не только в сфере робототехники, но и могут быть успешно применены в других областях машиностроения, демонстрируя превосходство над традиционными аналогами.

Параметрическое задание системы для проектирования робота требует за собой мощный инструмент для его моделирования с учётом конструктивных и технологических ограничений. В ходе описанной задачи главным фактором для генерации подобных комплексов является грузоподъёмность, а также конструктивные ограничения, зависящие от неё. Отсюда одним из параметров выходных параметров возьмём максимальную полезную нагрузку на робота, при оптимальных и минимальных его габаритах, а также характеристиках компонентов, что в свою очередь снизит его стоимость, для этого рассмотрим все предыдущие выведенные зависимости и совместим их с геометрическими и конструктивными зависимостями, которые были получены при составлении параметризуемых моделей, а также их чертежей.

По сути, все параметры робота можно с конструктивной точки зрения свести к следующему набору:

1. Для работы подвески: $R_{\text{подв.}}$ – радиус дугового звена подвески, $S_{\text{подв.}}$ – ширина дугового звена подвески
2. Для рамы: $Z_{\text{рамы}}$ – высота подложки, $L_{\text{рамы}}$ – ширина половины каркаса, $R_{\text{рамы}}$ – длина рамы S – толщина профиля рамы
3. Система развал: $L_{\text{разв}}$ – длина звена системы развал, S – толщина звена системы развал
4. Адаптивное колесо: $R_{\text{кол}}$ – радиус колеса, S – толщина колеса

Примечание: для унификации проектирования принято, что параметры толщины для большинства элементов брать одинаковыми, по этой причине для разных систем применимо одно и то же обозначение S

Помимо основных параметров, которые нужны для автоматического построения моделей компонентов – выражающих геометрические зависимости, также определяются такие параметры как: $M_{\text{пол}}$ – масса полезной нагрузки, $M_{\text{эл}}$ – масса электроники, $M_{\text{ред}}$ – масса редуктора

Адаптивное колесо

Для определения конечных зависимостей от наших введённых параметров рассмотрим те замены, которые были получены в ходе проектирования и унифицирования системы.

$$R_{\text{ПЗ}} = \frac{0.87 * (2R_{\text{кол}} - 3)}{2}$$

$$l_{AB} = 0.87 * (R_{\text{кол}} - 1.5) + \frac{1}{3} R_{\text{кол}}$$

Также исходя из геометрических особенностей выведем массы, которые используются в расчётах, а также получим точную массу колеса.

Массу одного колеса можно рассчитать, как:

$$m_{\text{кол}} = 2m_1 + 8m_j + 16m_i + m_{\text{осн}}$$

Где:

- $m_1 = \frac{\rho S \pi}{12} (0.87 * (2R - 3))^2$ – масса поворотного диска,
- $m_j = \rho \left(\frac{4\pi R_{\text{кол}}^2 S}{75} - \frac{\pi S^2 R_{\text{кол}}}{120} + \frac{8}{3} S^2 R_{\text{кол}} + \frac{81\pi}{500} S^3 \right)$ – масса специфических ползунов,
- $m_i = \frac{\rho S}{3} \left(S(R - 1.5) * 0.87 + \frac{1}{3} R_{\text{кол}} S + 0.07 \pi S^2 \right)$ – масса шатунов,
- $m_{\text{осн}} = \rho \left(R_{\text{кол}} S^2 \left(\frac{4\pi}{15} + \frac{304}{75} \right) + R_{\text{кол}}^2 S \left(\frac{\pi}{3} + 0.4642\pi \right) \right)$ – масса основания колеса
- ρ – плотность материала

А также рассчитаем динамические характеристики такие как:

- $G_1 = \rho g \frac{\pi (0.87 * (2R_{\text{кол}} - 3))^2}{12}$ – вес диска
- $G_{\text{роб}} = (M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}})g$ – вес полезной нагрузки, приходящийся на все элементы, где $M_{\text{пол}}$ – масса полезной нагрузки, $m_{\text{роб}}$ – масса всех компонентов робота
- $M_{\text{вед}}^{\text{крит}} = (M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}})g R_{\text{кол}} f_{\text{тр}}$ – момент на одном колесе, чтобы сдвинуть робота с места, где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения покрышки робота о грунт, для дальнейших расчётов примем его в 0.7, также данный момент так как является моментом трения покоя, то при движении будет намного меньше. Для учёта 10% запаса по мощности введём добавочный коэффициент в 1.1 и тогда получим $M_{\text{вед}}^{\text{ном}} = 0.77 (M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}})g R_{\text{кол}}$
- $\Phi_S = 2.2 f_{\text{тр}} g m_j = 1.54 g m_j = 1.54 g \rho \left(\frac{4\pi R_{\text{кол}}^2 S}{75} - \frac{\pi S^2 R_{\text{кол}}}{120} + \frac{8}{3} S^2 R_{\text{кол}} + \frac{81\pi}{500} S^3 \right)$ – сила инерции дугообразного звена

Также помимо полученных параметров и их зависимостей, нам необходимо вывести граничные условия, благодаря которым возможно существования наших будущих сгенерированных систем. Таким параметром для данного механизма, а также для некоторых из оставшихся будет служить заложенная прочность.

Перед тем как выводить общие ограничения на прочность, нам нужно понять какой из элементов будет самым уязвимым. Благодаря многочисленным опытным образцам мы можем сделать вывод, что самые хрупкие части – это дугообразные звенья на концах специфических ползунов. Тогда обеспечив их прочность, мы можем гарантировать, что остальные компоненты тоже не прогнутся или разрушатся до истечения их установленного ресурса.

Рассмотрев данное звено, а также прочностные модели, которые были выведены ранее можно заметить, что оно будет схоже с дугообразным звеном подвески, но с определёнными заменами. Чтобы ранее выведенная модель совпала с новым случаем, нам необходимо ввести следующие замены:

$$\psi = 90, F_{\text{сопр}} = F_{\text{аморт}} = G_{\Sigma} = \frac{G_{\text{роб}}}{4} G = m_j g$$

Тогда получим следующее ограничение:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{15N}{2R_{\text{кол}} S \sigma_T} + \frac{45 \left(m_j g - \frac{M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}}}{4} g \right)^2}{S^2 N \sigma_T} - \frac{69.3 m_j g (N - 1.54 m_j g)}{S^2 N \sigma_T} \geq n_T - \text{максимальное}$$

напряжение в дуге, где $N = \sqrt{(1.45 m_j g)^2 + \left(m_j g - \frac{M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}}}{4} g \right)^2}$, σ_T – предел текучести для определённого материала, n_T – коэффициент запаса по текучести.

Для обеспечения хорошего запаса прочности возьмём $n_T = 2.5$, тогда окончательно получим:

$$\frac{15N}{2R_{\text{кол}} S \sigma_T} + \frac{45 \left(m_j g - \frac{M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}}}{4} g \right)^2}{S^2 N \sigma_T} - \frac{69.3 m_j g (N - 1.54 m_j g)}{S^2 N \sigma_T} \geq 2.5, \text{ где}$$

$$N = \sqrt{(1.45 m_j g)^2 + \left(m_j g - \frac{M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}}}{4} g \right)^2}$$

Подвеска

После определения параметров колеса нам необходимо рассчитать итоговую функцию для расчёта подвески. Как рассматривалось ранее в пункте 1.7.1 ограничения на подвеску можно наложить такие как:

$$\left\{ \frac{M_{\Sigma} R^2 \left(\frac{122,04 - 20,67b + 6,58a}{(|\Delta\varphi| + 2\pi + 1)e^{|\Delta\varphi| + 2\pi} - 2e^{|\Delta\varphi| + 2\pi} \frac{2}{3} b (|\Delta\varphi| + 2\pi)^3 + \frac{3a}{2} (|\Delta\varphi| + 2\pi)^2 - 3(121,46 - 20,67b + 6,58a)} \right)^2 * (122,04 - 20,67b + 6,58a)}{2 * ((|\Delta\varphi| + 2\pi)e^{|\Delta\varphi| + 2\pi} - 2e^{|\Delta\varphi| + 2\pi} \frac{2}{3} (|\Delta\varphi| + 2\pi) - b \frac{(|\Delta\varphi| + 2\pi)^4}{4} + \frac{a}{2} (|\Delta\varphi| + 2\pi)^3 - 3(121,46 - 20,67b + 6,58a)(|\Delta\varphi| + 2\pi) - (2293,64 - 779,2a))} \right. \\ \left. \frac{2N}{S^2 \sigma_T} + \frac{24R(G - F_{\text{сопр}} \sin\psi)(G - G_{\Sigma} + F_{\text{аморт}} - F_{\text{сопр}} \sin\psi)}{S^3 N \sigma_T} - \frac{24R(\Phi_S - F_{\text{сопр}} \cos\psi)}{S^3 \sigma_T} \left(1 - \frac{\Phi_S - F_{\text{сопр}} \cos\psi}{N} \right) - \frac{24R(G_{\Sigma} - F_{\text{аморт}})}{S^3 \sigma_T} \left(1 + \frac{G - G_{\Sigma}}{N} \right) \right\}$$

Где $N = \sqrt{(\Phi_S - F_{\text{сопр}} \cos\psi)^2 + (G + F_{\text{аморт}} - G_{\Sigma} - F_{\text{сопр}} \sin\psi)^2}$ – сила растяжения, R – радиус звена, G – вес звена, $F_{\text{сопр}}$ – сила возникающая в пружине, ψ – угол наклона пружины к горизонтальной оси, G_{Σ} – вес приходящийся на одно колесо робота, $F_{\text{аморт}}$ – демпфирующая сила в поршне Φ_S – сила инерции звена, S – высота звена, $h = \frac{S}{2}$ – толщина звена, $a =$

$\frac{4R(2(G_{\Sigma}-F_{\text{сопр.}})+G-F_{\text{аморт.}})}{m\left(\left(R+\frac{S}{2}\right)^2+\left(R-\frac{S}{2}\right)^2\right)}$ – коэффициент демпфирования, $b=\frac{4Rg}{\left(\left(R+\frac{S}{2}\right)^2+\left(R-\frac{S}{2}\right)^2\right)}$ – коэффициент формы подвески, m – масса звена.

Рассмотрим некоторые переменные применимо к нашей задаче, так G_{Σ} можно вычислить как:

$$G_{\Sigma} = \frac{G_{\text{роб}}}{4} = \frac{(M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}})g}{4}$$

$$M_{\Sigma} = \frac{M_{\text{роб}}}{4} = \frac{(M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}})}{4}$$

Данные неравенства были вычислены на основе прочностного расчёта и определения границ работы подвески. Таким образом для генерации точек обратной задачи, можно рассмотреть точки, которые будут удовлетворять данным условиям

Система «развал»

Рассматривая систему «развал» главным ограничением в данной системе будет прочность одного из стержней, а точнее несущих, будем далее называть их так. В данной системе несущими будут раскосные звенья, присвоим номера 5 и 6. Так как стержни в данной конструкции имеют стандартную форму конструкционного профиля, то для данных стержней прочным условием будет являться следующая формула:

$$\max \left\{ \begin{aligned} & \frac{(F_{1y}-F_{2y})\sin\varphi+(F_{1x}-F_{2x})\cos\varphi}{\frac{\pi([0.3d]^2-[0.2d]^2)}{4}+4[0.1d][0.95d]} + \frac{|M+(F_{1y}-F_{2y})\cos\varphi-(F_{1x}-F_{2x})\sin\varphi|}{0.0152482d^3}, \text{ при } z=\left(0, \frac{l}{2}\right) \\ & \frac{(F_{1y}-2F_{2y}+\Phi_{sy}-G)\sin\varphi+(F_{1x}-2F_{2x}+\Phi_{sx})\cos\varphi}{\frac{\pi([0.3d]^2-[0.2d]^2)}{4}+4[0.1d][0.95d]} + \frac{|M+(F_{1y}-F_{2y})\cos\varphi-(F_{1x}-F_{2x})\sin\varphi z+(\Phi_{sy}-F_{2y}-G)\cos\varphi-(\Phi_{sx}-F_{2x}-G)\sin\varphi|}{0.0152482d^3} \end{aligned} \right.$$

Где:

- $l=L_{\text{разв}}$, $\varphi=\frac{\pi}{2}$, $F_{1y}=F_{65}^y$, $F_{1x}=F_{65}^x$, $F_{2y}=F_{60}^y-\frac{G_{\text{роб}}}{2}$, $F_{2x}=F_{60}^x$, $M=0$, $d=\sqrt{2}S$ для стержня #6
- $l=\sqrt{2}L_{\text{разв}}$, $\varphi=\frac{\pi}{4}$, $F_{1y}=F_{65}^y$, $F_{1x}=F_{65}^x$, $F_{2y}=F_{45}^y-\frac{G_{\text{роб}}}{2}$, $F_{2x}=F_{45}^x$, $M=0$, $d=\sqrt{2}S$ для стержня #5

Также для оценки будем считать, что самой большой вес будет приходиться при статической нагрузке на работа, следовательно все инерционные составляющие уравнений станут равным 0. Тогда уравнение примет вид:

Для стержня #6

$$\max \left\{ \begin{aligned} & \frac{(F_{1y}-F_{2y})}{\frac{\pi([0.3\sqrt{2}S]^2-[0.2\sqrt{2}S]^2)}{4}+4[0.1\sqrt{2}S][0.95\sqrt{2}S]} + \frac{|(F_{1x}-F_{2x})z|}{0.0152482(\sqrt{2}S)^3}, \text{ при } z=\left(0, \frac{L_{\text{разв}}}{2}\right) \\ & \frac{(F_{1y}-2F_{2y}-G)\sin\varphi}{\frac{\pi([0.3\sqrt{2}S]^2-[0.2\sqrt{2}S]^2)}{4}+4[0.1\sqrt{2}S][0.95\sqrt{2}S]} + \frac{|(F_{1x}-F_{2x})z+F_{2x}\left(z-\frac{L_{\text{разв}}}{2}\right)|}{0.0152482(\sqrt{2}S)^3}, \text{ при } z=\left(\frac{L_{\text{разв}}}{2}, L_{\text{разв}}\right) \end{aligned} \right.$$

Где:

- $F_{1y}=F_{65}^y = \frac{2(\Delta_2+\Delta_4)(\Delta_5+\Delta_7)G_{12}}{(\Delta_1+\Delta_3)(\Delta_6+\Delta_8)} + \frac{2\Delta_4(\Delta_5+\Delta_7)G_2}{(\Delta_1+\Delta_3)(\Delta_6+\Delta_8)} - \frac{\Delta_8(-G_6+G)}{(\Delta_6+\Delta_8)}$
- $F_{1x}=F_{65}^x = -2\frac{\Delta_2+\Delta_4}{\Delta_1+\Delta_3}G_{12} - \frac{2\Delta_4}{\Delta_1+\Delta_3}G_2$
- $F_{2y}=F_{60}^y - \frac{G_{\text{роб}}}{2} = \frac{2(\Delta_2+\Delta_4)(\Delta_5+\Delta_7)G_{12}}{(\Delta_1+\Delta_3)(\Delta_6+\Delta_8)} + \frac{2\Delta_4(\Delta_5+\Delta_7)G_2}{(\Delta_1+\Delta_3)(\Delta_6+\Delta_8)} - \frac{\Delta_8(-G_6+G)}{(\Delta_6+\Delta_8)} - \frac{G_{\text{роб}}}{2}$
- $F_{2x}=F_{60}^x = -2\frac{\Delta_2+\Delta_4}{\Delta_1+\Delta_3}G_{12} - \frac{2\Delta_4}{\Delta_1+\Delta_3}G_2$
- $\Delta_1=\Delta_3=\Delta_5=\left|\frac{L_{\text{разв}}}{2}\sin\alpha\right|$
- $\Delta_2=\Delta_4=\left|\frac{L_{\text{разв}}}{2}\cos\alpha\right|$
- $\Delta_6=\left|\frac{L_{\text{разв}}}{2}\cos\alpha-2L_{\text{разв}}\right|$
- $\Delta_7=\left|\frac{L_{\text{разв}}}{2}\sin\alpha+L_{\text{разв}}*\sqrt{1-\left(\frac{(2-\cos\alpha)\cos\alpha}{2(1-\cos\alpha)}\right)^2}\right|$
- $\Delta_8=\left|L_{\text{разв}}*\frac{\cos\alpha}{2(1-\cos\alpha)}\right|$
- $G_{12}=F_{\text{аморт.}}$ – Усилие в пневмоцилиндре

- $G_2=G_6=m_{звена}g=\left(\frac{\pi([0.3\sqrt{2}S]^2-[0.2\sqrt{2}S]^2)}{4}+4[0.1\sqrt{2}S][0.95\sqrt{2}S]\right)L_{разв}\rho g$
- $G=\frac{G_{роб}}{2}=\frac{(M_{пол}+m_{роб})g}{2}$ - вес, приходящийся на систему развал
- α – угол отклонения от центрального положения стержня
- ρ – плотность материала стержней

Для стержня #5

$$\max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sqrt{2}(F_{1y}-F_{2y}+F_{1x}-F_{2x})}{\frac{\pi([0.3(\sqrt{2}S)]^2-[0.2(\sqrt{2}S)]^2)}{2}+8[0.1(\sqrt{2}S)][0.95(\sqrt{2}S)]} + \frac{\sqrt{2} |(F_{1y}-F_{2y})-(F_{1x}-F_{2x})z|}{0.0304964(\sqrt{2}S)^3}, \text{ при } z \\ \frac{\sqrt{2}(F_{1y}-2F_{2y}-G+F_{1x}-2F_{2x})}{\frac{\pi([0.3(\sqrt{2}S)]^2-[0.2(\sqrt{2}S)]^2)}{2}+8[0.1(\sqrt{2}S)][0.95(\sqrt{2}S)]} + \frac{\sqrt{2} |(F_{1y}-2F_{2y}-G)-(F_{1x}-F_{2x})z|}{0.0304964(\sqrt{2}S)^3} \end{array} \right.$$

Где:

- $F_{1y}=F_{65}^y=\frac{2(\Delta_2+\Delta_4)(\Delta_5+\Delta_7)G_{12}}{(\Delta_1+\Delta_3)(\Delta_6+\Delta_8)}+\frac{2\Delta_4(\Delta_5+\Delta_7)G_2}{(\Delta_1+\Delta_3)(\Delta_6+\Delta_8)}-\frac{\Delta_8(-G_6+G)}{(\Delta_6+\Delta_8)}$
- $F_{1x}=F_{65}^x=-2\frac{\Delta_2+\Delta_4}{\Delta_1+\Delta_3}G_{12}-\frac{2\Delta_4}{\Delta_1+\Delta_3}G_2$
- $F_{2y}=F_{45}^y-\frac{G_{роб}}{2}=F_{45}^y-\frac{2(\Delta_2+\Delta_4)(\Delta_5+\Delta_7)G_{12}}{(\Delta_1+\Delta_3)(\Delta_6+\Delta_8)}-\frac{2\Delta_4(\Delta_5+\Delta_7)G_2}{(\Delta_1+\Delta_3)(\Delta_6+\Delta_8)}++\frac{\Delta_8(-G_6+G)}{(\Delta_6+\Delta_8)}+G_5$ -
- $\frac{G_{роб}}{2}$
- $F_{2x}=F_{45}^x=2\frac{\Delta_2+\Delta_4}{\Delta_1+\Delta_3}G_{12}+\frac{2\Delta_4}{\Delta_1+\Delta_3}G_2$
- $\Delta_1=\Delta_3=\Delta_5=\left|\frac{L_{разв}}{2}\sin\alpha\right|$
- $\Delta_2=\Delta_4=\left|\frac{L_{разв}}{2}\cos\alpha\right|$
- $\Delta_6=\left|\frac{L_{разв}}{2}\cos\alpha-2L_{разв}\right|$
- $\Delta_7=\left|\frac{L_{разв}}{2}\sin\alpha+L_{разв}\sqrt{1-\left(\frac{(2-\cos\alpha)\cos\alpha}{2(1-\cos\alpha)}\right)^2}\right|$
- $\Delta_8=\left|L_{разв}\frac{\cos\alpha}{2(1-\cos\alpha)}\right|$
- $G_{12}=F_{аморт.}$ – Усилие в пневмоцилиндре
- $G_2=G_6=m_{звена}g=\left(\frac{\pi([0.3\sqrt{2}S]^2-[0.2\sqrt{2}S]^2)}{4}+4[0.1\sqrt{2}S][0.95\sqrt{2}S]\right)L_{разв}\rho g$
- $G_5=\sqrt{2}m_{звена}g=\sqrt{2}\left(\frac{\pi([0.3\sqrt{2}S]^2-[0.2\sqrt{2}S]^2)}{4}+4[0.1\sqrt{2}S][0.95\sqrt{2}S]\right)L_{разв}\rho g$
- $G=\frac{G_{роб}}{2}=\frac{(M_{пол}+m_{роб})g}{2}$ - вес, приходящийся на систему развал
- α – угол отклонения от центрального положения стержня
- ρ – плотность материала стержней

Таким образом на основе динамических и кинематических параметрических уравнений, представленных в статьях [1][2][3] мы получаем полноценную математическую модель, на основе которой можно проводить не только проектирование комплексов, решая обратную задачу при помощи следующей теоремы:

Теорема 1

Пусть имеется произвольная функция $F(x_1, \dots, x_n)$ зависящая от множества значений x_1, \dots, x_n , а также $f=F(x_1^*, \dots, x_n^*)$, тогда взяв заранее известные наборы $\overline{x_i}=\{x_1^i, \dots, x_n^i\}$, такие что $|f_i=F(\overline{x_i})-f|\leq 0.5f^{**}$, $i=\overline{0, m}$, $m > n-1$, набор x_1^*, \dots, x_n^* вычисляется как:

$$x_k^*(u) \approx \sum_{i=0}^m \frac{m!}{i!(m-i)!} u^i (1-u)^{m-i} x_{ki}$$

Где $k=\overline{1, n}$, $u \in [0, 1]$ вычисляется из условия

$$\left(\sum_{i=0}^m \frac{m!}{i!(m-i)!} u^i (1-u)^{m-i} f_i - f\right)^2 + f - \sum_{i=0}^m f_i \frac{m!(1+i)^2}{i!} \sum_{j=0}^{m-i} \frac{(-1)^j}{j!(m-i-j)!(j+i+1)} = 0$$

Где благодаря вычисления метрики мы получаем оптимальные значения входных параметров, ведь метод, легший в основу данной теоремы, является не только численным методом решения обратных задач, но и регуляционным методом при наличии множества некорректных стохастических данных. Именно данное замечание позволяет использовать и данную теорему и математическую модель робота при прогнозировании ресурса и состояния того или иного узла робота в режиме реального времени, причём скорость вычисления системы очень высока, расчёт и прогнозирование данных с точность в 1.401e-05% при анализе на основе 500 точек с квадратичной размерностью сетки – наиболее оптимальной и точной при генерации данных заняло всего 1.3с на микроконтроллере Raspberry PI 4B 8 Gb.

Также как было видно из формул, описанных выше важным параметром, выступает масса робота

$m_{роб}$, которую на основе конструкции мы можем вывести как:

$$m_{роб} = 8m_1 + 32m_j + 64m_i + 4m_{осн_кол} + 8m_{дуг} + 4m_{осн_подв} + 4m_{стен.} + 8m_{крыш.} + 20m_{звена} + 8m_{дл. звена} + 4m_{осн_разв} + 4m_{полз.} + m_{рамы} + 4m_{ред.} + m_{эл.}$$

Где:

$$m_{дуг} = \left(\pi R_{подв.} S_{подв.} + \frac{\pi S_{подв.}^2}{4} \right) \frac{S_{подв.} \rho}{2} - \text{масса дуговых элементов подвески Кристи}$$

$$m_{осн_подв} = \left[\left(\left(S_{подв.} + \left(\frac{\pi}{2} + \sqrt{3} - 1 \right) R_{подв.} \right) (2S_{подв.} + 2R_{подв.}) + R_{подв.}^2 \right. \right. \\ \left. \left(\frac{(10 + \sqrt{3})\pi}{6} + 2\sqrt{3} - 1 \right) - \frac{\pi S_{подв.}^2}{4} - S_{подв.} \left(\left(\frac{\pi}{2} + \sqrt{3} - 1 \right) R_{подв.} + 4R_{подв.} (\sqrt{3} - \sqrt{2} - \sqrt{3}) \right) \right] S_{подв.} \rho - \text{масса основания подвески}$$

$$m_{крыш.} = \left[\left(\left(S_{подв.} + \left(\frac{\pi}{2} + \sqrt{3} - 1 \right) R_{подв.} \right) (2S_{подв.} + 2R_{подв.}) + R_{подв.}^2 \right. \right. \\ \left. \left(\frac{(10 + \sqrt{3})\pi}{6} + 2\sqrt{3} - 1 \right) \right] \frac{S_{подв.} \rho}{4} - \text{масса крышек кожуха подвески}$$

$$m_{стен.} = \left[6S_{подв.} + \left(\frac{\pi}{2} + 5\sqrt{3} + 3 - 4\sqrt{2} - \sqrt{3} \right) R_{подв.} \right] \frac{3S_{подв.}^2 \rho}{4} - \text{масса стенок кожуха подвески}$$

$$m_{рамы} = (5R_{рамы} + 4Z_{рамы} + 4(1 + \sqrt{2})L_{рамы}) \left(\frac{\pi([0.3\sqrt{2}S]^2 - [0.2\sqrt{2}S]^2)}{4} + 4[0.1\sqrt{2}S][0.95\sqrt{2}S] \right) \rho - \text{масса рамы робота}$$

$$m_{звена} = \left(\frac{\pi([0.3\sqrt{2}S]^2 - [0.2\sqrt{2}S]^2)}{4} + 4[0.1\sqrt{2}S][0.95\sqrt{2}S] \right) L_{разв} \rho - \text{масса обычного звена системы «развал»}$$

$$m_{дл. звена} = \sqrt{2} \left(\frac{\pi([0.3\sqrt{2}S]^2 - [0.2\sqrt{2}S]^2)}{4} + 4[0.1\sqrt{2}S][0.95\sqrt{2}S] \right) L_{разв} \rho - \text{масса длинного звена системы «развал»}$$

$$m_{осн_разв} = 4 \left(\frac{\pi([0.3\sqrt{2}S]^2 - [0.2\sqrt{2}S]^2)}{4} + 4[0.1\sqrt{2}S][0.95\sqrt{2}S] \right) L_{разв} \rho - \text{балок основания системы «развал»}$$

$$m_{полз.} = \rho \left(\frac{4\pi L_{разв}^2 S}{75} - \frac{\pi S^2 L_{разв}}{120} + \frac{8}{3} S^2 L_{разв} + \frac{81\pi}{500} S^3 \right) - \text{масса ползунов системы «развал»}$$

$$m_1 = \frac{\rho S \pi}{12} (0.87 * (2R - 3))^2 - \text{масса поворотного диска адаптивного колеса,}$$

$$m_j = \rho \left(\frac{4\pi R_{кол}^2 S}{75} - \frac{\pi S^2 R_{кол}}{120} + \frac{8}{3} S^2 R_{кол} + \frac{81\pi}{500} S^3 \right) - \text{масса специфических ползунов адаптивного колеса,}$$

$$m_i = \frac{\rho S}{3} \left(S(R - 1.5) * 0.87 + \frac{1}{3} R_{кол} S + 0.07 \pi S^2 \right) - \text{масса шатунов адаптивного колеса,}$$

$$m_{осн_кол} = \rho \left(R_{кол} S^2 \left(\frac{4\pi}{15} + \frac{304}{75} \right) + R_{кол}^2 S \left(\frac{\pi}{3} + 0.4642\pi \right) \right) - \text{масса основания колеса}$$

ρ – плотность материала

$R_{подв.}$ – радиус дугового звена подвески

$S_{подв.}$ – ширина дугового звена подвески

$Z_{\text{рамы}}$ – высота подложки рамы
 $L_{\text{рамы}}$ – ширина половины каркаса рамы
 $R_{\text{рамы}}$ – длина рамы
 S – толщина профиля рамы
 $L_{\text{разв}}$ – длина звена системы «развал»
 S – толщина звена системы «развал»
 $R_{\text{кол}}$ – радиус колеса
 S – толщина колеса

Кульминационным достижением проделанной работы явилась разработка комплексной модели, способной автоматически генерировать разнообразные механические элементы и интегрировать их в единую функциональную систему (рис. 1). Эта модель, базирующаяся на мощностях API популярного инженерного программного обеспечения КОМПАС-3D, нашла широкое применение на множестве современных промышленных предприятий.

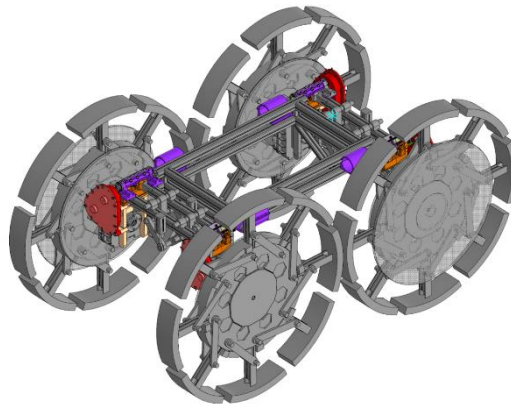


Рис. 1. 3D модель автоматически-сгенерированной сборки механики робота

Библиографический список

1. Морозов Е.П., Комаров Д.А., Сащенко Д.В. Проектирование и первичный расчет многоцелевого мобильного робототехнического комплекса КДМЕ 23 — адаптивные колёса. Материалы II Весенней научной сессии СНО НИЯУ МИФИ. Москва, 2024.
2. Морозов Е.П., Комаров Д.А., Сащенко Д.В. Проектирование и первичный расчёт многоцелевого мобильного робототехнического комплекса КДМЕ-23 подвеска Кристи. Виттевские чтения – 2024: материалы XXIV Международного конгресса молодой науки. Под ред. Атанасовой В.М., Баранова Д.Н., Жидкова А.С., Клеммера П.С. Электронное издание. Москва: ЧОУВО «Московский университет имени С.Ю. Витте», 2024. С. 1707.
3. Морозов Е.П., Комаров Д.А., Сащенко Д.В. Проектирование и первичный расчёт многоцелевого мобильного робототехнического комплекса КДМЕ-23 система «Развал». Международный журнал «Наука Плюс». Отв. ред. Смирнова Ю.В. Саратов, 2024. № 25. С. 249. URL: https://www.naukaplus.ru/nauchny_zhurnal
4. Ефимов Н. В., Розендорн Э. Р. Линейная алгебра и многомерная геометрия. – Физматлит, 2003
5. Смелягин А. И. Применение аналогов скоростей и ускорений для исследования движений механических систем с помощью новых аксиом и теорем //Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2016. – №. 2. – С. 21-29
6. Курс теоретической механики : учебник для вузов / Дронг В. И., Дубинин В. В., Ильин М. М. [и др.] ; ред. Колесников К. С., Дубинин В. В. - 5-е изд., испр. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. - 580 с.
7. Численные методы : учебное пособие для вузов / А. В. Зенков. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 136 с.
8. Макаров И.М. Робототехника: история и перспективы / И.М.Макаров, Ю.И.Топчиев; Рос. акад. наук. - Москва: Наука; МАИ, 2003. - 349 с.: ил.

УДК 621.833

ФОРМИРОВАНИЕ ВЗАИМООГИБАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОГО ИЗНОСА

Р. Р. Прудников

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

На практике мы часто сталкиваемся с необходимостью снижения затрат и повышения эффективности производства. Это требование часто реализуется за счет снижения веса изготавливаемых изделий и использования технологий, которые автоматизируют производство, упрощают его и сокращают требуемое время изготовления.

Например, такой способ изготовления, как 3D-печать, является вариативным и позволяет создавать очень сложные объекты, которые невозможно было бы изготовить традиционными методами. Данные технологии принято называть аддитивными и применять для прототипирования. Однако их минусами можно назвать относительно высокую стоимость высококачественного сырья и относительно небольшую производительность по сравнению со специализированным оборудованием.

Со временем компании начали предлагать более совершенные технологии 3D-печати из таких материалов, как металлы и композитные пластики. Темпы технологического развития аддитивных технологий огромны, и многое в этой области еще не изучено.

Внешний вид и качество изготавливаемых изделий практически полностью зависят от той степени точности, которую способна обеспечить технология 3D-печати [1].

Несмотря на преимущества технологии SLS, достижение оптимального качества обработки поверхности и точности размеров изготавливаемых зубчатых колес остается серьезной проблемой. Шлифовка, как метод последующей обработки, является довольно трудоемким и может не подходить для уникальных геометрических форм, получаемых с помощью технологий аддитивного производства [2].

Процесс взаимного износа предполагает целенаправленное взаимодействие двух поверхностей в контролируемых условиях, что приводит к постепенному формированию взаимно соответствующих поверхностей. Этот метод не только улучшает качество обработки поверхности, но и улучшает функциональные характеристики зубчатых колес за счет улучшения характеристик зацепления и снижения трения.

Для решения проблемы, описанной в данной работе, была применена технология притирки зубчатых пар, которая до недавнего времени не находила широкого применения в данной области. Однако сложная геометрия зубчатых колес, применяемых в прецессирующих редукторах, и чрезвычайная дороговизна изготовления их традиционными методами обусловили применение технологии взаимного износа зубчатых колес с применением абразивной алмазной пасты. Пример таких зубчатых колес представлен на рис. 1.

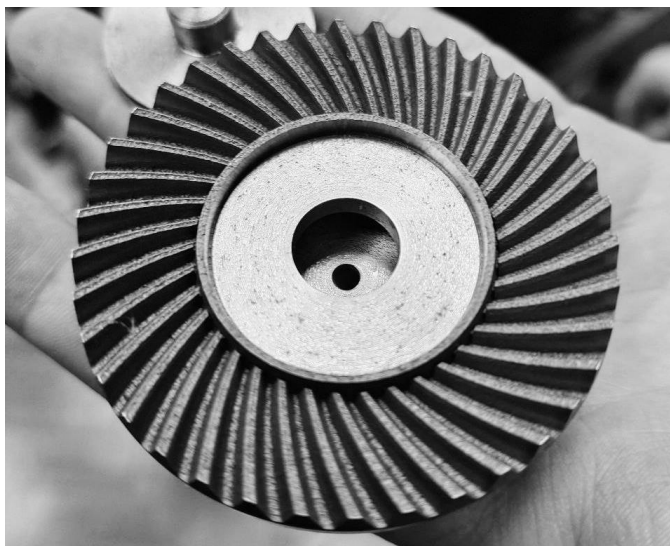


Рис. 1. Выходное зубчатое колесо прецессирующего редуктора до притирки

Использование аддитивных технологий для изготовления зубчатых колес прецессионного редуктора ведет за собой к ряду проблем, влияющих на результат печати. Это и проблемы, связанные с точностью позиционирования сопла 3D-принтера, обусловленные величиной шага шаговых двигателей, и сложная геометрия изготавливаемых деталей, и усадка внутренних полостей при остывании, и преобразование объемной модели в STL-файл для печати, и дальнейшее создание G-кода и другие сложности, в той или иной степени влияющие на степени точности эвольвентной боковой поверхности зубцов.

Рассчитанный по ГОСТ 16532—70 для зубчатых колес допуск на форму боковой эвольвентной поверхности составляет 30 мкм [3]:

$$f_{f\alpha T} = (0,55m_n + 5)(\sqrt{2})^{(A-5)},$$

где A — степень точности;

m_n — нормальный модуль.

При оценке степени точности изготовления зубчатых колес необходимо иметь средства измерения, способные определить соответствие качества и параметров боковой поверхности зубца требованиям чертежа и стандартам качества. Выявление дефектов и отклонений от номинальной формы боковой поверхности зубца, превышающих допустимые значения, позволяет предотвратить такие явления, как уменьшение времени работы зубчатого колеса, несоответствие рабочих характеристик

зубчатого зацепления заявленным, заклинивание. Для оценки этих параметров может применяться эвольвентомер.

Эвольвентомер — это зубоизмерительный прибор, предназначенный для измерения профиля зуба эвольвентных зубчатых колёс в сечении, перпендикулярном оси колёс. Принцип его работы заключается в сопоставлении теоретической эвольвенты, воспроизводимой прибором, с реальной, полученной при формировании боковой поверхности зуба.

В общем виде погрешность отклонения профиля боковой поверхности зуба представляет собой кривую, расположенную в заданном диапазоне (допуск на форму эвольвентной боковой поверхности) от теоретической эвольвенты (рисунок 2) [4].

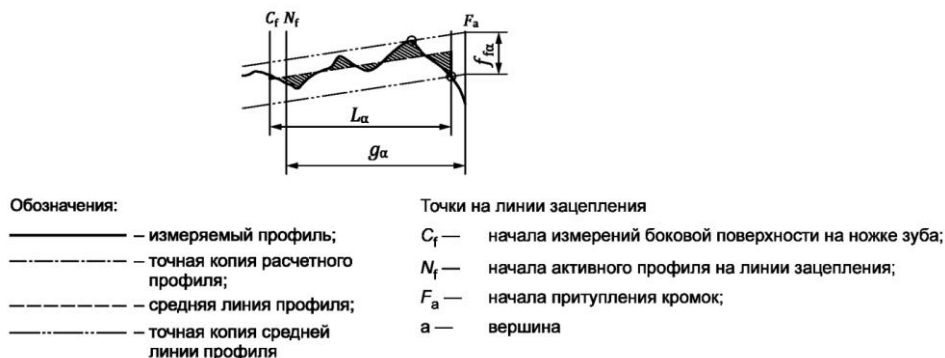


Рис. 2. Погрешность профиля с немодифицированной эвольвентой (ГОСТ ISO 1328-1—2017)

Измерения профилей боковых поверхностей зубьев проводятся для 2 пар зубчатых колес прецессирующего редуктора. Таким образом есть возможность получить усредненное значение величины отклонения от теоретической эвольвенты бокового профиля зуба с учетом припуска на последующую его притирку.

Результаты произведенных измерений представлены на рис.3.

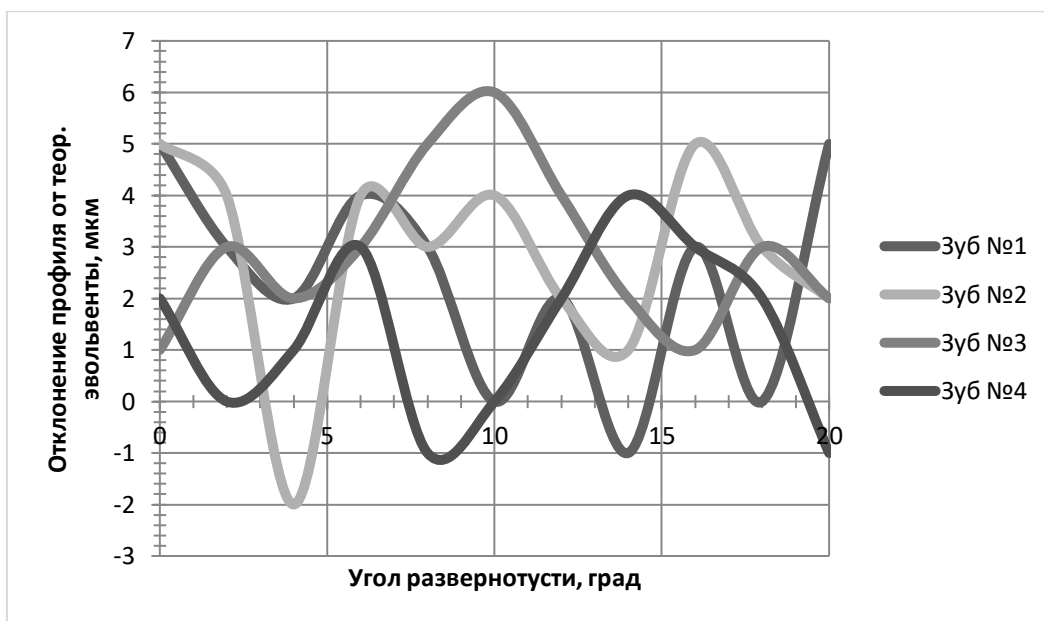


Рис.3. График отклонения профиля зубьев от теоретической эвольвенты с учетом припуска до притирки

Несмотря на относительно высокую точность, которую обеспечивает технология SLM, поверхность зубчатых колес имеет микронеровности и шероховатости, образующиеся при спекании металлического порошка под воздействием лазера. Средняя шероховатость поверхности (R_a) деталей, напечатанных на 3D-принтере методом SLM, составляет около 3,2–10 мкм (4-5 класс), что намного выше, чем шероховатость деталей, изготовленных традиционными способами, 0,4-1,6 мкм (6-8 класс). Это приводит к повышенному износу и снижению ресурса работы редуктора. Притирка зубчатых пар редуктора помогает сгладить шероховатости за счет взаимного износа поверхностного слоя материала сопряженных поверхностей.

Притирка зубчатых пар проводится на специализированном стенде в 3 этапа, каждый из которых обусловлен особенностями технологии притирки и результатами косвенного промежуточного контроля качества обрабатываемых поверхностей.

На каждом этапе используются абразивные алмазные пасты разной зернистости с шагом зернистости не больше двух.

Так, для первого этапа притирки, черновой доводки, который длится до 0,200 мм до схождения теоретических конусов зубчатых колес, используется алмазная абразивная паста зернистостью 40/28. Для второго, предварительной доводки, до 0,050 мм до схождения теоретических конусов — 28/20, для третьего, точной доводки и предварительного полирования, зернистость составляет 3/2, что позволяет точно попасть в точку 0,000 мм теоретического схождения конусов зубчатых колес [5].

Однако такая технология является трудоемкой и затратной по времени, т.к. на притирку одной пары зубчатых колес уходит порядка 16 часов времени работы станда, без учета времени на контроль качества обрабатываемых поверхностей в точках промежуточного контроля, а также технологических операций, связанных с промывкой зубчатых пар и заменой абразивной алмазной пасты.

Вторым существенным недостатком метода взаимного износа с применением алмазной абразивной пасты является невозможность точного описания полученной боковой поверхности профиля зуба, что обусловлено случайностью процессов, происходящих в процессе притирки внутри оросителя. Это явление делает невозможным взаимозаменяемость зубчатых колес, что повышает требования к их прочности и износостойкости, и, как следствие, стоимость.

Однако случайность процессов также обуславливает высокое качество взаимоигибающих поверхностей профилей зубьев, что позволяет более равномерно распределять нагрузку в зубчатом зацеплении и повысить срок эксплуатации, что является несравненным преимуществом данной технологии.

Для оценки качества эвольвентных боковых поверхностей зубьев были проведены повторные измерения с помощью эвольвентомера, результаты которых приведены на рис. 4. Очевидно, что отклонение от теоретической эвольвенты профиля зуба составляет не более 6 мкм, что говорит о высокой эффективности применения метода взаимного износа для изготовления зубчатых колес сложной геометрии и повышении срока службы механических узлов, в которых применяются такие зубчатые пары.

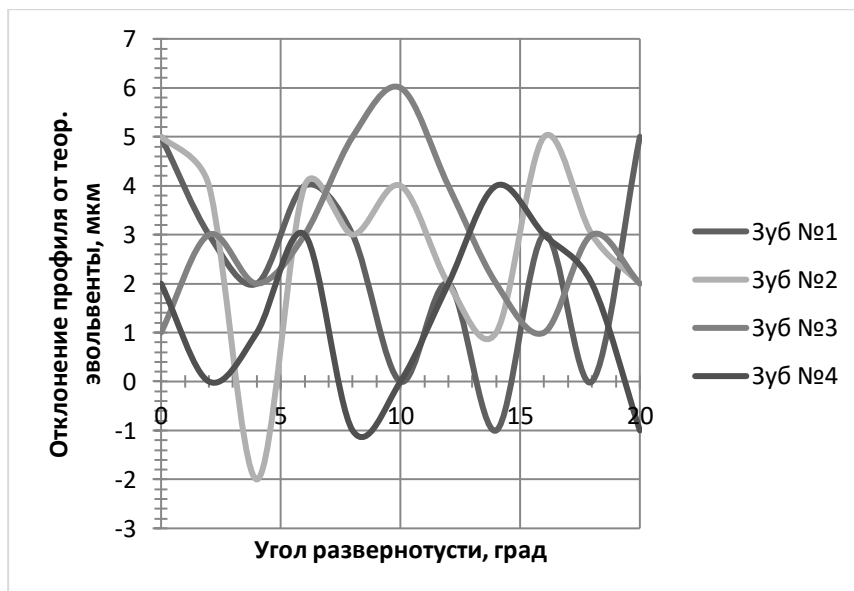


Рис. 4. График отклонения профиля зубьев от теоретической эвольвенты после притирки

Полученные после притирки боковые поверхности зубьев имели практически зеркальную поверхность (рис. 5 и рис. 5), что подтверждает результативность выбранного метода.

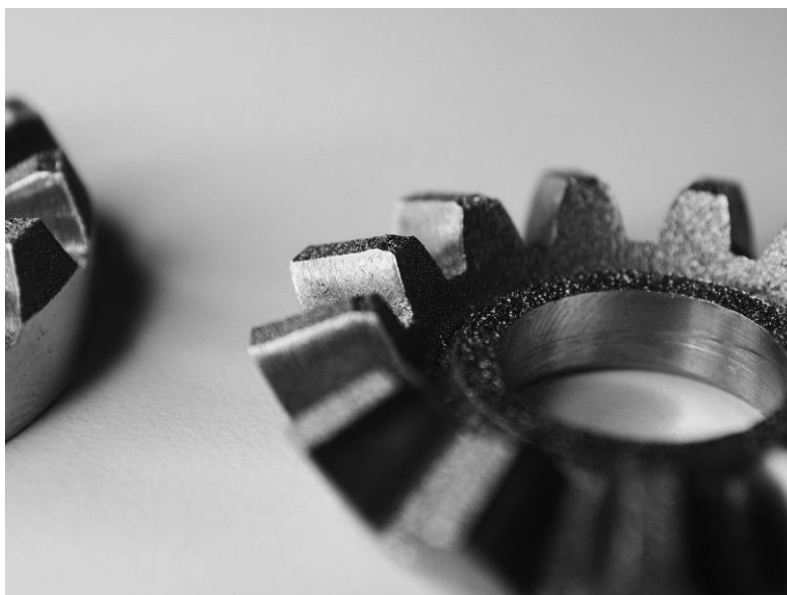


Рис. 5. Боковая поверхность зубьев выходного колеса после притирки



Рис. 6. Боковая поверхность зубьев сателлита после притирки

На данный момент поставлена задача разработки математической модели для повышения точности существующего метода взаимного износа с использованием абразивной алмазной пасты, повторяемости результата и достижения взаимозаменяемости зубчатых колес.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Н. Г. Яковенко

Библиографический список

1. Phononic crystal artifacts for real-time in situ quality monitoring in additive manufacturing. / . X. Xu, C.K.P. Vallabh, Z.J. Cleland, and C. Cetinkaya. — URL: https://www.researchgate.net/publication/317255882_Phononic_Artifacts_for_Real-time_In-Situ_Quality_Monitoring_of_3D-Printed_Objects_at_FiberBond-scale (дата обращения 11.12.2024).
2. Технологии и материалы 3D-печати: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. — URL: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6617/1/Shkuro.pdf> (дата обращения: 11.12.2024).
3. ГОСТ 16532-70 «Передачи цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии.»
4. ГОСТ ISO 1328-1—2017 «Передачи зубчатые цилиндрические. Система .ISO Классификация допусков на боковые поверхности зубьев.»
5. Масловский В.В. Доводочные и притирочные работы/ /Москва, "Высшая школа", 1971 г. С. 32 – 49

УДК 531.36:621.865.8

**РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ С ПОСТОЯННОЙ
ДЛИНОЙ СТОЕК ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО ВАКУУМА**
В.В. Полянский, Н.М. Мухамедов

Введение

Установки синхротронного излучения (СИ) представляют собой уникальные научные инструменты, которые широко применяются в различных областях, включая физику, химию, биологию, материаловедение и медицину. Эти установки позволяют исследовать структуру и свойства материалов на атомарном и молекулярном уровнях благодаря высокоинтенсивному излучению, генерируемому при движении релятивистских электронов в магнитном поле. Однако работа в условиях глубокого вакуума, необходимого для обеспечения беспрепятственного движения электронов, предъявляет особые требования к оборудованию, используемому в таких установках.

Одной из ключевых задач представленного проекта является разработка механизмов позиционирования, которые могут работать в условиях вакуума с давлением до 10^{-10} мбар и обеспечивать угловое разрешение полезной нагрузки: $<1''$, а линейное разрешение: <0.1 мкм. Традиционные механизмы с последовательной кинематикой, такие как роботы-манипуляторы, часто не удовлетворяют требованиям по точности, компактности и надежности. В добавок, расположение приводных элементов в вакууме, является труднореализуемой задачей и накладывает ряд ограничений на выбор приводного устройства. В этом контексте механизмы с параллельной структурой, такие как гексаподы, представляют особый интерес благодаря их высокой жесткости, точности и компактности. Но их применение в условиях глубокого вакуума осложняется необходимостью минимизации подвижных элементов в рабочей (вакуумной) зоне, минимизация газовой выгрузки, обеспечения герметичности, использования специализированных материалов для стоек и шарниров, и, необходимости отделения приводных элементов от вакуумной зоны и пр.

Таким образом, целью данной работы является разработка механизма с параллельной структурой, обладающего постоянной длиной стоек и способного эффективно функционировать в условиях глубокого вакуума.

Обзор существующих решений

Механизмы с параллельной структурой, такие как гексаподы, широко используются в различных областях, включая аэрокосмическую промышленность, медицинскую технику и научное оборудование. Их основное преимущество заключается в высокой точности позиционирования, которая достигается за счет распределения нагрузки между несколькими стойками и приводами. Параллельная кинематика гексаподов обеспечивает высокую жесткость, при этом они позволяют управлять положением полезной нагрузки по шести степеням свободы, обеспечивая плавное и быстрое перемещение. Однако традиционные гексаподы имеют переменную длину стоек, что усложняет их конструкцию и повышает требования к герметизации приводов в условиях вакуума. Также в таких традиционных схемах гексаподов приводные элементы находятся непосредственно в стойках переменной длины, поэтому к ним предъявляются специфические требования, негативно сказывающиеся на эффективности их работы.

В научной литературе описаны различные подходы к созданию механизмов с параллельной структурой для работы в вакууме. Например, используются специальные вакуумные электроприводы, однако к ним предъявляются жесткие требования такие, как отсутствие испарения веществ, содержащихся в смазках, клеевых соединениях, изоляции обмоток и элементах корпуса, чтобы не нарушить чистоту вакуума при нагреве. Также в вакууме из-за отсутствия конвекционного отвода тепла мотор может очень быстро нагреться, что повышает риск нарушения изоляции обмоток и выхода мотора из строя [4]. Могут использоваться магнитные приводы. Магнитные приводы (например, линейные двигатели, магнитные муфты) хорошо подходят для работы в вакууме, так как не требуют механического контакта между движущимися частями. Они не выделяют газов и не требуют смазки. Однако магнитные приводы могут создавать магнитные поля, которые будут мешать работе чувствительного оборудования. Также могут использоваться пьезоэлектрические приводы, которые работают на основе деформации пьезоэлектрических материалов под действием электрического поля. Они компактны, точны и не выделяют газов. Однако они очень чувствительны к температурным изменениям. Кроме того, материалы, используемые в конструкциях, должны обладать низким газовой выделением и высокой устойчивостью к радиации, что сужает выбор доступных вариантов.

Существующие механизмы также часто не учитывают специфику работы в установках синхротронного излучения, где требуется высокая стабильность и минимальное влияние на вакуумную среду, а также стойкость к радиации.

Все вышесказанное делает актуальной задачу разработки новой конструкции гексаподов, которая бы учитывала все предъявляемые требования.

Особенности конструкции механизма

Основной идеей разрабатываемого механизма является использование постоянной длины стоек, что позволяет упростить конструкцию и снизить требования к герметизации. В отличие от традиционных гексаподов, где длина стоек изменяется с помощью линейных приводов, в данной конструкции движение обеспечивается за счет вертикального перемещения нижних опор стоек, жестко соединенных с линейными приводами. За счет этого появляется возможность расположить приводы вне вакуумной зоны и минимизировать количество подвижных элементов, контактирующих с вакуумной средой.

Данное решение, помимо устранения недостатков, основывается еще и на анализе существующих конструкций и схем. Например, А.Ф. Крайневым и В.А. Глазуновым разработан ряд схем, в которых рабочая зона отделена от приводных элементов [1]. Также существует модификация платформы Гауфа, где поступательные пары расположены на основании, а универсальные и сферические шарниры в каждой цепи соединяют звенья фиксированной длины. Эта схема была применена в механизме «активного запястья», разработанном Мерле и Госсленом [2].

Для разделения рабочей (вакуумной) зоны от атмосферной зоны, где расположены приводные элементы, возникает вопрос выбора ввода движения в вакуум для герметизации подвижных соединений. Самым оптимальным решением является использование сильфонов. Сильфоны могут выдерживать экстремальные условия вакуума, обеспечивая герметичность и работоспособность системы. Благодаря возможности использования различных материалов, включая нержавеющую сталь, сильфоны могут выдерживать воздействие различных агрессивных сред, тем самым продлевая срок службы. Доступные различные внутренние диаметры, длины и способы соединения, вакуумные сильфоны могут быть настроены в соответствии с конкретными требованиями различных вакуумных систем. Простая структура сильфонов делает их простыми в установке и обслуживании, снижая общие эксплуатационные расходы [5].

Особое внимание следует уделить шарнирным соединениям, с помощью которых стойки крепятся к платформам. Применение шарнирных соединений в вакуумных условиях имеет свои особенности, связанные с отсутствием атмосферы, низким давлением и требованиями к минимальному газовыделению. Эти факторы влияют на выбор материалов, смазок и конструктивных решений для минимизации трения и обеспечения долговечности механизмов. Для обеспечения высокой точности позиционирования предлагается использовать прецизионные шарикоподшипники и керамические элементы, которые обладают низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Также для строго вертикального перемещения промежуточных стоек, жестко соединенных с линейным приводом, предлагается использовать прецизионные линейные подшипники.

Кроме того, важным аспектом в конструкции является, непосредственно, выбор приводных элементов, которые обеспечивали бы необходимую точность линейного перемещения. В качестве приводов могут быть рассмотрены шаговые электродвигатели и шаговые пьезоактуаторы. Каждый из этих типов приводов имеет свои преимущества и ограничения, что делает их применимыми в различных условиях и для решения специфических задач.

Шаговые электродвигатели, благодаря высокой мощности и надежности, идеально подходят для систем, требующих перемещения больших нагрузок с высокой точностью позиционирования. Они способны выдерживать значительные механические нагрузки и обеспечивать стабильную работу в условиях длительной эксплуатации. Однако, для достижения необходимой точности, снижения люфта и повышения грузоподъемности шаговые электродвигатели должны использоваться в сочетании с редукторами. Это увеличивает сложность конструкции, но обеспечивает высокую нагрузочную способность и стабильность работы, что особенно важно в задачах, где требуется точное позиционирование полезной нагрузки, обладающей большой массой. Для обеспечения строго вертикального линейного перемещения промежуточных стоек потребуется разработка специализированного линейного актуатора на базе шагового двигателя, способного обеспечивать заданные точностные характеристики линейного перемещения. Реализация такого актуатора предполагает интеграцию шагового двигателя с механической системой преобразования вращательного движения в поступательное, что обеспечит высокую точность позиционирования и повторяемость перемещений. Ключевыми аспектами разработки являются минимизация люфтов, снижение влияния внешних возмущений и обеспечение стабильности работы в условиях переменных нагрузок. Применение шагового двигателя в качестве привода позволяет достичь высокой дискретности перемещений, что особенно важно для задач, требующих прецизионного управления.

Шаговые пьезоактуаторы, обладающие исключительной точностью и быстродействием, применяются в задачах, где необходимы микро- и наноперемещения. Они способны обеспечивать перемещения с точностью до нанометров, что делает их незаменимыми в высокоточных научных и промышленных приложениях. Однако, пьезоактуаторы имеют ограниченную нагрузочную способность, что делает их непригодными для работы с большими массами. Кроме того, их работа может быть ограничена необходимостью использования специализированных источников питания.

Выбор привода зависит от конкретных требований к нагрузке, точности, скорости и типа перемещения, что делает каждый тип привода уникальным для определенных задач. Шаговые электродвигатели являются оптимальным решением для задач позиционирования и удержания значительных нагрузок, однако, для достижения высокой точности они требуют реализации на их основе линейного актуатора и использования редукторов. Шаговые пьезоактуаторы незаменимы в задачах, требующих прецизионного движения на микро- и наноуровне. Однако, пьезоактуаторы имеют ограниченную нагрузочную способность и не способны стабильно удерживать значительные массы.

Важным дополнением к системе привода является применение датчиков обратной связи, которые обеспечивают контроль и коррекцию положения штоков в реальном времени, что критически важно для достижения высокой точности линейного перемещения. Датчики обратной связи играют ключевую роль в обеспечении стабильности и точности работы системы, особенно в прецизионных устройствах, таких как гексаподы, где даже минимальные отклонения могут привести к значительным ошибкам. Для отслеживания позиционирования могут использоваться различные типы датчиков, каждый из которых

имеет свои преимущества и ограничения в зависимости от условий эксплуатации и требований к точности.

Одним из наиболее распространенных типов датчиков являются энкодеры, которые делятся на оптические и магнитные. Оптические энкодеры основаны на считывании световых импульсов, проходящих через специальную шкалу или диск с нанесенными метками. Они обеспечивают исключительную точность и высокую разрешающую способность, что делает их идеальными для задач, требующих прецизионного позиционирования. Однако, оптические энкодеры могут быть чувствительны к вибрациям и другим внешним воздействиям. Магнитные энкодеры, работающие на основе изменения магнитного поля, более устойчивы к внешним воздействиям. Они также обладают высокой надежностью и долговечностью, хотя их точность может быть несколько ниже, чем у оптических энкодеров.

Также важным вопросом является место размещения датчиков. Если датчики размещать в зоне вакуума, что значительно повысит точность, то в этом случае на датчики накладывается ряд ограничений. В условиях вакуума, где традиционные датчики могут быть неприменимы, используются специализированные типы датчиков, такие как индуктивные, емкостные и лазерные интерферометры.

Выбор типа датчика обратной связи зависит от конкретных требований к точности, условиям эксплуатации, нагрузкам и месторасположению. Оптические и магнитные энкодеры подходят для большинства задач, связанных с позиционированием, в то время как индуктивные, емкостные датчики и лазерные интерферометры используются в специализированных условиях, таких как вакуум или высокоточные измерения. Правильный выбор датчиков обратной связи является ключевым фактором для обеспечения высокой точности, надежности и эффективности работы системы.

Предложенная кинематическая схема

На рис. 1 изображена предлагаемая кинематическая схема механизма с параллельной структурой с фиксированной длиной стоек.

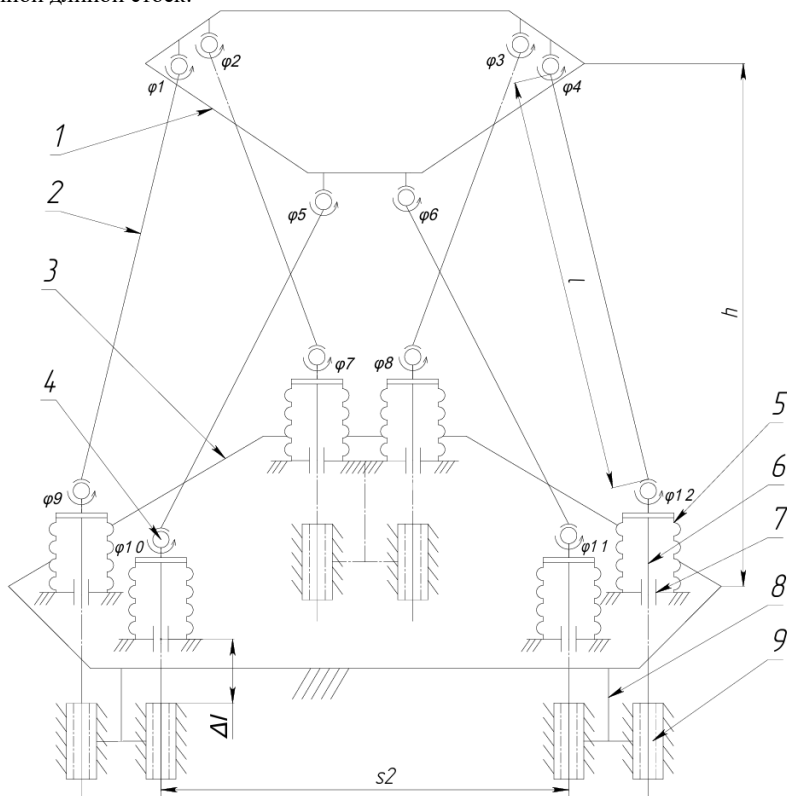


Рис. 1. Кинематическая схема механизма с параллельной структурой с фиксированной длиной стоек: 1 – верхняя подвижная платформа, 2 – стойка постоянной длины, 3 – нижняя неподвижная платформа, 4 – сферический шарнир, 5 – сильфон, 6 – промежуточная стойка, 7 – линейный подшипник скольжения, 8 – кронштейн, 9 – шаговый линейный пьезоэлектрический привод.

В состав кинематической схемы входят следующие элементы:

1 – верхняя подвижная платформа, 2 – стойка постоянной длины, 3 – нижняя неподвижная платформа, 4 – сферический шарнир, 5 – сильфон, 6 – промежуточная стойка, 7 – линейный подшипник скольжения, 8 – кронштейн, 9 – шаговый линейный пьезоэлектрический привод.

Верхняя подвижная платформа (1), выполняющая роль выходного звена, и нижняя неподвижная платформа (3) соединены между собой шестью независимыми, идентичными открытыми кинематическими цепями. Каждая из этих цепей включает три звена, обеспечивающие движение и взаимосвязь платформ.

Первое звено представляет собой шаговый линейный пьезоэлектрический привод (9), который всегда располагается перпендикулярно нижней неподвижной платформе (3) и имеет переменную длину Δl . Это звено закреплено на основании посредством кронштейна (8), а его верхний конец жёстко связан с промежуточной стойкой (6), образующей второе звено цепи, перемещающегося строго в вертикальном направлении, которое задаётся посредством линейного подшипника скольжения (7). Конец второго звена, в свою очередь, связан с третьим звеном, представляющим собой стойку постоянной длины (2), посредством сферического шарнира (4). Третье звено имеет фиксированную длину l и прикреплено к верхней подвижной платформе (1) так же с помощью сферического шарнира, что обеспечивает необходимую степень свободы для движения платформы.

Область размещения шести линейных пьезоэлектрических приводов (9) изолируется от вакуумной рабочей зоны, где находятся верхняя подвижная платформа (1) и стойки постоянной длины (2), при помощи шести сильфонов (5), связанных с соответствующими промежуточными стойками (6) и нижней неподвижной платформой (3).

Движение всей системы начинается с изменения длины первого звена, которым является шаговый линейный пьезоэлектрический привод (9), что приводит к вертикальному перемещению промежуточной стойки (6). Это движение ограничено линейным подшипником скольжения (7), который направляет стойку и исключает любые нежелательные отклонения от заданной траектории. Вертикальное смещение промежуточной стойки передаётся на стойку постоянной длины (2) через сферический шарнир (4), обеспечивающий свободу углового поворота. В результате пространственное положение стойки постоянной длины изменяется, создавая дополнительное движение, которое передаётся верхней подвижной платформе (1).

Таким образом, представленная кинематическая схема обеспечивает точное управление положением верхней подвижной платформы благодаря использованию шести независимых кинематических цепей. Конструкция каждой цепи включает три звена, что позволяет добиться высокой точности позиционирования. Кроме того, схема характеризуется свободой перемещения, реализуемой за счёт применения сферических шарниров, а также эффективной изоляцией приводов от вакуумной рабочей зоны, достигаемой за счёт использования сильфонов.

Научный руководитель – к.т.н., В.В. Полянский

Библиографический список

1. Авт. свид. № 1661528 СССР, МПК F16H 21/02, B25J 11/00 Пространственный механизм с шестью степенями свободы: № 4619320: заявл. 15.12.1988, опубл. 07.07.1991 / Борозна А.Г., Глазунов В.А., Жук В.П., Колисков А.Ш., Крайнев А.Ф., Миодушевский П.В., Модель Б.И., Чернов В.Ф. – 4с.
2. Merlet J.-P., Gosselin C.M. Nouvelle Architecture Pour un Manipulateur Parallèle à 6 Degrés de Liberté // Mechanism and Machine Theory. 1991. Vol. 26. Iss. 1. P. 77–90.
3. Михайлов В.П., Базиненков А.М. Механизмы прецизионных перемещений : учебное пособие. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 209 с.
4. Особенности работы двигателей в вакуумных многоосевых системах [Электронный ресурс] // Controlengrussia. URL: <https://controlengrussia.com/apparatnye-sredstva/phyemotion/> (дата обращения: 18.02.2025).
5. Вакуумные сильфоны [Электронный ресурс] // KinTek Solution. URL: <https://ru.kindle-tech.com/products/vacuum-bellows-304-316-stainless-steel-efficient-connection-stable-vacuum> (дата обращения: 18.02.2025).

СЕКЦИЯ 7 ФОТОНИКА И ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.097

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ

Г.Р. Демьянчук, С.С. Рудый, В.В. Рыбин

Университет ИТМО

На сегодняшний день стохастические процессы, возникающие в слое нематического жидкого кристалла (НЖК) с отрицательной диэлектрической анизотропией под воздействием внешнего электрического поля, находят широкое применение в современной фотонике. Так, в фантомной визуализации они используются для формирования случайного распределения спеклов, необходимых для восстановления изображений [1], также изучается возможность генерации истинно случайных чисел на основе нестационарных процессов в жидком кристалле [2]. Одной из актуальных задач является создание контролируемых источников шумов, необходимых для изучения стохастических резонансов — явления, при котором белый шум способствует усилению сигнала в бистабильной

системе [3]. Была показана возможность использовать нематические жидкие кристаллы для восстановления зашумленных изображений с помощью стохастического резонанса [4]. Также управляемые шумовые источники актуальны в вычислительных методах, например, в машине Изинга — аппаратном решателе, предназначенном для поиска глобального минимума гамильтониана Изинга, что находит применение в задачах комбинаторной оптимизации [5].

В работах, указанных выше, жидкокристаллические (ЖК) ячейки нашли свое применение в качестве элемента, позволяющего модулировать сигнал, в том числе и для получения контролируемого шума. При этом в указанных работах перестройка характеристик прошедшего оптического сигнала достигается за счет изменения напряжения на ЖК ячейках. При этом очевидно, что при возбуждении электрогидродинамических неустойчивостей, приводящих к формированию нестационарных случайных потоков, пространственное распределение интенсивности прошедшего и рассеянного излучения будет зависеть от фокусировки падающего излучения, что, однако, рассмотрено ранее не было. Основной задачей исследования было рассмотреть, как изменяются статистические характеристики лазерного излучения после прохождения ЖК ячейки под различным напряжением при различных фокусировках.

Экспериментальные исследования проводились с использованием нематического жидкого кристалла N-(4-метоксибензилиден)-4-бутиланилина (MBBA), нематическая фаза которого существует в диапазоне температур от 21 °С до 44 °С. MBBA обладает отрицательной диэлектрической анизотропией $\Delta\epsilon = -0,5$ и положительной анизотропией проводимости

$\Delta\sigma = 3,6 \cdot 10^{-8}$ См/м. В исследовании использовались плоскопараллельные ячейки, состоящие из двух стеклянных подложек, покрытых электродами на основе оксидов индия и олова (ITO). Зазор между ячейками определялся толщиной тефлоновой прокладки между подложками и составлял 50 мкм. Ориентирующие слои не использовались, что привело к случайной начальной ориентации. Плоскопараллельные ячейки были заполнены ЖК марки MBBA под действием капиллярных сил. Прозрачные тонкоплёночные электроды ITO были нанесены путём магнетронного распыления мишени из сплава индия и олова (в соотношении 90% In и 10% Sn) [6].

В жидкокристаллической ячейке под действием электрического поля возникают электрогидродинамические неустойчивости, приводящие к турбулентным потокам жидкости. Таким образом, с оптической точки зрения, образуемые потоки являются оптическими неоднородностями, которые находятся в движении, что приводит к явлению динамического рассеяния света. До порогового напряжения 6,7 В равномерная картина текстуры слоя жидкого кристалла не изменяется. При увеличении напряжения происходит формирование медленно движущихся потоков, имеющих четкую границу. При дальнейшем увеличении напряжения размер потоков уменьшается, а их скорость увеличивается. Подробнее о текстурах слоя жидкого кристалла и их анализе описывается в работе [7].

Для проведения эксперимента по исследованию шумов, генерируемых жидкокристаллической ячейкой, была собрана оптическая схема на рис. 1.



Рис. 1. Оптическая схема эксперимента

Лазерное излучение (532 нм, PGL-VI-532–15) фокусировалось на ЖК ячейке с использованием объектива с увеличением 8х и числовой апертурой 0,2. На ЖК ячейку подавалось постоянное напряжение от 0 до 30 В с источника постоянного тока GW Instek. Полевая диафрагма диаметром 3,5 мм ограничивала поле рассеянного излучения, которое фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 100 мм на фотодетектор ФД21КП. Сигнал с фотодетектора обрабатывался с помощью аналого-цифрового преобразователя Е20-10. Фокусировка с объектива на жидкокристаллическую ячейку была реализована двумя способами: перетяжка лазерного излучения попадала в слой жидкого кристалла и на стеклянную подложку, что вносило различные изменения в амплитуду и статистическое распределение выходного сигнала.

Данные с аналого-цифрового преобразователя обрабатывались в Origin и Python: сигналы были отфильтрованы Фурье-фильтром high pass при значении частоты отсечки 4 Гц, а затем нормированы на среднее значение амплитуды. Были построены диаграммы распределения амплитуд интенсивностей сигнала под различным напряжением. Итоговые гистограммы аппроксимировались с использованием функции Гаусса и Фойта в зависимости от распределения (рис. 2–3).

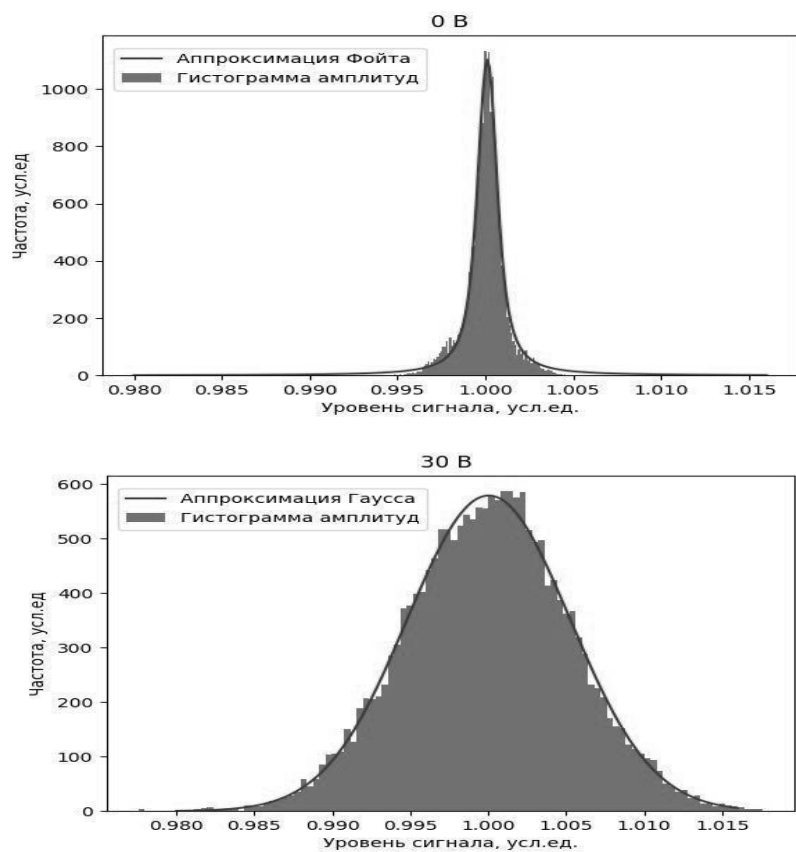


Рис. 2. Статистика распределения значений амплитуд при фокусировке на подложку при напряжении 0 В и 30 В

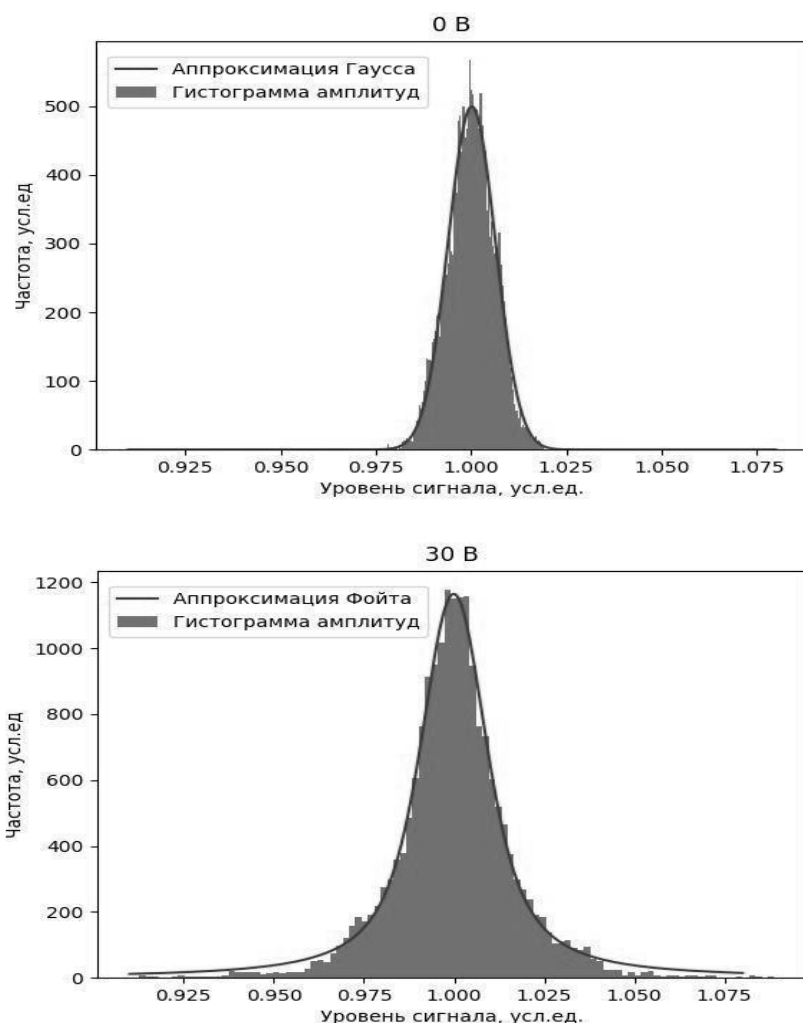


Рис.3. Статистика распределения значений амплитуд при фокусировке в слой жидкого кристалла при напряжении 0 В и 30 В

При исследовании статистики амплитуд сигнала, формируемого в ЖК ячейке, наблюдается изменение формы распределения в зависимости от фокусировки лазерного излучения и приложенного напряжения. В ходе эксперимента установлено, что характер распределения может быть аппроксимирован либо функцией Гаусса, либо функцией Фойта, что объясняется динамическими процессами в ЖК ячейке. При 0 В и фокусировке на подложку распределение определяется фактически характеристиками лазерного пучка и описывается функцией Фойта. При 30 В воздействие электрического поля изменяет взаимодействие лазерного излучения с ЖК ячейкой, что приводит к статистическому усреднению и формированию Гауссова распределения. Так как в работе использовалась случайная начальная ориентация, фактически задающее слабо-рассеивающую текстуру даже при 0 В, статистика распределения уровня сигнала прошедшего излучения при фокусировке в слой ЖК описывается в рамках Гауссова распределения. При 30 В приложенное электрическое поле вызывает электродинамические неустойчивости, приводящие к появлению турбулентных потоков. Было показано, что статистика уровня сигнала прошедшего излучения в таком случае описывается функцией Фойта. Для детального исследования изменения закона статистического распределения необходимо проведение дополнительных исследований при плавной перестройке положения перетяжки лазерного излучения.

На рис. 4 изображен график зависимости стандартного отклонения значений амплитуд прошедшего сигнала в зависимости от различного напряжения, подаваемого на ЖК ячейку, при различных режимах фокусировки. При фокусировке в слой ЖК стандартное отклонение изменяется более резко, что связано с влиянием электродинамических неустойчивостей. Действительно, рассматриваемые текстуры в слое НЖК обладают характерным размером, как было ранее показано в работе [7]. При фокусировке за слой ЖК диаметр пучка в слое ЖК увеличивается, а эффекты, связанные с топологическими неустойчивостями, усредняются, что объясняет меньшую величину стандартного отклонения при

прочих равных условиях. Таким образом, график демонстрирует, что характер изменения стандартного отклонения напрямую зависит от режима фокусировки.

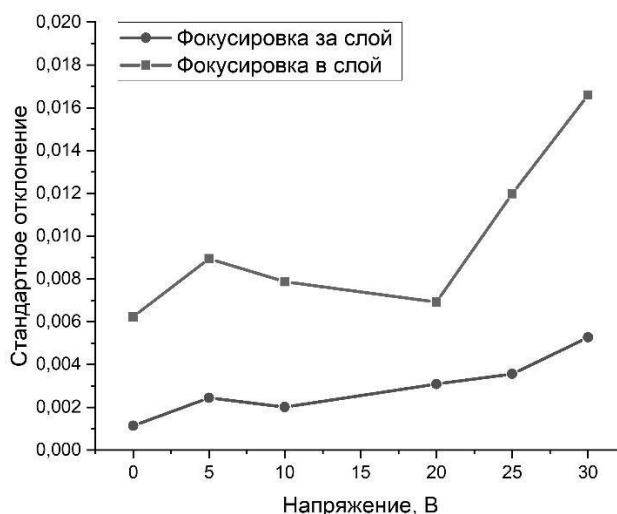


Рис. 4. График зависимости стандартного отклонения от напряжения при различной фокусировке. Исходя из результатов, представленных на рис. 2–4, можно сделать вывод, что изучение вопроса фокусировки лазерного излучения на ЖК ячейку является крайне важным, так как он напрямую влияет на статистику распределения выходного сигнала.

В дальнейшем планируется исследование влияния тонкой настройки фокусировки лазерного пучка на процессы генерации шума в ЖК ячейке. Эти исследования позволят усовершенствовать методы контроля характеристик оптических шумов и расширить область применения жидкокристаллических структур в задачах стохастической оптики и информационных технологий.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Щербинин Д.П.

Библиографический список

1. Davletshin N. N. et al. Ghost image restoring using random speckles created by a liquid crystal cell //Optics Letters. – 2021. – V. 47. – №. 1. – P. 9–12.
2. Gleeson J. T. Truly random number generator based on turbulent electroconvection //Applied physics letters. – 2002. – V. 81. – №. 11. – P. 1949-1951.
3. Gammaitoni L. et al. Stochastic resonance //Reviews of modern physics. – 1998. – V. 70. – №. 1. – P. 223.
4. Feng X. et al. Reconstruction of noisy images via stochastic resonance in nematic liquid crystals //Scientific reports. – 2019. – V. 9. – №. 1. – P. 3976.
5. Mohseni N., McMahon P. L., Byrnes T. Ising machines as hardware solvers of combinatorial optimization problems //Nature Reviews Physics. – 2022. – V. 4. – №. 6. – P. 363–379.
6. Л. П. Амосова, М. В. Исаев. Магнетронное напыление прозрачных электродов ИТО из металлической мишени на холодную подложку // Журнал технической физики, 2014, том 84, вып. 10.
7. Shcherbinin D. P. et al. The spatial and temporal characteristic of non-stationary topology formed in nematic layer under the effect of electrohydrodynamic instabilities //Journal of Molecular Liquids. – 2024. – P. 126302.

УДК 536.621.1

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ХИМИЧЕСКОГО КИСЛОРОДНО-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА

Д.Ф. Изосимов, Д.А. Рычкова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Химический кислородно-йодный лазер (ХКИЛ) относится к классу мощных газовых лазеров. Системы и комплексы, разработанные на его основе, находят свое применение в различных областях науки и техники. Его отличительной особенностью является малая длина волны излучения среди других газовых лазеров, попадающая в окно прозрачности атмосферы, что позволяет использовать его в задачах передачи лазерного излучения на большие расстояния.

При разработке мощных ХКИЛ возникает необходимость создания системы измерения выходной мощности излучения для подтверждения заявленных характеристик лазерного комплекса и проведения испытаний. Также данная система будет являться поглотителем лазерного излучения для обеспечения безопасности при эксплуатации мощных лазерных систем.

Химический кислородно-йодный лазер работает на основе химической реакции между синглетным кислородом и атомарным йодом, в результате которой йод переходит в возбужденное состояние, в последствии чего при переходе в основное состояние происходит генерация лазерного излучения на длине волны 1315 нм [1].

Функциональная схема ХКИЛ представлена на рисунке 1 [1].

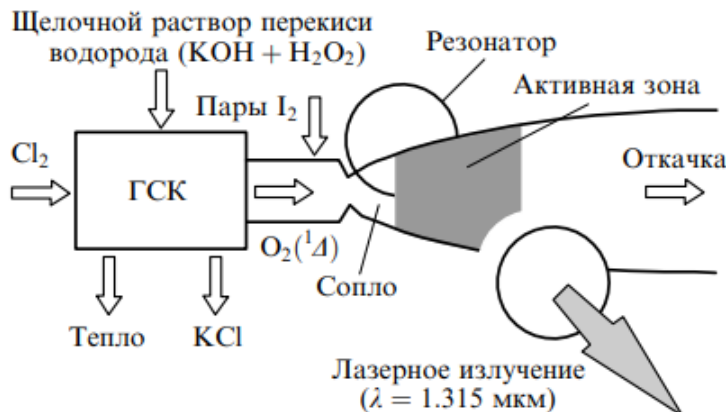


Рисунок 2 – Функциональная схема ХКИЛ [1]

На практике для измерения мощности излучения ХКИЛ обычно используются измерители мощности, основанные на болометрах, фотодиодах, термопарах и т.д. Однако, перечисленные примеры измерения мощности имеют ограничения на максимальную принимаемую мощность излучения. Особенно, когда стоит задача измерения выходной мощности ХКИЛ равной 300 кВт, что в некоторых случаях на несколько порядков превосходит предельно допустимую мощность излучения. Поэтому появляется необходимость в разработке специальной системы измерения мощности предназначенной для измерения высокой мощности.

Исходными данными для проектирования системы являются: мощность излучения ($P=300$ кВт), диаметр внешнего кольца апертуры излучения ($D=200$ мм), коэффициент увеличения резонатора ($M=1,5$) и время работы лазера ($t=40$ с).

Будем считать, что мощность равномерно распределена по апертуре, тогда плотность мощности на апертуре будет равна $1,7$ кВт/см². При таких значениях плотности мощности вышеперечисленные способы измерения не могут быть реализованы. Для обеспечения работоспособности и предотвращения плавления материала измерителя было принято решение разработать систему измерения мощности, основанную на принципе работы проточного калориметра. Принцип работы проточного калориметра заключается в измерении количества тепла, которое отводится от зоны воздействия излучения водой. Для предотвращения бликов и отражений излучения в окружающую среду поверхность контакта с лазерным излучением будет выполнена в виде конуса [2]. Данная форма измерителя позволит увеличить площадь, на которую будет падать излучение, что приведет к уменьшению плотности мощности.

Для разработки конструкции приемной части измерителя мощности необходимо определить угол раствора конуса, который будет оказывать влияние на длину конуса и плотность мощности излучения в приемной зоне. Кроме этого, от угла конуса будет зависеть количество отражений излучения, что в свою очередь определит требование к минимальному коэффициенту поглощения покрытия поверхности измерителя. Для оценки данного требования примем, что падающее излучение отражается зеркально, так как подобный случай является более требовательным к значению коэффициента поглощения покрытия материала, по сравнению с диффузионным отражением. Зависимость плотности мощности и количества отражений от угла раствора конуса представлено на рисунке 2.

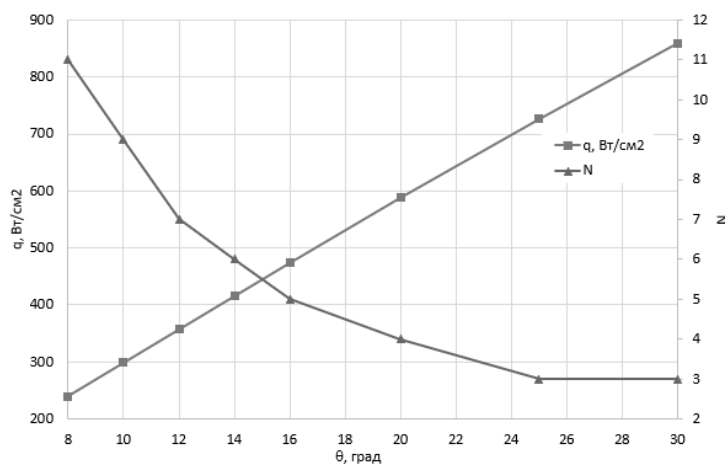


Рисунок 3 – Зависимость плотности мощности и количества отражений от угла раствора конуса

Для выбора угла раствора конуса также примем максимально допустимую отраженную в окружающую среду мощность равную 0,1 Вт. Из формулы (1) можно вычислить требуемый минимальный коэффициент поглощения покрытия поверхности измерителя.

$$\alpha = 1 - \exp\left(\frac{\ln \frac{P_{out}}{P}}{N}\right) \quad (1)$$

где P_{out} – мощность, отраженная в окружающую среду;

N – количество отражений излучения.

Зависимость коэффициента поглощения и длины конуса от угла раствора конуса представлена на рисунке 3.

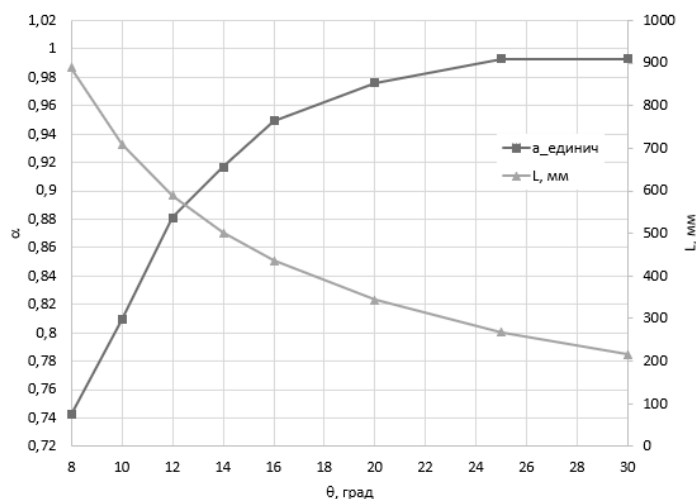


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента поглощения и длины конуса от угла раствора конуса

Проанализировав рисунки 2 и 3, можно сделать вывод, что оптимальный полуугол раствора конуса равен 10 градусам. Так как при уменьшении угла на 2 градуса длина конуса возрастает на 200 мм, что значительно увеличит масса-габаритные характеристики системы. А при увеличении значения угла – уменьшится количество отражений, что значительно увеличит требования к минимальному коэффициенту поглощения покрытия. Кроме этого, с увеличением угла возрастет плотность мощности излучения, что в свою очередь увеличит максимальную температуру стенки конуса.

Как было сказано выше, система измерения мощности основывается на принципе работы проточного калориметра. В качестве жидкости была выбрана вода с начальной температурой равной 20°C под давлением подачи 10 атм, что позволит поднять температуру кипения воды до 179°C. Для расчета объемного расхода жидкости (Q) по формуле (2) примем разность температур (ΔT) на входе и выходе равной 30°C.

$$Q = \frac{P}{\rho C \Delta T} = 2,38 \text{ л/с} \quad (2)$$

где ρ – плотность воды;

C – теплоемкость воды.

Были рассмотрены два варианта расположения каналов для подачи жидкости. Первым вариантом являлся канал круглого сечения диаметром 10 мм в виде спирали с изменением диаметра пропорционально изменению диаметра конуса. При оценке параметров канала скорость течения воды превысила 30 м/с, а суммарные расчетные потери давления составили 144 атм, что на порядок превышает давление подачи воды [2]. В качестве второго варианта геометрии каналов, для уменьшения

потерь давления и скорости, были рассмотрены продольные каналы прямоугольного сечения. Параметры которых представлены в таблице 1.

Таблица 2 – Параметры прямоугольных продольных каналов

Ширина канала, мм	Высота канала, мм	$d_{\text{гидр}}$, мм	Кол-во каналов	$u_{\text{кан}}$, м/с
3	1,5	2	36	14,7
4	2,5	3,1	34	7
5	3,5	4,1	32	4,3
6	4,5	5,1	31	2,8
7	5,5	6,2	29	2,1
8	6,5	7,2	28	1,6
9	7,5	8,2	27	1,3
10	8,5	9,2	26	1,1
11	9,5	10,2	25	0,9

Для выбора геометрии канала были проведены оценочные расчеты температур стенок канала и поверхности падения излучения по формулам (3, 4). При оценке температур будем считать, что все падающее излучение полностью поглощается поверхностью. Для обеспечения эффективного отвода тепла от зоны нагрева в качестве материала выберем дюралюминий с толщиной стенки 2 мм.

$$T_{\text{кан}} = \frac{q}{\alpha} + T_{\text{в}} \quad (3)$$

где $T_{\text{кан}}$ – температура на поверхности канала;

q – плотность падающей мощности;

α – коэффициент теплоотдачи;

$T_{\text{в}}$ – температура воды.

$$T_{\text{ст}} = \frac{q\delta}{\lambda} + T_{\text{кан}} \quad (4)$$

где $T_{\text{ст}}$ – температура на поверхности падения излучения;

λ – теплопроводность дюралюминия;

δ – толщина стенки.

В результате проведенных расчетов были получены зависимости потерь давления и температуры на поверхности канала от гидравлического диаметра, представленные на рисунке 4.

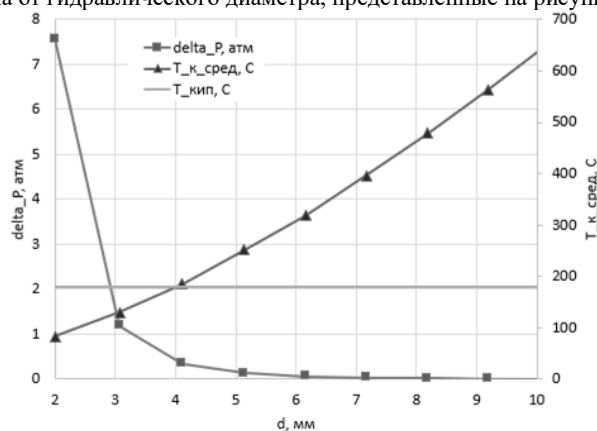


Рисунок 5 – Зависимости потерь давления и температуры на поверхности канала от гидравлического диаметра

На основании проведенных расчетов была выбрана геометрия канала с шириной 4 мм и высотой 2,5 мм ($d_{\text{гидр}}=3,1$ мм). Выбранная геометрия позволяет получить максимальную температуру на поверхности падения излучения равную 178,2°С при допустимых значениях потерь давления. Вместе с этим максимальная температура на поверхности канала равна 133,7°С, что ниже температуры кипения воды при 10 атм.

В результате расчетов была разработана трехмерная модель калориметра, представленная на рисунке 5.

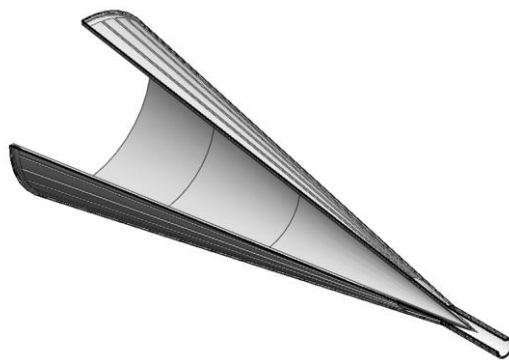


Рисунок 6 – Трехмерная модель калориметра

На основании разработанной модели было проведено численное моделирование с помощью программного обеспечения SOLIDWORKS Flow Simulation. Для расчета использовался минимальный элемент симметрии, состоящий из одного канала и зоны первичного падения излучения. По результатам моделирования были построены графики изменения температуры жидкости на стенке и давления по длине канала, представленные на рисунках 6,7. Максимальная температура на поверхности падения излучения составила $197,3^{\circ}\text{C}$, что ниже температуры плавления дюралюминия почти в два раза. А максимальная температура воды составила $155,2^{\circ}\text{C}$, что ниже температуры кипения воды при 10 атм. Изменение температуры воды на входе и выходе из канала равняется 30°C , что соответствует заданному значению.

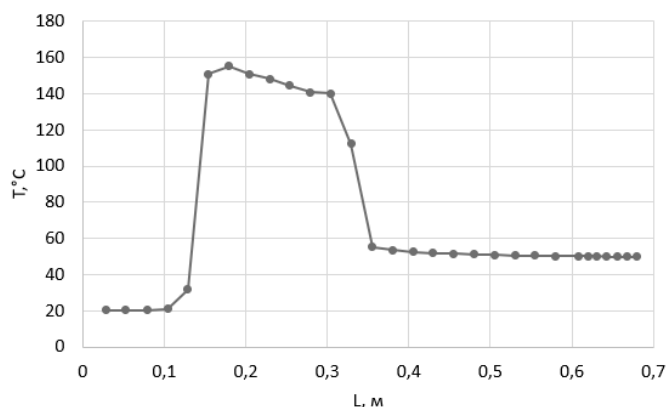


Рисунок 7 – Изменение температуры воды на стенке по длине канала

Потери давления составили приблизительно 2 атм, что связано с изменением площади поперечного сечения канала и соответственно с увеличением скорости потока.

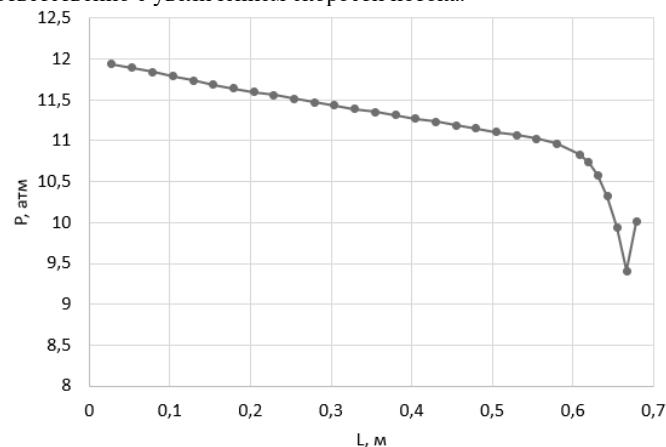


Рисунок 8 – Изменение давления по длине канала

В данной статье описаны начальные этапы разработки измерителя мощности излучения мощного химического кислородно-йодного лазера, основанного на принципе работы проточного калориметра, который может быть использован в качестве поглотителя мощного лазерного излучения (дампера). В результате проведенных расчетов выбрана геометрия приемного блока и каналов охлаждения, и разработана модель конструкции. На основе которой было выполнено численное моделирование, подтверждающее оценочные расчеты. В дальнейшем будет выполнено усовершенствование конструкции участка объединения каналов в общую трубу.

Библиографический список

- 1 Савин А.В. Моделирование рабочих процессов химического кислородно-йодного лазера / А.В. Савин, И.А. Киселев // Балт. гос. техн. ун-т. – СПб. – 2013. – 72 с.
- 2 Патент № 2310819 С1 Российская Федерация, МПК G01K 17/00. калориметр : № 2006102651/28 : заявл. 19.01.2006 : опубл. 20.11.2007 / А. С. Борейшо, Д. Н. Васильев, И. М. Евдокимов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное предприятие "Лазерные системы". – EDN OHKLSU.
- 3 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992.- 672 с.

УДК 681.586.5

ПОРТАТИВНЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ АВТОДИННОГО ЭФФЕКТА В ЛАЗЕРНЫХ ДИОДАХ

А.В. Рыбалтовский, И.С. Мамаев, Г.О. Даниленко, А.В. Ковалев

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»*

Актуальность

Целью настоящей работы является разработка портативного оптоэлектронного датчика вибрации на основе автодинного эффекта в полупроводниковом лазере, предназначенного для повышения эффективности и безопасности вибродиагностики в различных отраслях промышленности. Разработка таких датчиков представляет собой перспективное направление исследований, особенно в контексте растущего спроса на современные методы вибродиагностики и мониторинга оборудования в таких секторах, как энергетика, транспорт и строительство.

Портативность этих устройств позволяет проводить быструю и гибкую диагностику в различных условиях, что особенно важно для объектов, находящихся в труднодоступных местах или требующих оперативного обслуживания. Например, вибродиагностика может быть осуществлена с помощью мобильных измерительных комплексов, что упрощает процесс сбора данных и повышает оперативность вмешательства.

Бесконтактный характер таких датчиков исключает риск повреждения оборудования во время измерений и позволяет проводить мониторинг без остановки производства. Это снижает риск аварий и продлевает срок службы оборудования, что особенно важно для крупного и дорогостоящего промышленного оборудования, такого как компрессорные и холодильные установки.

Кроме того, возможность проводить диагностику на безопасном расстоянии обеспечивает дополнительную защиту персонала от потенциальных опасностей, что является критически важным фактором в отраслях с высоким уровнем риска. Это особенно актуально для объектов, расположенных в зонах повышенной опасности или требующих специальных мер безопасности.

Применение вибродиагностики в различных отраслях промышленности позволяет оптимизировать эксплуатацию оборудования и предотвратить аварии. В энергетике, например, вибродиагностика используется для мониторинга состояния турбин и насосов, что позволяет предотвратить аварии и оптимизировать техническое обслуживание. В транспорте она применяется для диагностики состояния двигателей и трансмиссий транспортных средств, что помогает предотвратить поломки и снижает затраты на ремонт. В строительстве вибродиагностика используется для мониторинга состояния строительной техники и оборудования, что позволяет оптимизировать их эксплуатацию и продлить срок службы.

Экономическая эффективность вибродиагностики также является важным фактором. Она позволяет предотвратить аварии, снизить затраты на ремонт и оптимизировать графики технического обслуживания. Например, один рубль, вложенный в вибродиагностику, может сэкономить предприятию до 1000 рублей на ремонтно-восстановительные работы. Таким образом, разработка и внедрение портативных оптоэлектронных датчиков вибрации на основе автодинного эффекта в лазерных диодах является стратегически важным направлением для повышения эффективности и безопасности промышленного оборудования в России.

Автодинный эффект

Принцип работы датчика основан на извлечении частоты, амплитуды, скорости и ускорения вибрирующего объекта из данных, полученных при детектировании лазерного излучения, отраженного от объекта вибрации. Особенностью предлагаемого метода является автодинный эффект в полупроводниковых лазерах, который позволяет генерировать и детектировать излучение с помощью одного оптоэлектронного устройства – лазерного диода.

Типичная конструкция датчика включает в себя лазерный диод, коллимирующую оптику для формирования параллельного пучка, и фотодиод для регистрации изменений интенсивности излучения, вызванных автодинным эффектом (рис. 1). Лазерный диод служит источником когерентного излучения, а коллимирующая оптика обеспечивает формирование узконаправленного пучка для повышения эффективности регистрации отраженного сигнала. Фотодиод, расположенный вблизи лазерного диода, преобразует оптический сигнал в электрический, который затем обрабатывается электронной схемой для извлечения информации о параметрах вибрации.

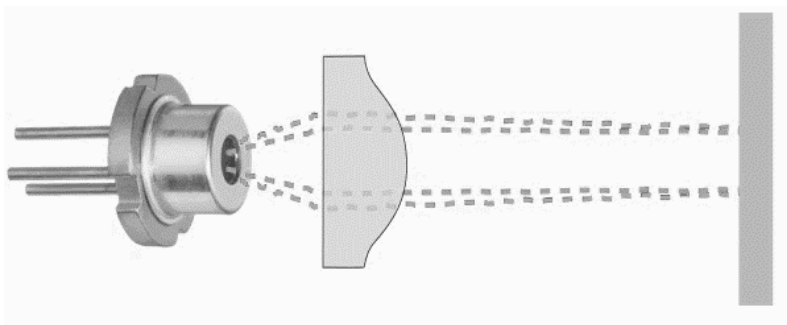


Рис. 1. Типичная конструкция датчика на автодинном эффекте

Автодинный эффект, лежащий в основе работы этих датчиков, возникает при возвращении части излучения обратно в резонатор лазерного диода. Анализ конфигурации интерферометра с эффектом самосмешивания показывает, что возмущенное поле в резонаторе несет как амплитудную (АМ), так и частотную (ФМ) модуляцию в виде двух ортогональных сигналов, $\cos 2ks$ и $\sin 2ks$ (при слабой обратной связи), где k – волновое число, а s – расстояние до объекта [1]. Амплитудная компонента (АМ) детектируется с помощью мониторингового фотодиода (PD), обычно устанавливаемого в лазерной сборке для контроля выходной мощности. В отличие от традиционных лазерных интерферометров, данная конфигурация не требует внешнего оптического интерферометра, что значительно упрощает конструкцию, снижает стоимость и обеспечивает простоту измерения [2,3].

Автодинный сигнал, формируемый в результате интерференции излучения внутри резонатора лазерного диода, имеет характерную форму, напоминающую пилообразную функцию (рис. 2). Он состоит из участков плавного нарастания или спада интенсивности, прерываемых резкими перегибами, происходящими примерно через каждый полупериод изменения расстояния до объекта. Форма и параметры этого сигнала несут информацию о характеристиках вибрации объекта, таких как амплитуда, скорость, ускорение, частота и фаза.

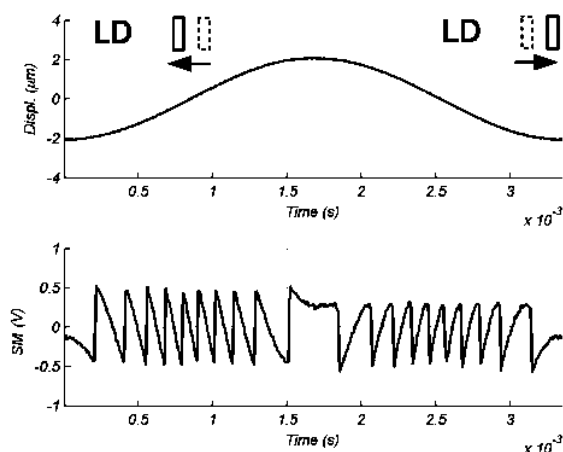


Рис. 2. Автодинный сигнал [4]

Разработанный датчик вибрации

Внешний вид разработанного датчика продемонстрирован на рисунке 3. В состав датчика входят:

1. ИК-лазерный диод,
2. навигационный лазер,
3. дисплей,
4. панель управления,
5. интерфейс USB type B для зарядки,
6. USB для подключения внешних накопителей данных,
7. ключ-выключатель,
8. короб корпуса,
9. крышка корпуса.

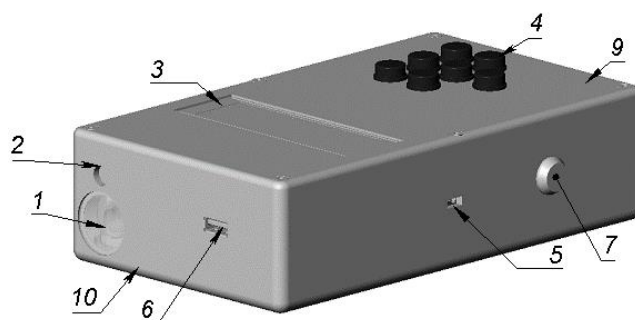


Рис. 3. Внешний вид датчика вибрации

В рамках настоящей работы разработан датчик с заявленными характеристиками, представленными в Таблице 1.

Таблица 1 – Заявленные характеристики датчика вибрации

Наименование параметра		Значение	Единица измерения
Частотный диапазон измерений синусоидальных вибраций		от 10 до 12 000	Гц
Параметры вибрации, измеряемые до 20 Гц	Минимальная амплитуда виброперемещения	15	мкм
	Максимальная амплитуда виброперемещения	5000	
	Минимальная амплитуда виброскорости	1	мм/с
	Максимальная амплитуда виброскорости	199	
	Минимальная амплитуда виброускорения	1	м/с ²
	Максимальная амплитуда виброускорения	150	
Параметры вибрации, измеряемые до 100 Гц	Минимальная амплитуда виброперемещения	15	мкм
	Максимальная амплитуда виброперемещения	500	
	Минимальная амплитуда виброскорости	3	мм/с
	Максимальная амплитуда виброскорости	20	
	Минимальная амплитуда виброускорения	12	м/с ²
	Максимальная амплитуда виброускорения	150	
Относительная погрешность измерения		10	%
Расстояние измерения		0,5	м

Заключение

Результатом работы является разработанный датчик для вибродиагностики оборудования. На данный момент поставлена задача исследования и подтверждения характеристик разработанного датчика на эталонном объекте вибрации.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., А.В. Ковалев

Библиографический список

- Donati S. Vibration Measurements by Self-Mixing Interferometry: An Overview of Configurations and Benchmark Performances // Vib. 2023, Vol. 6, Pages 625-644. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Т. 6, № 3. С. 625–644.
- Zabit U. и др. Spectral Processing of Self-Mixing Interferometric Signal Phase for Improved Vibration Sensing under Weak- And Moderate-Feedback Regime // IEEE Sens. J. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. Т. 19, № 23. С. 11151–11158.
- Marta R.L., Lamela H. Self-mixing technique for vibration measurements in a laser diode with multiple modes created by optical feedback // Appl. Opt. Vol. 48, Issue 15, pp. 2915-2923. Optica Publishing Group, 2009. Т. 48, № 15. С. 2915–2923.
- Arriaga A.L. Analysis and implementation of algorithms for embedded self-mixing displacement sensors design. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2014.

УДК 535.323

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ ЧАСТИЦ В ЛАЗЕРНОМ ПИНЦЕТЕ

Д.А. Глухарёв

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»*

Введение

Инструмент для локализации, удерживания и манипулирования микро- и наночастицами с использованием оптического излучения в научной литературе известен под названием «оптический (лазерный) пинцет». В основе принципа действия подобного устройства лежит явление светового давления. На частицу, находящуюся в фокальной области сфокусированного лазерного излучения с гауссовым распределением интенсивности, воздействуют силы светового давления, которые принято разделять на две компоненты: так называемые «сила рассеяния» и «градиентная сила» [1]. В соответствии со вторым законом Ньютона, элементарные силы светового давления будут воздействовать на частицу при каждом отражении и преломлении на её границе светового излучения, как показано на рисунке 1.

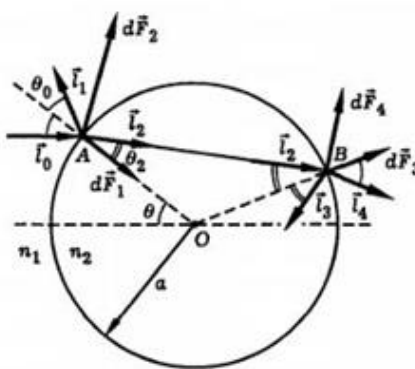


Рисунок 1 – Элементарные силы светового давления, возникающие при отражении и преломлении света на границе сферической частицы со средой [2]

При этом сила рассеяния света будет сонаправлена с направлением распространения лазерного излучения, и, таким образом, её воздействие будет выталкивать частицу из области локализации в фокусе лазерного излучения. Локализация же частицы осуществляется за счёт воздействия на неё градиентной силы, втягивающей частицу в область наибольшей интенсивности. При этом величина градиентной силы прямо пропорциональна числовой апертуре объектива, фокусирующего лазерное излучение; таким образом, для осуществления эффективной локализации необходимо использовать высокоапертурные микрообъективы.

В настоящее время оптический пинцет – это один из немногих инструментов, пригодных для манипулирования микрообъектами. Кроме того, благодаря точности и способности воздействовать на локализуемые объекты, не оказывая на них разрушающего воздействия, оптический пинцет активно используется в биологии и медицине.

Тем не менее, описанная выше динамика свойственна прежде всего оптически однородным частицам, чей показатель преломления не превышает показатель преломления среды. В случае же, если показатель преломления частицы меньше, чем у окружающей её среды, -- например, если речь идёт о воздушном пузырьке, находящемся в водной среде – эффект действия градиентной силы будет прямо противоположным, направленным на то, чтобы сместить частицу из области максимальной интенсивности излучения. Для локализации подобных объектов необходимо применять уже иные способы и конфигурации лазерного пинцета – например, использовать вихревые оптические пучки [3] либо аксикональные линзы [4].

Оба вышеописанных случая оптически однородных частиц достаточно хорошо исследованы. Однако случаи микрочастиц, чей показатель преломления отличается для различных регионов в объёме частицы, долгое время оставались неизученными. На данный момент существуют описания динамики частиц с различным распределением показателя преломления, таких как «двуликые» частицы [5], находящихся в поле лазерного пинцета. В то же время динамика частиц структуры «ядро-оболочка» с различным соотношением показателей преломления остаётся исследований лишь теоретически [6]. Согласно данной работе, наиболее интересными представляются два случая: $n_2 > n_1 > n_3$ и $n_3 > n_2 > n_1$ (где n_1 – показатель преломления среды, в которой находится частица, а n_2 и n_3 – показатели преломления оболочки и ядра частицы соответственно), так как их поведение в поле оптической ловушки качественно отличается от поведения однородных частиц с высокими показателями преломления.

Экспериментальное исследование

Основной целью данной работы было проведение экспериментального исследования динамики частиц структуры «ядро-оболочка» в поле лазерного пинцета. Для этого было необходимо, прежде всего, собрать установку для оптической локализации частиц, а также проверить и подтвердить её работоспособность. На рисунке 2 продемонстрирована оптическая схема собранной установки.

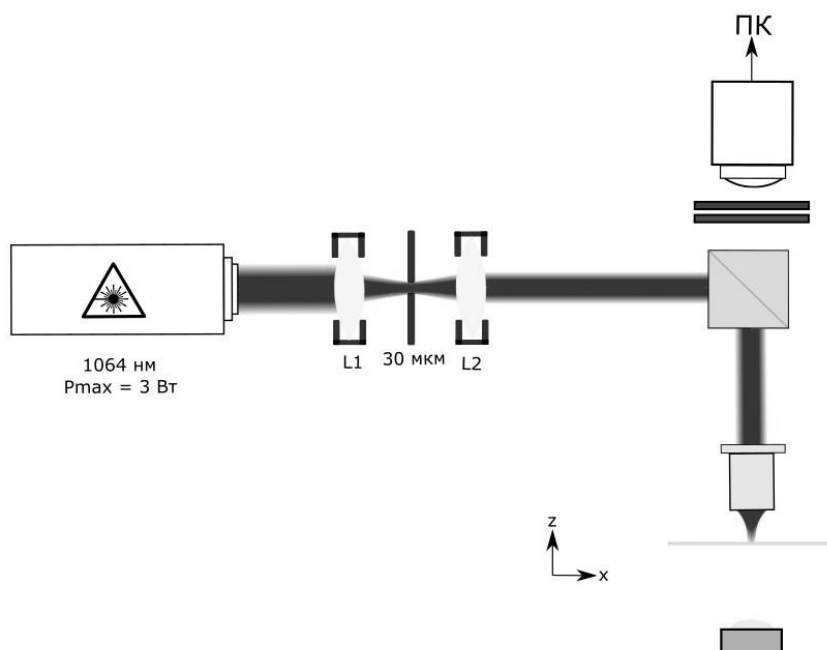


Рисунок 2 – Принципиальная схема установки для оптической локализации микрочастиц

В качестве источника лазерного излучения был использован лазер с длиной волны 1064 нм и максимальной мощностью порядка 3 Вт на выходе. Далее лазерное излучение проходило систему пространственной фильтрации, состоящую из двух выпуклых линз с совмещенными фокусами и диафрагмы с диаметром отверстия 30 мкм. На выходе получался лазерный пучок с гауссовым профилем интенсивности, по диаметру совпадавший с входным отверстием объектива. С помощью светоделителя часть лазерного излучения подавалась на объектив, который фокусировал излучение в плоскости образца. Для наблюдения и регистрации результатов эксперимента использовалась система наблюдения из камеры и системы фильтров, не допускавших засветки изображения отражённым лазерным излучением. В такой схеме потери мощности оптического излучения до объектива составили порядка 80%, что вполне типично для установок лазерного пинцета. Мощность же в плоскость образца (на выходе из объектива) составила 120 мВт.

Для проверки и подтверждения работоспособности установки были проведены эксперименты по оптической локализации и манипуляции микрочастицами. В первой серии экспериментов в водную среду образца помещались монодисперсные полимерные сферы (диаметр 5 мкм), оптически однородные, чей показатель преломления превышал показатель преломления водной среды. При этом в экспериментальной установке успешно реализовывалась локализация и манипулирование такими частицами, что подтверждало работоспособность и эффективность установки лазерного пинцета.

В качестве экспериментального образца для исследования динамики оптически неоднородных частиц структуры «ядро-оболочка» были использованы сферические частицы промышленного боросиликатного стекла. Их выбор был обусловлен тем, что каждая из таких сфер имела внутри заполненную воздухом сферическую полость. Таким образом, при помещении микрочастиц боросиликатного стекла в водную среду эксперимент соответствовал случаю $n_2 > n_1 > n_3$ (показатель преломления боросиликатного стекла равен 1.5, воды 1.33, а воздуха 1). Микрочастицы боросиликатного стекла в данном эксперименте имели широкое распределение по размерам (средний их диаметр был равен 30 мкм), что позволяло обеспечить контрольные наблюдения над наиболее крупными частицами в поле зрения микроскопа, на которые оптическое излучение воздействовало с наименьшей эффективностью и они, таким образом, оставались неподвижными. Это позволило подтвердить, что перемещение частиц происходит именно ввиду воздействия на них оптическим излучением.

В ходе экспериментов были получены видеозаписи воздействия сфокусированного лазерного излучения на частицу. При этом подтвердилось изначальное предположение о том, что градиентная сила, как и сила рассеяния, в данном случае не будет способствовать локализации частиц. При наблюдении в плоскости образца частица смещалась по направлению от фокальной области лазера. Подобное поведение наблюдалось для частиц в широком диапазоне размеров (с радиусами от 5 до 15 мкм).

На рисунке 3 представлена одна из экспериментальных последовательностей кадров, демонстрирующая типичное поведение полый сферической боросиликатной частицы в поле сфокусированного гауссова излучения.

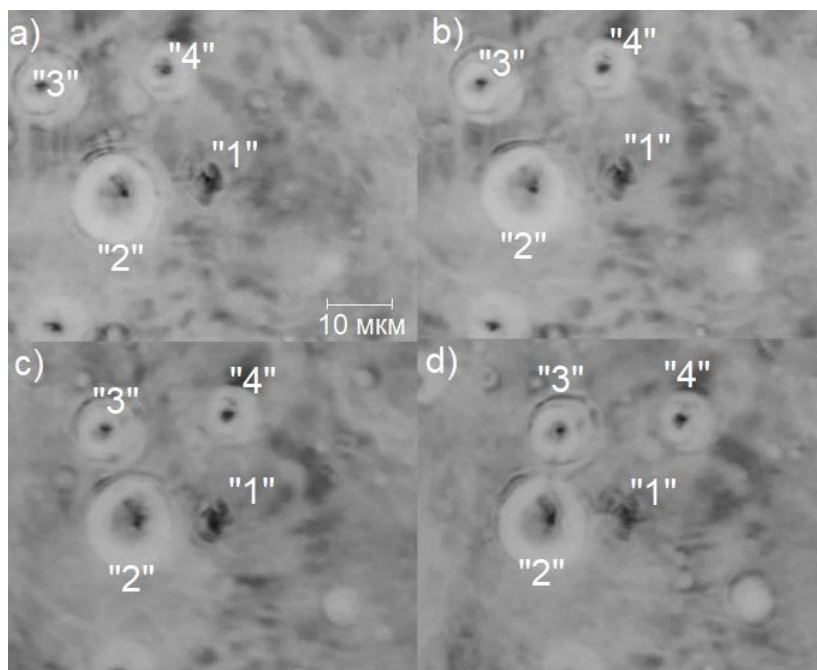


Рисунок 3 – Оптически неоднородные боросиликатные сферы в оптическом пинцете: (а) – начальное положение оптической ловушки («1») относительно боросиликатных частиц («2», «3» и «4»); (b) – оптическая ловушка начинает смещаться относительно частиц «2», «3» и «4»; (c) – полая частица «2» попадает в поле оптической ловушки и начинает смещаться от его центра относительно частиц «3» и «4»; (d) – частица «2» завершает свое перемещение относительно частиц «3» и «4»

Как видно из приведённых изображений, при перемещении фокуса лазерного излучения (показан цифрой «1» на рисунках) частица («2») «отталкивается» от него, смещаясь относительно пары неподвижных частиц («3» и «4»).

Заключение

В результате проведения эксперимента были получены данные о динамике оптически неоднородных частиц структуры «ядро-оболочка» в поле оптической ловушки. Было продемонстрировано, что динамика таких частиц отличается от динамики оптически однородных частиц, и «полые» частицы не могут быть стабильно локализованы в лазерном пинцете при использовании оптического излучения с гауссовым распределением интенсивности. В данной структуре частицы градиентная сила вместо того, чтобы стабильно локализовывать частицу в области максимальной интенсивности излучения, т.е. в фокальной области гауссова пучка, будет стремиться вытолкнуть оттуда частицу в радиальном направлении.

Проведенное экспериментальное исследование динамики оптически неоднородных частиц в лазерном пинцете позволит перейти к практической работе по локализации оптически неоднородных частиц с использованием методов, разработанных для оптической локализации частиц с низким показателем преломления. В перспективе эти результаты могут существенно расширить область применения оптической ловушки в биомедицинских приложениях – например, за счёт сочетания оптических методов локализации микрообъектов с методиками капиллярного хранения биологических объектов за счёт возможности захватывать полые микрообъекты.

Научный руководитель – д.ф-м.н., профессор Ю.В. Рождественский

Библиографический список

1. Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime //Biophysical journal. – 1992. – Т. 61. – №. 2. – С. 569-582.
2. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. Учебник. – 2004.
3. Ng J., Lin Z., Chan C. T. Theory of optical trapping by an optical vortex beam //Physical review letters. – 2010. – Т. 104. – №. 10. – С. 103601.
4. Manek I., Ovchinnikov Y. B., Grimm R. Generation of a hollow laser beam for atom trapping using an axicon //Optics communications. – 1998. – Т. 147. – №. 1-3. – С. 67-70.
5. Gao X. et al. Simulation and experiment of the trapping trajectory for Janus particles in linearly polarized optical traps //Micromachines. – 2022. – Т. 13. – №. 4. – С. 608.
6. Artser I. R., Rozhdestvenskii Y. V. Light Pressure on an Inhomogeneous Spherical Particle in the Field of Laser Tweezers //Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2019. – V. 129. – P. 792-805.

ДИНАМИКА МИКРОАНТЕЛИ В ОПТИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ С ГАУССОВЫМ ПРОФИЛЕМ ПУЧКА

А.С. Лецев

Университет ИТМО

Управление частицами с помощью электромагнитного излучения было реализовано в работах Артура Ашкина, который представил в 1970 году первый оптический пинцет [1]. К настоящему времени, оптический пинцет нашёл применение в различных областях физики как для локализации металлических, диэлектрических и коллоидных частиц, так и управления динамикой различного рода мезоскопических частиц в приложениях левитирующей оптомеханики [2]. Кроме того, оптический пинцет используется и в биологии как для сортировки, изучения и управления динамикой клеток, например, эритроцитов, так и для диагностики различных заболеваний по исследованию жёсткости клеточной мембраны [3]. До недавнего времени исследования в области левитирующей механики ограничивались только сферическими частицами, но развитие технологий в получении различных микро и нано объектов привели к исследованиям динамики несферических частиц в поле оптического излучения [4-6]. Так, в работе [4] была исследована динамика несферических частиц в различных типах световых полей оптического пинцета, в [5] была рассмотрена динамика наногантели, состоящей из двух слипшихся наночастиц, а в [6] был представлен метод изготовления микрогантелей и их динамика в оптическом пинцете. В данной работе мы исследуем динамику микрогантели в оптическом излучении с гауссовым профилем пучка. Мы показываем, что такая система, в принципе, может быть использована как платформа для создания нового поколения гироскопов и гравиметров на основе левитирующих микрочастиц в оптическом излучении.

Для описания динамики микрочастиц в поле оптического излучения существует два метода. Первый заключается в применении теории Ми, то есть непосредственное решение уравнений Максвелла для рассеяния оптического излучения на частице с характерным размером порядка (или больше) длины волны оптического излучения [7,8]. Второй метод заключается в применении приближения волновой оптики для частиц, радиус которых значительно больше длины волны излучения. В таком случае, представляется возможным использование формул Френеля, что ведет к относительно простым и понятным выражениям для сил светового давления. Самый простой случай действия одного лазерного луча на сферическую частицу был рассмотрен Ашкиным в [9], что явилось фундаментом для экспериментальной локализации как диэлектрических частиц, так и биологических объектов [10]. В данной работе мы исследуем динамику микрогантели, состоящей из двух диэлектрических однородных сфер (Рис.1).

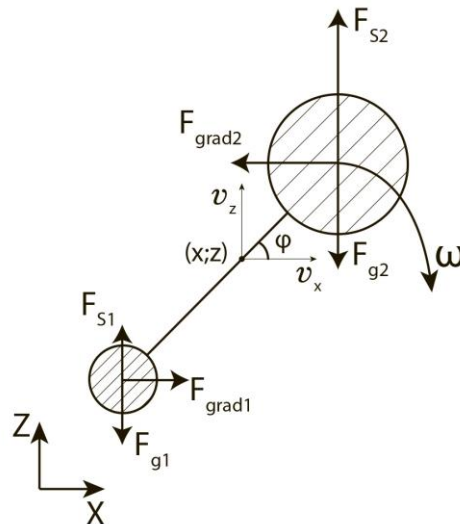


Рис. 1. Модель микрогантели. Микрогантель состоит из двух диэлектрических сфер массами m_1, m_2 радиусами r_1, r_2 с показателями преломления n_1, n_2 . Сферы соединены невесомым и нерастяжимым стержнем произвольной длины l . Точное положение микрогантели задаётся через координаты центра масс (x, z) и угол наклона (φ) одной из сферических частиц относительно оси X . v_x и v_z — скорости центра массы по соответствующим осям, ω — скорость вращения микрогантели. На каждую частицу действуют силы тяжести (F_g) и оптические силы (F_s, F_{grad}) .

Мы изучаем динамику частицы в одном оптическом пучке, который направлен по оси Z . С одной стороны, данное излучение компенсирует силу тяжести и локализует микрогантель. С другой стороны, из-за гауссова профиля пучка, данное излучение приведёт к появлению нелинейной динамики.

Оптическое излучение с гауссовым профилем пучка описывается следующими уравнениями

$$P(r, z) = \frac{2P_0}{\pi w^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right), \quad 11 \text{Equation Section (Next)230}$$

где P_0 — полная мощность излучения, r — радиальное расстояние от оси пучка.

$$w = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}, \quad 450$$

где w_0 — минимальный радиус перетяжки, z_R — длина перетяжки (расстояние, на котором радиус перетяжки w увеличивается в $\sqrt{2}$ раз).

В рассматриваемой системе, из-за осевой симметрии гауссового пучка и микрогантели вращение происходит только в одной плоскости XZ . Тогда динамика микрогантели описывается уравнениями

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= \sum F_{grad}, m\ddot{z} = \sum F_S - \sum F_g, \\ I\dot{\omega} &= \sum M_{grad} + \sum M_S, \end{aligned} \quad 670$$

где $m = m_1 + m_2$ — масса микрогантели, I — момент инерции, F_g — сила тяжести, F_{grad} — градиентная сила, F_S — продольная сила, M_{grad}, M_S — моменты градиентной и продольной сил. Знак суммирования означает сложение соответствующих сил и моментов силы для первой и второй частиц с учётом их направления. Так, все силы тяжести направлены против оси Z , а сумма их моментов равна нулю. Обе продольные оптические силы направлены по оси Z , а соответствующие моменты не равны по значению и вращают микрогантель в разные стороны. Градиентные силы направлены к центру гауссовского пучка, поэтому, если обе частицы находятся с одной стороны от центра пучка ($x = 0$), то силы сонаправлены, а моменты силы противоположны. В противном случае, если частицы находятся по разные стороны от центра пучка, то силы противоположны, а моменты силы сонаправлены.

Момент инерции может быть вычислен по теореме Гюйгенса — Штейнера как сумма моментов двух сферических частиц

$$I = \frac{2}{5} m_1 r_1^2 + \frac{2}{5} m_2 r_2^2 + \mu R_0^2, \quad 890$$

где $\mu = m_1 m_2 / m$ — приведённая масса, $R_0 = r_1 + r_2 + r_c$ — расстояние между центрами частиц.

Градиентная и продольная силы вычисляются по формулам, которые были получены Ашкиным[1]. Стоит отметить, что в своей работе, Ашкин рассматривал оптическую силу от лазерного луча, действующего на одну точку частицы, тогда как в нашей работе частица всегда полностью засвечена

$$\begin{aligned} F_{grad} &= 2\pi \int_0^{\pi/2} \frac{n_0 P(r, z)}{c} \left(R \sin 2\alpha - T^2 \frac{\sin(2\alpha - 2\beta) + R \sin 2\alpha}{1 + R^2 + 2R \cos 2\beta} \right) d\alpha, \\ F_S &= 2\pi \int_0^{\pi/2} \frac{n_0 P(r, z)}{c} \left(1 + R \cos 2\alpha - T^2 \frac{\cos(2\alpha - 2\beta) + R \cos 2\alpha}{1 + R^2 + 2R \cos 2\beta} \right) d\alpha, \end{aligned} \quad 10110$$

где n_0 — показатель преломления среды, R, T — коэффициент отражения и пропускания Френеля, α — угол падения, β — угол преломления связанные законом Снеллиуса.

В данной работе исследуется поступательная динамика по двум осям и вращение вокруг центра тяжести. Для решения задачи необходимо задать начальные условия, а именно параметры микрогантели. Будем считать, что центр массы микрогантели находится в центре пучка, а скорости центра массы равны нулю. Начальный угол и скорость вращения могут быть любыми. Радиусы частиц равны $r_1 = 30 \text{ мкм}$ и $r_2 = 10 \text{ мкм}$, длина связи $r_c = 10 \text{ мкм}$. Пусть сферы состоят из боросиликатного стекла. Тогда, $n = 1.5$, $m_1 = 250 \text{ нг}$, $m_2 = 9.3 \text{ нг}$.

Движения по всем степеням свободы отличаются друг от друга. Так, по оси Z , микрогантель медленно осциллирует (рис.2). Данное движение значительно зависит от интенсивности лазера, а именно при увеличении мощности лазера возрастает амплитуда и частота осцилляций по оси Z . Например, при увеличении мощности лазера на 3%, амплитуда возрастёт с 0.13 (рис.2а) метров до 0.75 (рис.2б) метров, а частота увеличится в 2.25 раза.

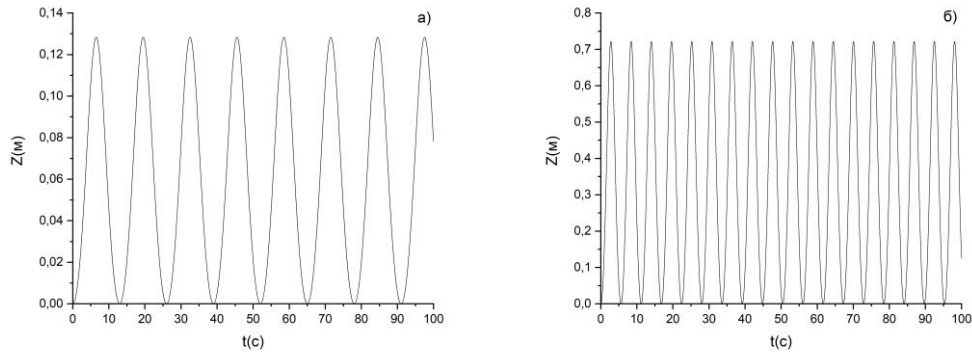


Рис.2. Осцилляции микроантенны по оси Z при разных интенсивностях оптического излучения. Мощность излучения на б) больше на 3%, чем на а).

Движение по оси X сильно отличается от движения по оси Z . Амплитуда осцилляций по оси X составляет единицы или десятки нанометров, что много меньше размеров микроантенны. При этом, данная динамика характеризуется высокой частотой по сравнению с динамикой по оси Z . Кроме того, в данном случае, основным параметром, влияющим на динамику, является начальный угол и скорость вращения. Так, при $\omega_0 = 10 \text{ Гц}$, в случае $\varphi_0 = 0$ амплитуда осцилляций будет равна 4.25 мкм (рис.3а), а для $\varphi_0 = \pi/2$ будет равна 1.75 мкм (рис.3б). Увеличение начальной скорости вращения (например, с помощью дополнительного импульсного лазера) приведёт к уменьшению амплитуды и увеличению частоты осцилляций по оси X . Например, при $\omega_0 = 1000 \text{ Гц}$, амплитуда осцилляций будет равна 6 нм для $\varphi_0 = 0$ (рис.3в), и 70 нм для $\varphi_0 = \pi/2$ (рис.3г). Кроме того, при высокой частоте вращения, в динамике по оси X появляется как быстро осциллирующая компонента, так и относительно медленная огибающая.

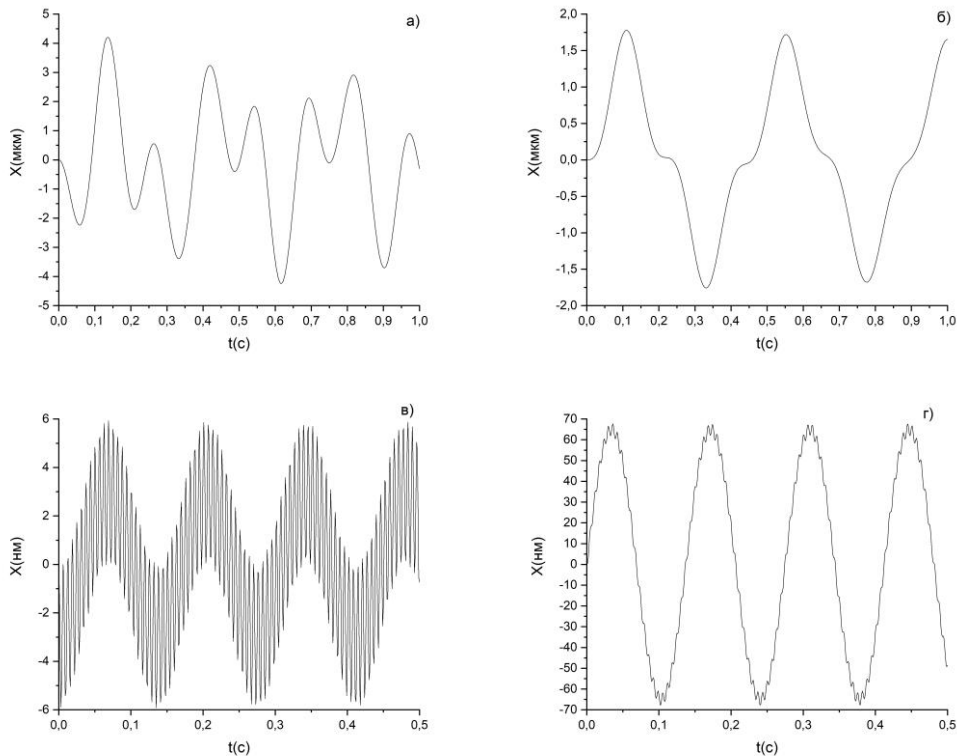


Рис.3. Осцилляции по оси X . а) и б) осцилляции при $\omega_0 = 10 \text{ Гц}$. в) и г) осцилляции при $\omega_0 = 1000 \text{ Гц}$. а) и в) осцилляции при $\varphi_0 = 0$, б) и г) осцилляции при $\varphi_0 = \pi/2$.

Вращение микроантенны сильно зависит от начальных параметров. Так, если начальная частота равна нулю или достаточно мала, то мы получаем маятник. В таком случае, микроантенна будет

колебаться с амплитудой, равной начальному углу, причём верхней частицей всегда будет большая частица (рис.4а). Если начальная частота достаточно большая, то частица будет вращаться в одном направлении, то есть вращаться как волчок (рис.4б). Важно отметить, что у микрогантели есть положения равновесия. Если центр массы находится в $x = 0$, а угол $\varphi = \pm \pi / 2$, то при $\omega = \omega_x = 0$ микрогантель будет осциллировать только по оси Z .

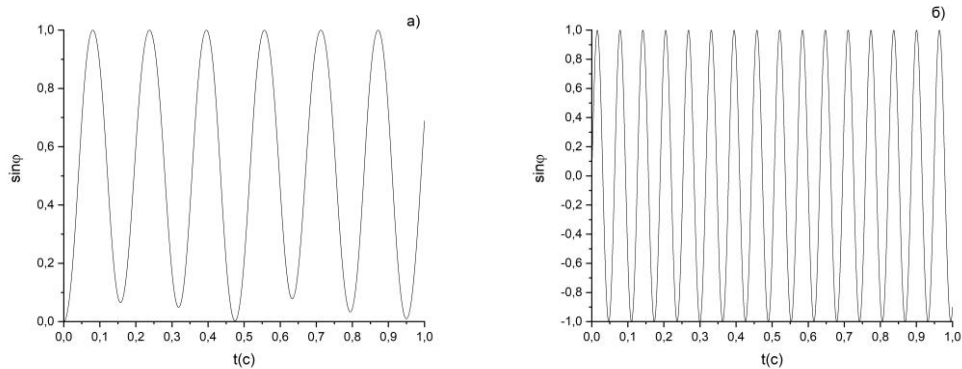


Рис.4. Зависимость $\sin \varphi(t)$. а) соответствует динамике при $\omega_0 = 0$. Видно, что микрогантель колеблется в разные стороны как маятник, причём большая частица оказывается над маленькой. б) соответствует динамике при $\omega_0 = 100$. В данном случае, микрогантель вращается в одну сторону как волчок.

Таким образом, динамика микрогантели в поле оптического излучения с гауссовским профилем пучка является нелинейной. В гауссовском пучке интенсивность излучения отличается в разных точках пучка. Движение микрогантели приводит к тому, что сферы оказываются в разных местах гауссовского пучка, что влияет на оптические силы, что в свою очередь оказывает влияние на динамику. Важно отметить, что нелинейность появляется только если сферические частицы отличаются друг от друга массой, радиусом или показателем преломления, что приводит к разным значениям оптических сил, действующих на сферы.

Исследованные особенности динамики позволяют использовать микрогантель в поле оптического излучения как платформу для создания гравиметра. Изменение значения ускорения свободного падения (g) влияет на динамику по оси Z , из-за чего изменится динамика и по другим осям. Кроме того, изменение направления вектора g приведёт к изменению динамики по оси X , что тоже повлияет на общую динамику системы. В таком случае, зависимость разницы синусов углов от времени при разных g будет состоять из быстро осциллирующей компоненты и медленной огибающей. Огибающую компоненту можно получить с помощью фильтров частот для дальнейшего анализа (рис.5).

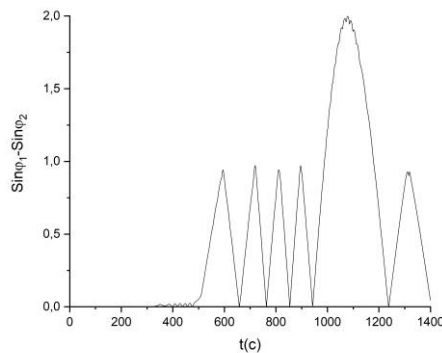


Рис.5. Огибающая зависимости $\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2$ от времени, где φ_1, φ_2 вычислены при $\Delta g = 10^{-7} \text{ м/с}^2$

На данный момент, теоретическая оценка предельной точности измерений представленной платформы для гравиметра представляет 10^{-7} м/с^2 . Такая высокая точность измерений достигается благодаря нелинейности уравнений движения. В стандартных гравиметрах, исследуется динамика частицы, которая осциллирует по трём осям, причём каждое движение контролируется отдельной оптической системой. В нашей системе одна оптическая система, которая отвечает за движение по всем осям, причём уравнения движения по разным осям связаны между собой. Такая сложная система приводит к увеличению чувствительности изменения действующих сил, то есть позволяет измерить изменение ускорения свободного падения с большей точностью. При этом, полученная оценка может быть улучшена дальнейшей оптимизацией системы, увеличением длительности измерения и добавлением дополнительных систем, влияющих на динамику микрогантели.

Таблица 1 — Сравнение точности измерения ускорения свободного падения гравиметрами на основе различных платформ[11].

Экспериментальная система	Точность измерений $m/c^2 \sqrt{G\mu}$
Кубическое зеркало	$1,5 \cdot 10^{-7} (10^{-9} m/c^2 \text{ за } 6,25\text{ч})$
Атомный интерферометр	$4,2 \cdot 10^{-8} (3 \cdot 10^{-9} m/c^2 \text{ за } 300\text{с})$
Атомный интерферометр	$9,6 \cdot 10^{-8} (5 \cdot 10^{-10} m/c^2 \text{ за } 2,8\text{ч})$
Левитирующая оптомеханика	$4 \cdot 10^{-6} (6,9 \cdot 10^{-9} m/c^2 \text{ за } 3,8\text{ч})$
Левитирующая оптомеханика	$9,3 \cdot 10^{-7}$
Оптические микроэлектромеханические схемы	$7,8 \cdot 10^{-8}$
Ёмкостные микроэлектромеханические схемы	$3 \cdot 10^{-9}$
Экспериментальная система	Точность измерений m/c^2
Кубическое зеркало	$2 \cdot 10^{-8}$
Атомный интерферометр	$3,9 \cdot 10^{-8}$
Теоретические системы	Точность измерений $m/c^2 \sqrt{G\mu}$
Локализованный атом	10^{-10}
Левитирующая оптомеханика	10^{-15}
Левитирующая оптомеханика вращения	$2,2 \cdot 10^{-9}$
Эффект Тальбота	10^{-8}
Наша система	Точность измерений m/c^2
	$10^{-7} m/c^2$
	$10^{-8} m/c^2 \sqrt{G\mu}$

В данной работе была исследована полная динамика микроганти в оптическом излучении с гауссовым профилем пучка. Показано, что движение микроганти по разным осям зависят друг от друга, то есть полная динамика является нелинейной. Кроме того, динамика зависит от начальных условий и параметров системы. При различных параметрах, микроганти может вести себя как волчок или как маятник. Нелинейность динамики позволяет использовать микроганти как платформу для создания гравиметров нового поколения, которые отличаются относительной простотой и высокой точностью измерений.

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Рождественский Ю.В.

Библиографический список

1. Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure //Physical review letters. 1970. №4 (24). С. 156 – 159
2. Rodenburg B., Neukirch L. P., Vamivakas A. N., Bhattacharya M. Quantum model of cooling and force sensing with an optically trapped nanoparticle //Optica. 2016. №3 (3). С. 318 – 323.
3. Sleep J., Wilson D., Simmons R., Gratzel W. Elasticity of the red cell membrane and its relation to hemolytic disorders: an optical tweezers study //Biophysical journal. 1999. №6 (77). С. 3085 – 3095.
4. Herranen J., Markkanen J., Videen G., Muinonen K. Non-spherical particles in optical tweezers: A numerical solution //PloS one. 2019. №12 (14). С. e0225773.
5. Zielińska J. A., van der Laan F., Norrman A., Reimann R., Frimmer M., Novotny L. Long-axis spinning of an optically levitated particle: A levitated spinning top //Physical Review Letters. 2024. №25 (132). С. 253601.
6. Lamperska W., Drobczyński S., Nawrot M., Wasylczyk P., Masajada J. Micro-dumbbells—A versatile tool for optical tweezers //Micromachines. 2018. №6(9). С. 277.
7. Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen //Annalen der physic. 1908. №3 (330). С. 377 – 445.
8. Гузатов Д. В., Гайда Л. С. Теоретическое исследование силы светового давления, действующей на сферические наночастицы в поле лазерного излучения //Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2010. №. 3. С. 29 – 33.
9. Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime //Biophysical journal. 1992. №2 (61). С. 569 – 582.
10. Corsetti S., Dholakia K. Optical manipulation: advances for biophotonics in the 21st century //Journal of Biomedical Optics. 2021. №7 (26). С. 070602 – 070602.
11. Rademacher M., Millen J., Li Y. L. Quantum sensing with nanoparticles for gravimetry: when bigger is better //Advanced Optical Technologies. 2020. №5 (9). С. 227 – 239.

УДК 621.375.826

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА В ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ZEMAX

О.Д. Кибирева

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

Введение

В современных условиях, когда требования к стабильности и эффективности лазерных систем постоянно растут, особенно актуально проведение исследований, направленных на оптимизацию работы высокоомощных лазеров. В данной работе основное внимание уделено изучению влияния разъюстировки выходного зеркала на выходную мощность неустойчивого резонатора положительной ветви 300-киловаттного химически кислород-йодного лазера в зависимости от коэффициента увеличения резонатора.

В работах [1-3] описаны методы моделирования лазерных резонаторов, каждый из которых имеет свои особенности. Так, метод Эрмита–Гаусса позволяет аналитически описать модовую структуру за счёт разложения поперечного светового поля на ортогональный набор функций, что обеспечивает высокую точность для симметричных конфигураций, хотя и ограничен малыми аберрациями. Метод Фурье, используется для учёта дифракционных эффектов и требует значительных вычислительных ресурсов. В свою очередь, геометрический метод, основанный на трассировке лучей по законам геометрической оптики, эффективен при моделировании сложных оптических систем с произвольной геометрией, где волновые эффекты играют менее существенную роль.

Программный пакет Zemax, использует метод геометрической трассировки лучей для моделирования оптических систем, представляя собой эффективный инструмент для исследования подобных влияний. Цель исследования заключается в разработке модели в Zemax, позволяющей количественно оценить воздействие разъюстировки выходного зеркала на выходную мощность неустойчивого резонатора, что, в свою очередь, может учитываться при структурно – параметрической оптимизации оптического резонатора.

Постановка задачи и методика моделирования

Исследование направлено на анализ влияния разъюстировки выходного зеркала на выходную мощность неустойчивого резонатора положительной ветви химического кислород-йодного лазера (ХКИЛ) мощностью 300 кВт, состоящего из двух кварцевых зеркал и размером активной среды 0,2м x 0,2м x 2,8м. В рамках работы рассматриваются две конфигурации резонатора с различными коэффициентами увеличения – 1.5 и 1.8, что так же позволяет оценить зависимость потерь мощности от геометрических параметров системы. Основная задача состоит в том, чтобы с помощью программного пакета Zemax, работающего в непоследовательном режиме, смоделировать поведение лучей в резонаторе при варьировании разъюстировки выходного зеркала и провести количественную оценку снижения выходной мощности, регистрируемой детектором, установленным на выходе оптической системы.

Методика моделирования включает в себя следующие этапы: 1) Расчет геометрических параметров неустойчивого резонатора; 2) Моделирование резонатора в Zemax; 3) Анализ результатов и построение графика.

На первом этапе моделирования был выполнен геометрический расчет параметров зеркал, с учетом геометрии активной среды. Для этого использовались базовые принципы геометрической оптики. На рисунке 1 представлена схема неустойчивого резонатора положительной ветви.

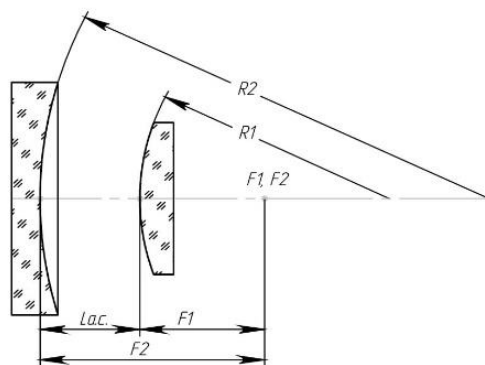


Рисунок 1 - Схема неустойчивого резонатора положительной ветви

Радиусы кривизны зеркал определялись исходя из системы уравнений (формула 1), основанной на геометрических параметрах системы и коэффициенте увеличения. Первое уравнение следует из анализа геометрии на рисунке выше и определяет зависимость длины активной среды и радиус зеркал. Второе уравнение основано на определении коэффициента увеличения через соотношение радиусов зеркал.

$$\begin{cases} R_1 - R_2 = 2 L_{ac} \\ \frac{R_1}{R_2} = M \end{cases} \quad (1)$$

Решая эту системы, можно определить радиусы кривизны зеркал для заданных конфигураций резонатора. При коэффициенте увеличения резонатора 1,5 радиус кривизны большого зеркала – 16,8м,

радиус кривизны малого зеркала – 11,2м, для коэффициента увеличения 1,8 радиусы кривизны зеркал, соответственно, 12,6м и 7м.

Эти расчёты позволяют определить параметры зеркал, и являются основой для дальнейшего моделирования резонатора в программном пакете Zemax.

В данной работе использовался непоследовательный режим трассировки лучей (Non-Sequential Mode) в Zemax. Для объектов в непоследовательном режиме задается расположение в пространстве, материал, свойства поверхностей. При непоследовательной трассировке на поверхность любого непоследовательного объекта, могут попадать на один и тот же объект несколько раз или вообще не попадать на него, в отличие от последовательной трассировки лучей, где все трассируемые лучи должны распространяться через один и тот же набор поверхностей в порядке следования этих поверхностей [3]. В рамках данной работы моделирование проводилось с учетом многократных отражений лучей между зеркалами резонатора, что является критически важным для точного расчета выходной мощности.

Создание оптической системы в программе Zemax берет свое начало с определения структурных элементов в системе. В нашем случае этими элементами будут зеркала резонатора, источник излучения и детектор, который будет измерять выходную мощность излучения.

На следующем этапе создается геометрическая модель системы, где важно местоположение и ориентация в пространстве объектов относительно друг друга с учетом их размеров и параметров. Расположение зеркал определялось с учетом ранее рассчитанных радиусов кривизны и размером активной среды. Источником излучения в неустойчивом резонаторе химического кислород-йодного лазера является молекула йода в возбужденном состоянии, что невозможно промоделировать в Zemax. В связи с этим ограничением будет использоваться диаметр первой зоны Френеля в качестве оценки диаметра зарождения излучения в резонаторе, что является допустимым приближением для данного рода анализа, и будет рассчитываться по формуле (2).

$$d_F = 2 \sqrt{\lambda L_{\text{рез}}} \quad (2)$$

В программе Zemax задаем гауссов источник (Source Gaussian), как источник излучения в резонаторе – распределение интенсивности такого источника задается как распределение Гаусса. Использование распределения Гаусса приблизительно описывает характер излучения, начиная с его зарождения.

В модели, детектор будет установлен на выходе из резонатора, после выходного зеркала. Детектор по поверхности (Surface Detector) позволит эффективно оценить мощность, приходящую на него, что позволит оценить потери в системе. Для точного измерения выходной мощности необходимо задать достаточное разрешение детектора, т.к. более высокое разрешение обеспечит более детализированное измерение распределения энергии. Размер детектора сопоставим с размером большого зеркала, для захвата им всей мощности, которая покинет систему.

В процессе моделирования важным параметром является настройка количества трассируемых лучей, т.к. в резонаторах лучи многократно отражаются от зеркал и могут распространяться в различных направлениях, недостаточное их количество приведёт к существенным ошибкам при детектировании выходной мощности. В большинстве случаев рекомендуется использовать не менее 10^4 - 10^6 количества лучей [4] для корректного моделирования. Чем сложнее система, тем больше лучей требуется для получения достоверных результатов. Это особенно актуально для неустойчивых резонаторов, где излучение сильно рассеивается и многократно отражается. Увеличение количества лучей улучшает точность моделирования, но и увеличивает время вычислений.

Оценка влияния разъюстировки выходного зеркала на выходную мощность

При ручной юстировке зеркал резонатора характерная точность составляет от 10 до 20 угловых секунд, а при автоматизированной юстировки порядка 5-10 угловых секунд. В процессе работы лазерного комплекса уровень разъюстировки может возрасти порядка сотен угловых секунд [4]. Исходя из этих данных, угол разъюстировки в данном исследовании будет варьироваться от 1 до 20 угловых секунд.

После настройки и размещения детектора проводилась серия моделирования для различных значений угла разъюстировки выходного зеркала относительно главной оптической оси для двух конфигураций резонатора с коэффициентами увеличения резонатора, соответственно, 1,5 и 1,8. На рисунке 2 представлены данные с детектора при наклоне вогнутого зеркала на 5, 10, 15, 20 угловых секунд с коэффициентом увеличения резонатора (M=1,5). На рисунке 3 представлены данные с детектора при наклоне вогнутого зеркала на 5, 10 угловых секунд с коэффициентом увеличения резонатора (M=1,8), а на рисунке 4 представлены данные с детектора при наклоне вогнутого зеркала на 15, 20 угловых секунд с коэффициентом увеличения резонатора (M=1,8).

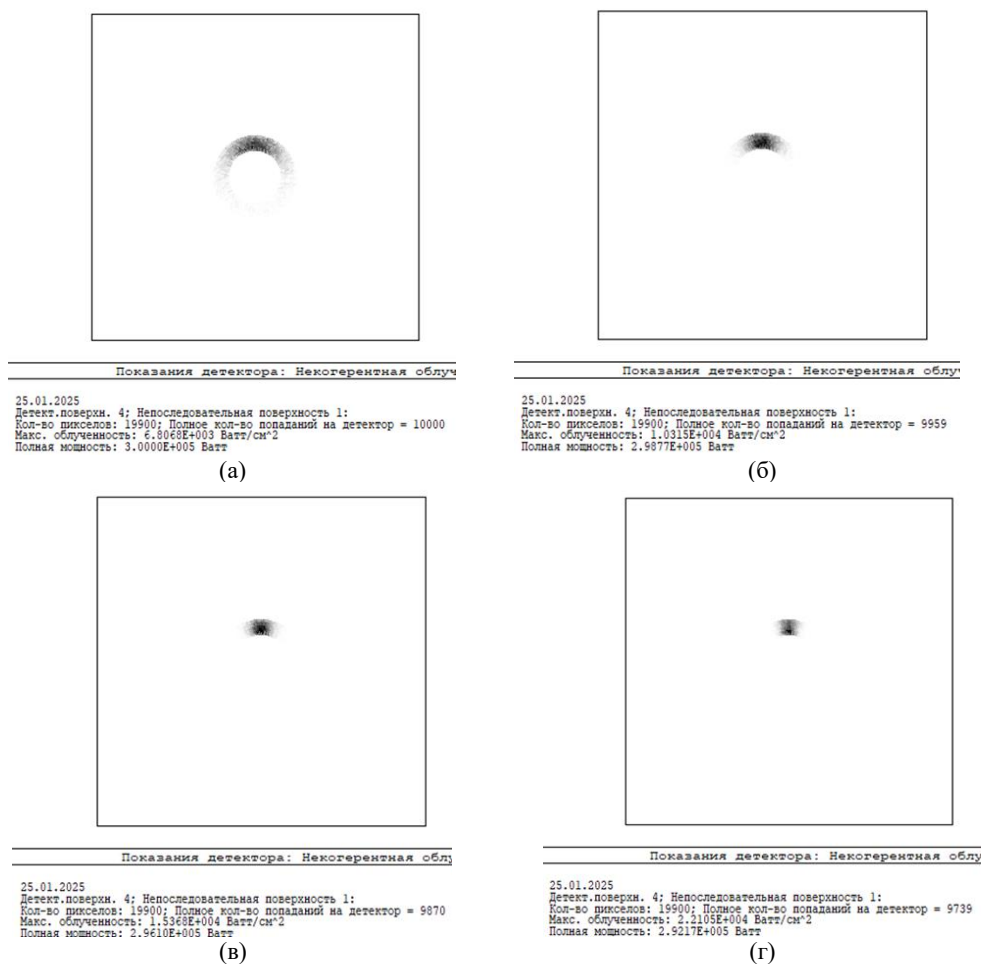


Рисунок 2 - Данные с детектора при наклоне вогнутого зеркала ($M=1.5$) на: (а) - 5 угловых секунд, (б) – 10 угловых секунд, (в) 15 угловых секунд, (г) - 20 угловых секунд

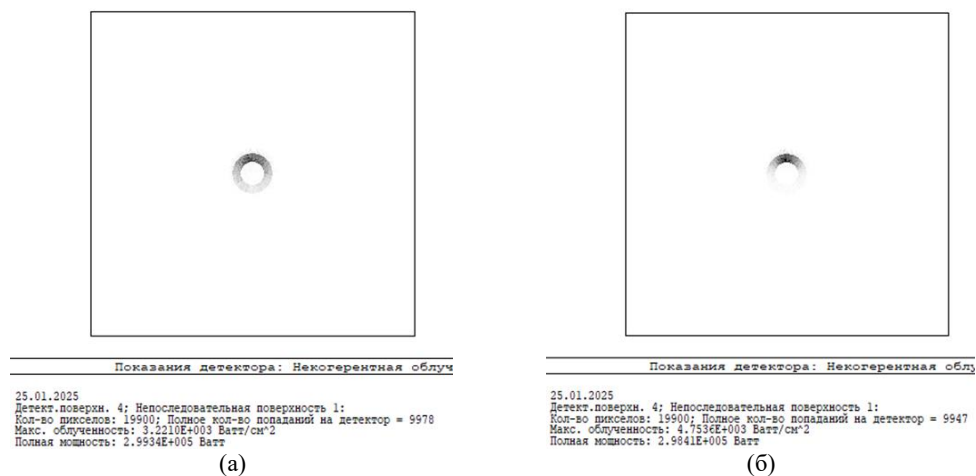


Рисунок 3 - Данные с детектора при наклоне вогнутого зеркала ($M=1.8$) на: (а) - 5 угловых секунд, (б) – 10 угловых секунд

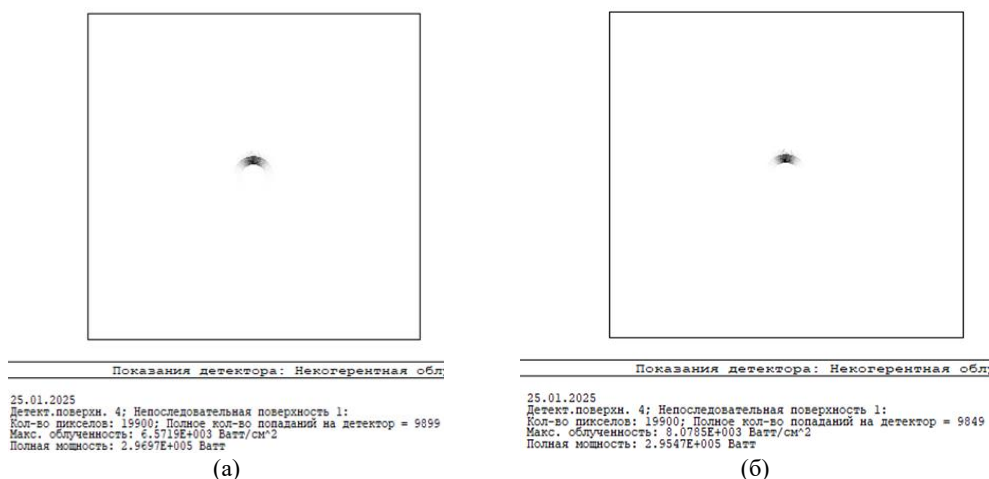


Рисунок 4 - Данные с детектора при наклоне вогнутого зеркала ($M=1.8$) на: (а) - 15 угловых секунд, (б) - 20 угловых секунд

После проведения серии расчетов были обработаны данные, зарегистрированные поверхностным детектором в программном пакете Zemax. Полученные значения выходной мощности систематизированы и представлены в виде графика зависимости относительного уменьшения мощности от относительной разъюстировки выходного зеркала неустойчивого резонатора (рисунок 5). Относительный угол разъюстировки вогнутого зеркала считается по формуле (3).

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha * d}{\lambda} \quad (3)$$

где d – поперечный размер зеркала; α – разъюстировка зеркала (в радианах); λ – длина волны излучения.

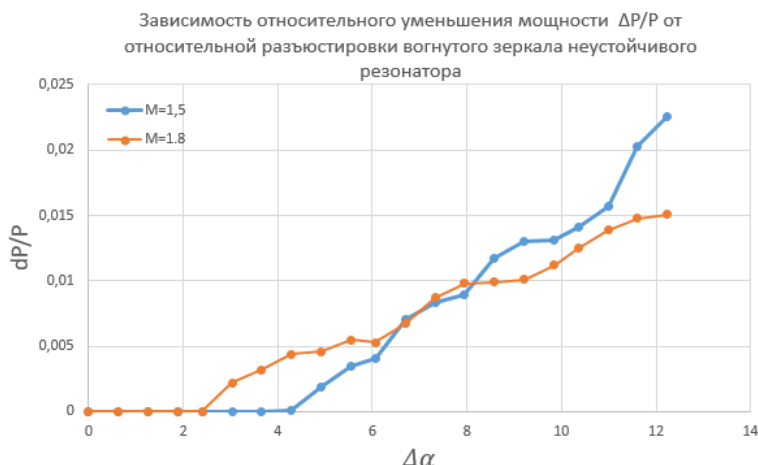


Рисунок 5 - График зависимости относительного уменьшения мощности от относительной разъюстировки выходного зеркала неустойчивого резонатора

Анализ показал, что при небольших углах наклона (до 5 угловых секунд) выходная мощность изменяется незначительно, что свидетельствует о некоторой устойчивости резонатора к малым разъюстировкам. Однако при увеличении угла наклона свыше 10 угловых секунд наблюдается экспоненциальное снижение выходной мощности, что объясняется ростом потерь из-за увеличения расходимости лучей и уменьшения доли излучения, попадающего в активную область резонатора.

Дополнительно был проведен сравнительный анализ графиков, полученных в ходе моделирования в программе Zemax, которая использует геометрический метод, и данных из научной статьи [5], в которой расчеты выполнены методом Фурье. Результаты сравнения показали схожую тенденцию изменения выходной мощности в зависимости от угла разъюстировки, что подтверждает корректность предложенного подхода. Это свидетельствует о том, что геометрический метод, реализованный в Zemax, является работоспособным инструментом для анализа неустойчивых резонаторов и может быть использован.

Таким образом, моделирование позволило количественно оценить влияние разъюстировки на эффективность работы резонатора, что может быть учтено при структурно – параметрической оптимизации оптического резонатора.

Заключение

В результате данной работы был предложен новый способ моделирования неустойчивого оптического резонатора с использованием программного пакета Zemax, который позволяет детально анализировать влияние разъюстировки выходного зеркала на выходную мощность излучения.

Разработанная методика, основанная на непоследовательной трассировке лучей, обеспечила возможность расчета выходных параметров резонатора для двух конфигураций с коэффициентами увеличения 1,5 и 1,8. Проведенное моделирование показало, что даже незначительные угловые отклонения зеркала (более 10 угловых секунд) приводят к снижению мощности, что свидетельствует о высокой чувствительности системы к разъюстировкам.

Сравнительный анализ полученного графика зависимости относительного уменьшения мощности от относительного угла разъюстировки с данными, представленными в работе [5], выполненной с использованием метода Фурье, выявил схожую тенденцию изменения выходной мощности от угла разъюстировки. Это подтверждает корректность и практическую применимость предложенного метода моделирования, а также указывает на возможность его дальнейшего использования. Данный результат свидетельствует о высокой достоверности моделирования с использованием Zemax и подчеркивает потенциал применения методов геометрической трассировки для оптимизации параметров высокомоуных лазерных систем.

Научный руководитель – д.т.н., профессор С.Ю. Страхов.

Библиографический список

1. A. E. Siegman and Edward A. Sziklas, Mode Calculations in Unstable Resonators with Flowing Saturable Gain. 1: Hermite-Gaussian Expansion. // Appl. Opt. 13, 1974. C. 2775-2792.
2. Edward A. Sziklas and A. E. Siegman, Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain. 2: Fast Fourier transform method. // Appl. Opt. 14, 1975. C. 1874-1889.
3. Siegman, A. E. (1965). Unstable optical resonators for laser applications. //Proceedings of the IEEE, 53(3), C. 277-287.
4. ZEMAX Optical design program. User's guide. // Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation, 2010. C. 932
5. Крупномасштабные внутррезонаторные неоднородности и их влияние на параметры излучения мощных лазеров / С.Ю. Страхов, Н.В. Сотникова, И.А. Киселев, В.М. Балашов // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 2. С. 43–49.

УДК 53.06

РАЗРАБОТКА КВАНТОВО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ GaAs P-I-N ДИОДА

Г.А. Касаниди

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Арсенид галлия (GaAs) представляет значительный интерес в контексте его применения в рентгеновских спектроскопических детекторах. Этот материал обладает большей шириной запрещенной зоны ($E_g=1,42$ эВ), чем традиционные материалы, такие как кремний (Si, $E_g=1,12$ эВ) и германий (Ge, $E_g=0,8$ эВ), что позволяет приборам на его основе работать в широком диапазоне температур без существенного ухудшения энергетического разрешения. Кроме того, GaAs обладает относительно низкой энергией образования электронно-дырочных пар (4,184 эВ). Это делает его более предпочтительным материалом в качестве основы для сенсора по сравнению с более широкозонными полупроводниками. GaAs более устойчив к радиации по сравнению с кремнием при облучении электронами, γ -лучами и адронами низкой энергии [1]. Благодаря высокому атомному номеру элементов в соединении, GaAs обеспечивает высокую удельную эффективность детектирования. В результате GaAs может быть применен для детектирования излучения в экстремальных условиях, таких как высокая температура и большие интенсивности, без необходимости использования охлаждения и экранирования, при этом обеспечивая высокое энергетическое разрешение. Отказ от систем охлаждения и экранирования может привести к снижению массы, стоимости, объема и мощности детектора в целом. Использование GaAs может быть полезным как в космических полетах, так и в наземных приложениях, где присутствуют жесткие условия эксплуатации.

В данной работе приведен расчет электрофизических параметров структуры чувствительной области детектора рентгеновского излучения на основе GaAs, моделирование отклика датчика на воздействие гамма-излучения с энергией квантов 60 кэВ от источника ^{241}Am при различных напряжениях смещения, а также дано обоснование выбора напряжения смещения для наиболее эффективного сбора зарядов и точного определения энергии воздействующего гамма-излучения.

Полупроводниковые датчики рентгеновского излучения изготавливаются на основе исходной полупроводниковой высокоомной подложки арсенида галлия, компенсированной хромом, затем создаются разделительные p - n переходы в виде узких параллельных полос вдоль всего кристалла с типичным шагом в несколько десятков мкм. Ширина p -области чаще всего близка к половине шага полосок. Затем формируется сильнолегированный n^+ слой для обеспечения омичности контакта металл-полупроводник. Между n^+ и p^+ слоями прикладывается обратное смещение (U_{cm}), такое, чтобы весь чувствительный объем сенсора d_0 был в режиме обеднения основными носителями заряда [2]. В этом случае чувствительный объем определяется геометрическими параметрами детектора. Каждая полоска работает при этом как отдельный независимый p - i - n диод (рисунок 1).

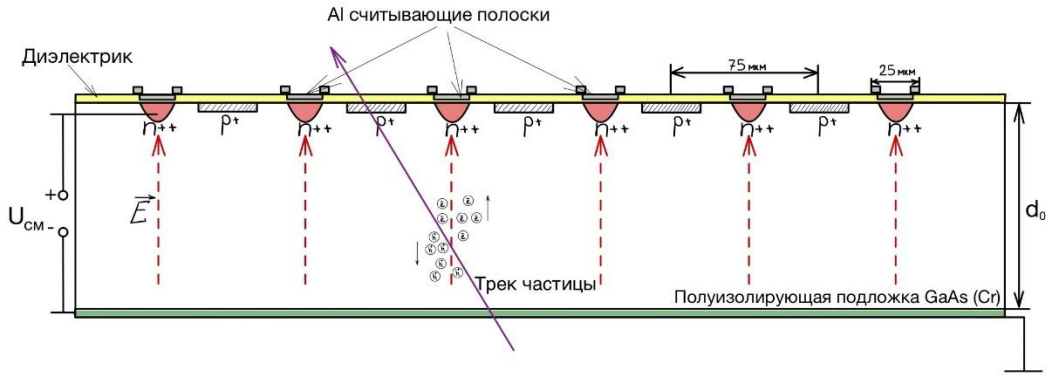


Рис. 1. Упрощенная конструкция *p-i-n* диода на GaAs

Количество сгенерированных электрон-дырочных пар в треке напрямую зависит от энергии частицы, попадающей в чувствительный объем. Полное число неравновесных носителей в треке оценивается как:

$$N_0 = \frac{E_0}{E_i}, \quad (1)$$

где E_0 – энергия, теряемая частицей в объеме полупроводника; E_i – энергия, расходуемая частицей на ионизацию одной электронно-дырочной пары (4,184 эВ для GaAs).

Под действием приложенной к детектору разности потенциалов ($U_{см}$), неравновесные носители из трека дрейфуют к соответствующим электродам и наводят импульс тока во внешней цепи. Наведенная на электродах сила тока должна соответствовать сумме элементарных токов (2) и (3)

$$i_n = e \cdot v_n \cdot \frac{N_0}{d}, \quad (2)$$

$$i_p = e \cdot v_p \cdot \frac{N_0}{d}. \quad (3)$$

Единичные кванты рентгеновского либо гамма-излучения преобразуются в каждом отдельном канале сканирующей линейки усиливаются и преобразовываются в формат, «понятный» для АЦП. В результате пространственное распределение интенсивности преобразуется поканально в цифровой код.

Координату частицы получают путем расчета «центра тяжести» распределения индуцированного заряда между полосками. Другим способом может быть учет формы распределения (приближено к Гауссову) с помощью специального алгоритма.

Чистота полупроводникового материала определяет эффективную работоспособность детекторов высокоэнергетических частиц и его основные характеристики. Концентрация остаточных фоновых примесей (N_ϕ) в полупроводниковой подложке GaAs, равное 10^{14} см^{-3} , задаёт форму распределения напряжённости электрического поля в структуре $E(x)$ (направление поля отмечено стрелками на рисунке 1), поэтому чистота материала в конечном итоге ограничивает толщину чувствительного слоя детектора. При наличии потенциального барьера и однородного распределения концентрации примесей глубина проникновения электрического поля в структуру зависит от величины смещения согласно выражению (4):

$$d(U) = 3,5 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{U}{N_\phi}}. \quad (4)$$

Эффективность сбора заряда Q при поглощении единичного кванта будет определять чувствительность детекторов к излучению. Q определяется дрейфовой длиной (L_n, L_p) неравновесных носителей заряда определяются выражениями (5) и (6) соответственно:

$$L_n = \tau_n \cdot v_n(E), \quad (5)$$

$$v_n(E) = \mu_n(T) \cdot E,$$

$$L_p = \tau_p \cdot v_p(E),$$

$$v_p(E) = \mu_p(T) \cdot E. \quad (6)$$

Из приведённых соотношений следует, что в конечном итоге задачу об определении дрейфовой длины можно свести к двум электрофизическим параметрам структуры: времени жизни носителей (τ_n, τ_p) и распределению стационарной напряжённости электрического поля $E(x)$. Подвижность электронов и дырок в арсениде галлия рассчитывалась согласно аппроксимации Кой-Томаса, учитывая только рассеяние на фонах и ионизованных примесях в чувствительной области [3].

Полевая зависимость дрейфовой длины носителей заряда представлена на рисунке 2.

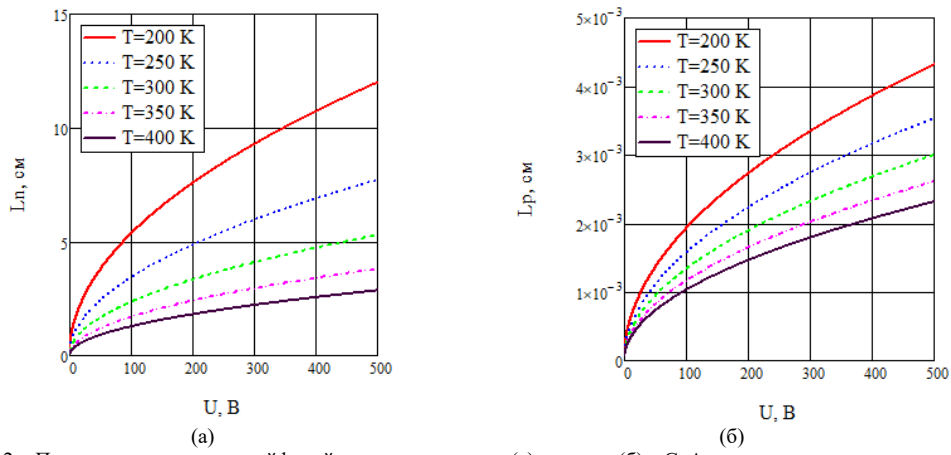


Рис. 2 – Полевая зависимость дрейфовой длины электронов (а) и дырок (б) в GaAs при различных температурах

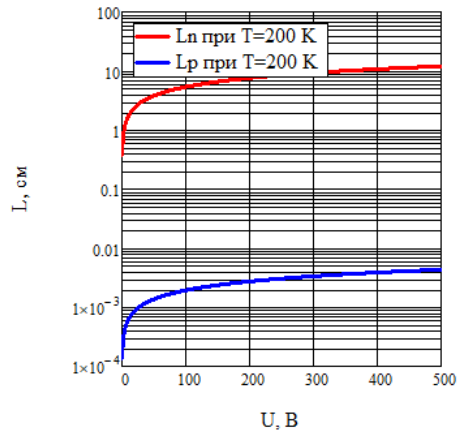


Рис. 3 – Сравнение дрейфовой длины дырок и электронов при различных значениях напряжения смещения в GaAs при T=200 K

Построение зависимостей дырочной и электронной зависимостей дрейфовой длины от приложенного смещения (рисунок 3) показывает, что в наведенном токе доминирующей является электронная компонента, дырочной можно пренебречь, т.к. дырки рекомбинируют и не успевают дойти до соответствующего собирающего электрода.

При большой величине дрейфовой длины неравновесных электронно-дырочных пар в треке, когда выполняется соотношение $L_n > d$, $L_p > d$, для показателя эффективности сбора зарядов справедливо выражение (7)

$$Q(x, U) = \frac{L_n}{d(U)} \left[1 - \left(1 - \frac{d(U) - x}{L_n} \right) \right] + \frac{L_p}{d(U)} \left[1 - \left(1 - \frac{x}{L_p} \right) \right]. \quad (7)$$

Координатная зависимость показателя эффективности сбора зарядов в рассматриваемой структуре представлена на рисунке 4.

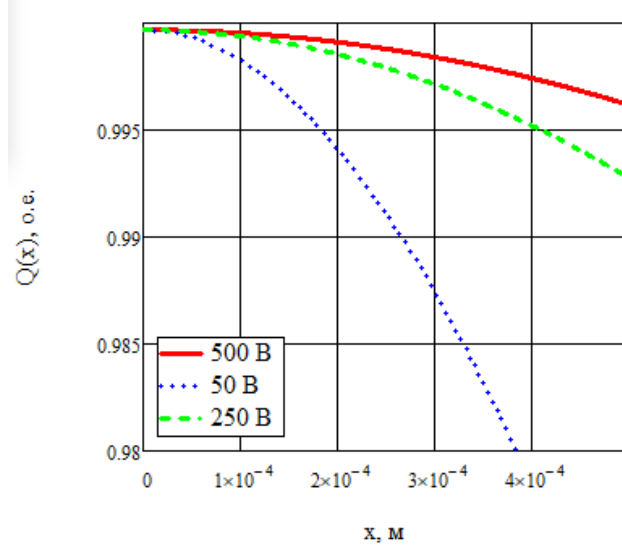


Рис. 4 – Эффективность сбора зарядов по координате чувствительной области при различных значениях напряжения смещения в GaAs при T=300 K

Формирование импульсов тока в квантово-чувствительных детекторах моделировалось при воздействии гамма-излучения с энергией квантов 60 кэВ от источника ^{241}Am . Представим зависимость амплитуды наведенных токов от носителей заряда с различной энергией (интенсивности событий по энергиям – dN/dE) от приложенного смещения (8):

$$\frac{dN}{dE} = \int_0^d \frac{\alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot x)}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z(x) \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot d(E)))} \cdot \exp\left(-\frac{(E - E_{\gamma 0} \cdot Q(x))^2}{2 \cdot \sigma_z^2(x)}\right) dx, \quad (8)$$

где $\alpha=10.983$ – коэффициент поглощения рентгеновского излучения с энергией $E_{\gamma 0}=60$ кэВ в GaAs, $Q(x)$ – эффективность сбора зарядов по координате, уширение $\sigma_z(x)$, связанное с шумами, не рассчитывалось, было взято константой 0,1 кэВ.

Расчетные амплитудные спектры квантово-чувствительного сенсора в диапазоне смещений от -50 до -500 В представлены на рисунке 5.

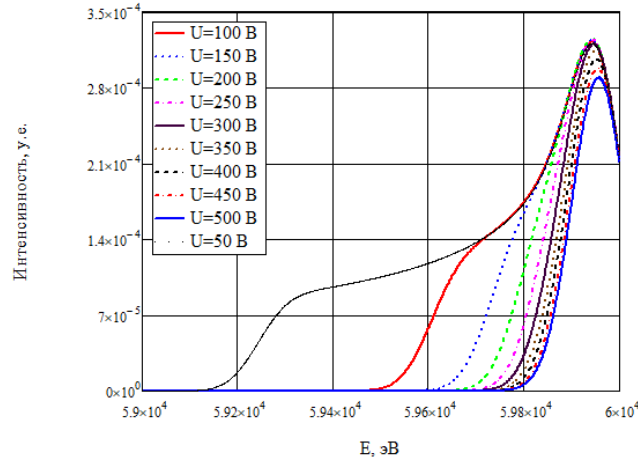


Рис. 5 – Расчетные амплитудные спектры квантово-чувствительного детектора на основе GaAs при различных значениях напряжения смещения на детекторе

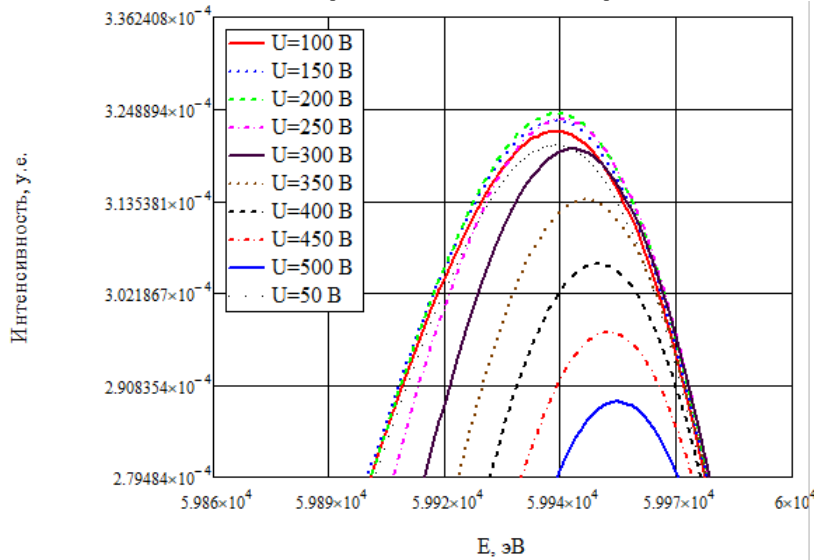


Рис. 6 – Расчетные амплитудные спектры квантово-чувствительного детектора при различных значениях напряжения смещения (в наглядном масштабе)

Пик распределения на рисунке 5 при увеличении напряжения смещается в сторону больших энергий, а размывание спектра уменьшается. Связаны данные явление с более однородным распределением электрического поля по координате и более эффективным сбором заряда из чувствительной области.

Исходя из построенных на рисунках 5 и 6 графиков, оптимальным смещением для данного сенсора будет напряжение в 300 В, т.к. поле проникает на всю глубину чувствительной области, следовательно, в приближении однородного распределения электрического поля (т.е. при однородности распределения примеси по координате), заряд собирается с любой точки одинаково. При этом детектируемая частица практически не теряет своей энергии, т.к. образование электрон-дырочных пар происходит, главным образом, у электрода.

При меньших смещениях большую роль играет неоднородность коэффициента сбора заряда по координате, что приводит к ухудшению энергетического разрешения (уширению спектра dN/dE), а

большие смещения избыточны и даже вредны, т.к. требуют большей мощности питания и вносят дополнительный тепловой шум в измерения.

Научный руководитель – м.н.с. каф. МНЭ А.В. Соломникова

Библиографический список

1. Физика полупроводников: Учеб. пособие. / Виолина Г.Н., Зубков В. И. // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - 2017. - 106 с.
2. Физика полупроводниковых приборов. / Зи С. // М.: Физматлит, 2015. - 544 с.
3. Palankovski V., Quay R. Analysis and simulation of heterostructure devices. – Springer Science & Business Media, 2004.

УДК 535.343.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСНОГО СОСТАВА ПЛАСТИНЫ НРНТ АЛМАЗА, ЛЕГИРОВАННОЙ БОРОМ, НЕРАЗРУШАЮЩИМ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Н.С. Телицын

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Введение

В последнее время к алмазу проявляется повышенный исследовательский интерес, связанный с наличием у данного материала рекордных электрофизических, химических и оптических свойств, которые открывают множество возможностей для разработки фотонных, микро- и нанoeлектронных приборов на его основе [1]. Несмотря на все преимущества данного материала, существуют и проблемы для его активного внедрения в новые устройства, вызванные уникальностью самого алмаза, имеющего огромную ширину запрещенной зоны, рекордную твердость, химическую инертность. Так, огромная ширина запрещенной зоны и наличие только глубоких примесных уровней приводит к чрезвычайно малой степени термической ионизации примеси при комнатной температуре. Также существуют сложности в нанесении контактов и формировании различных структур на основе алмаза. Вышеперечисленные особенности также затрудняют оптическую и электрофизическую диагностику структур на основе алмаза, обработка и интерпретация экспериментальных данных становятся крайне сложными задачами, которые требуют разработки новых подходов [2].

Самым распространенным и информативным методом диагностики-примесного состава алмазов является исследование пропускания в ИК области спектра. Метод FTIR-спектроскопии является признанным методом контроля качества при оценке материалов, производимых в различных отраслях промышленности, и часто служит первым шагом в процессе их анализа. Для изучения образца в ИК-Фурье спектроскопии используется модулированное излучение среднего инфракрасного диапазона. Данное излучение поглощается на определенных частотах, напрямую связанных с энергией колебаний атомов в решетке образца или межатомных связей в молекуле. FTIR-спектроскопия используется как для изучения натуральных алмазов геммологами для достоверной привязки алмазов к коренному источнику, так и для синтетических для определения типа образца и количественного анализа внедренной примеси. Однако ручная обработка спектров FTIR – это времязатратный процесс, который к тому же может содержать существенную погрешность в определении концентрации.

Разрабатываемое в ходе данной работы программное обеспечение позволит упростить и автоматизировать оценку концентрации внедренной примеси в алмаз.

Теоретическая база метода FTIR-спектроскопии

В алмазной геммологии одним из способов выявления особенностей и сопоставления алмазов из различных источников является измерение FTIR-спектров поглощения для определения концентрации структурных дефектов разных типов (A, B1, B2, C др.). По характерным пикам в экспериментальных FTIR-спектрах можно конкретно определить, к какому подтипу относится изучаемый алмаз (a, b) [3]. К настоящему времени накопилась уже чрезвычайно большая база данных для определения примесного состава по пикам их поглощения.

Наблюдающиеся острые пики ИК поглощения на длинах волн 2802 см^{-1} и 2452 см^{-1} служат своего рода отпечатком, свидетельствующим о наличии бора в кристалле, и образуются в результате переходов дырок из основного состояния акцепторного центра $1s$ в возбужденные состояния $2p$ с энергиями 347 и 304 мэВ, соответственно (рис. 1). Третичный пик при 1290 см^{-1} возникает в спектрах сильнолегированных образцов, так как из-за возникновения примесной полосы исчезают узкие отклики бора в области собственного трехфононного поглощения.

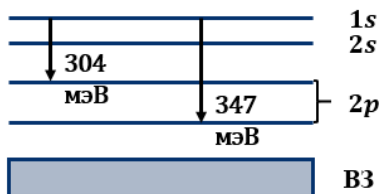


Рис.1. Упрощенная схема энергетических уровней бора в алмазе, описывающая механизмы поглощения в ИК-спектрах

Для оценки концентрации частично компенсированного бора (понимая ее как разность концентраций акцепторов и доноров $N_A - N_D$) по экспериментальным спектрам FTIR в легированных объемных образцах с равномерным распределением примеси используются уточненные эмпирические калибровочные зависимости Коллинза в двух полосах примесного поглощения бора [4]:

$$[N_A - N_D](\text{ppm}) = (0,0350 \pm 0,0028) \cdot H_{2800}(\text{см}^{-1}),$$

$$[N_A - N_D](\text{ppm}) = (0,105 \pm 0,008) \cdot H_{2454}(\text{см}^{-1}),$$

$$[N_A - N_D](\text{ppm}) = (1,0 \pm 0,15) \cdot H_{1290}(\text{см}^{-1}),$$

где H_{2800} , H_{2454} , H_{1290} – амплитуда соответствующего пика в спектре поглощения. Причем для легированного бором алмаза 1 ppm (parts per million) примеси приблизительно соответствует ее концентрации $[N_A - N_D] = 1,67 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В анализе спектров FTIR для корректного выбора пика при пересчете в концентрацию бора за основу взят алгоритм, приведенный на рис. 2 и изначально реализованный в работе [4]. Значение эффективной оптической плотности в характерных пиках сравнивается с величиной $S = 1,75$. Этот критерий используется, чтобы исключить из рассмотрения пики, в которых проявляется насыщение поглощения фотонов полупроводником.

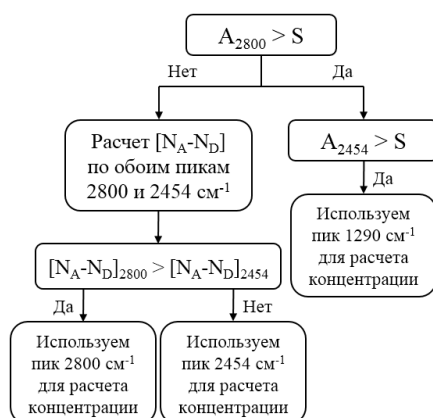


Рис.2. Алгоритм для оценки концентрации бора по FTIR-спектрам из [3]

Метод Фурье-спектроскопии в настоящее время имеет важность не только в геммологии, но и в росте синтетических алмазов в качестве первого после рентгена контроля состава. Например, в статье И. В. Клепикова, А. В. Колядина и Е. А. Васильева [5] приводится анализ уникальных синтетических (выращенных методом HPHT) многосекторных образцов монокристаллического алмаза. Данное исследование интересно в первую очередь с технологической точки зрения, т.к. определение концентрации бора методом FTIR-спектроскопии в разных секторах позволило определить скорость внедрения примеси по различным кристаллографическим направлениями роста алмаза.

Разработанное ПО

В среде графического программирования LabVIEW был разработан виртуальный прибор, лицевая панель которого приведена на рис. 3. С его помощью появилась возможность быстро и точно определять концентрацию примеси бора в объемнолегированных образцах алмаза. На лицевой панели прибора расположен элемент управления вкладками (Tab control) для переключения между панелями прибора: «Лицевая панель прибора», «Подстройка спектра (Advanced)» и «Теоретическое описание». Лицевая панель включает в себя 4 графика (основной график зависимости оптической плотности от волнового вектора под названием «FTIR-спектры» и 3 участка спектра поглощения под ним, соответствующие трем характерным диапазонам с пиками поглощения бора). Также на этой панели реализована возможность загрузки 2 текстовых файлов с исходными данными и переключатель для выбора обрабатываемого файла. Широкий функционал позволяет выбирать пик, используемый для расчета концентрации бора, включать и выключать преобразование Фурье для сглаживания исходного спектра, выводить на экран инструкцию по нажатию на кнопку «HELP», рассчитывать концентрацию бора и азота в образцах.

Исходные файлы, полученные со спектрометра, для обработки загружаются в программу с расширением .txt, далее необходимо выбрать файл, по которому будут осуществляться дальнейшие расчеты и построения спектров поглощения в определенных диапазонах. Пользователю необходимо выбрать, по какому пику будет осуществляться расчет (2800, 2454 или 1290 см^{-1}), в зависимости от характерных особенностей исследуемого образца и в соответствии с алгоритмом (открывается при нажатии на кнопку «HELP»). Далее программа автоматически вычисляет положение максимума, а в положении впадин по обе стороны от пика необходимо установить курсоры для корректного расчета концентрации. Вкладка «Подстройка спектра» включает в себя график поглощения в двухфоновой области (от 1800 до 2300 см^{-1}), так называемый М-спектр, характеризующий поглощение решеткой алмаза.

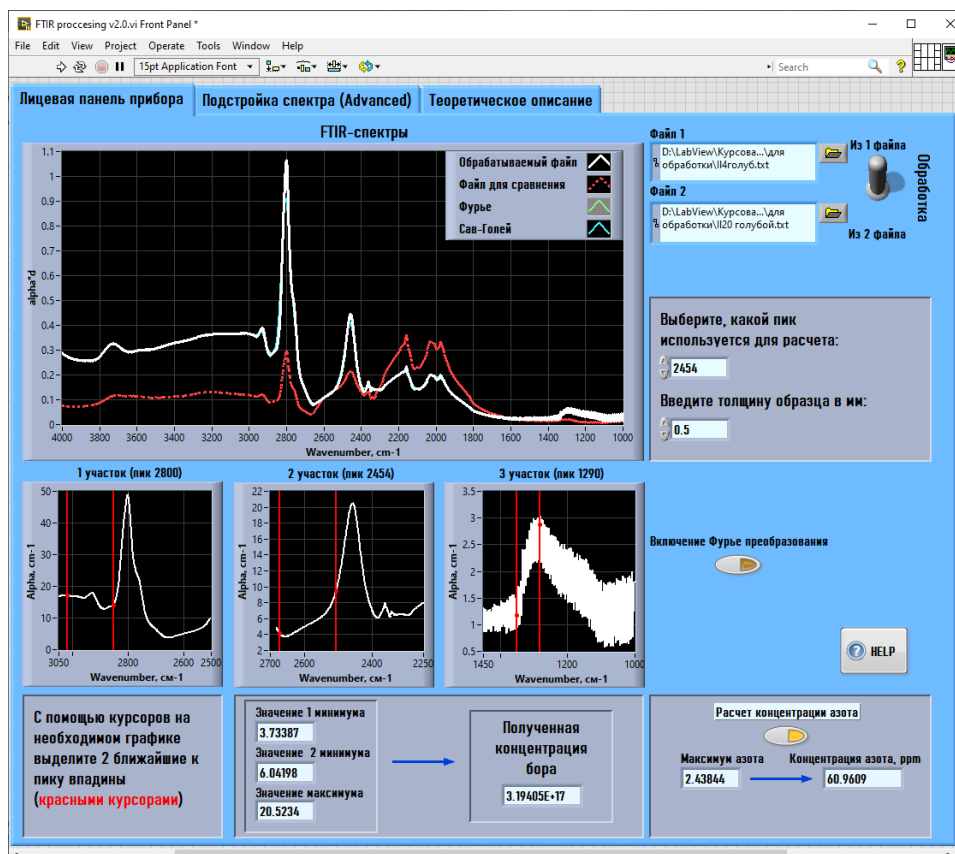


Рис. 3. Лицевая панель разработанного виртуального прибора для оценки концентрации примеси в алмазе

Также в программе реализованы 2 варианта сглаживания исходных спектров оптической плотности: фильтрация с помощью Фурье-преобразования и полиноминое сглаживание посредством фильтра Савицкого-Голея. Данные функции в дальнейшем позволят внедрить полную автоматизацию в программу, т.е. осуществить поиск максимумов и минимумов в спектрах поглощения без участия в этом процессе пользователя. Фильтрация же в этом случае позволяет избавиться от шумящих составляющих в спектрах, которые критично влияют на функции автоматического определения положений пиков поглощения и на корректность расчета концентрации, соответственно [6].

Экспериментальные результаты

С помощью разработанного ПО было проведено исследование многосекторной пластины алмаза толщиной 0,5 мм, легированной бором (рис.4).

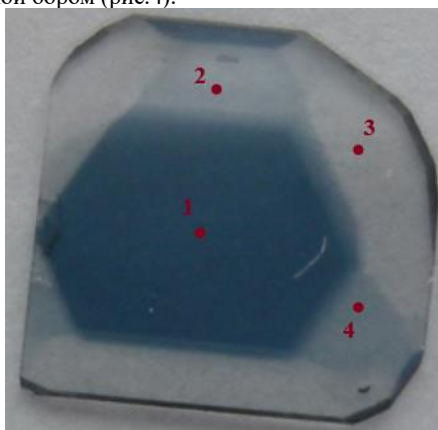


Рис. 4. Монокристаллическая многосекторная алмазная пластина, легированная бором

Уникальность данного образца заключается в его строении и наличии в нем секторов различной окраски, что свидетельствует о различной скорости внедрения атомов бора по различным кристаллографическим направлениям в ходе НРНТ роста. На рисунке 6 приведены спектры FTIR оптической плотности, измеренные в разных точках пластины

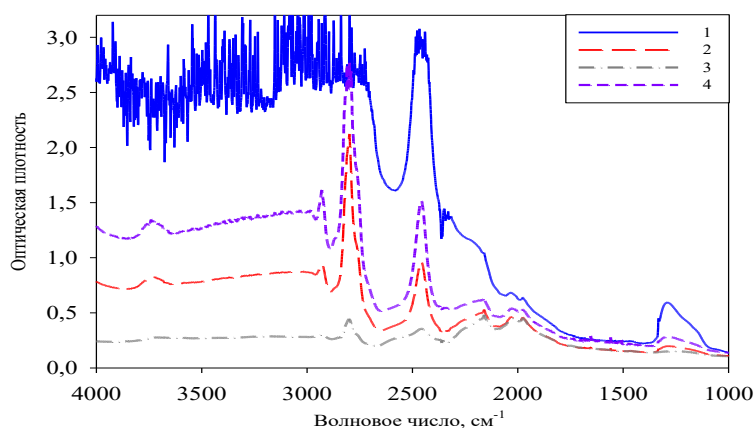


Рис. 5. Экспериментальные FTIR-спектры исследуемого многосекторного образца в различных точках

Дальнейшие расчеты в ПО позволили определить концентрацию акцепторной примеси бора в каждой из этих точек, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Рассчитанные значения концентрации бора в разных точках исследуемой пластины

Точка на образце	Выбранный пик для расчета, см ⁻¹	Полученное значение концентрации, см ⁻³
1	1290	$1,8 \times 10^{18}$
	2454	$9,9 \times 10^{17}$
2	2454	$3,3 \times 10^{17}$
	2800	$2,1 \times 10^{17}$
3	2800	1×10^{16}
	-	-
4	2454	$5,2 \times 10^{17}$
	2800	$2,6 \times 10^{17}$

Из рассчитанных данных видно, что в пределах одной пластины степень легирования примесью бора может отличаться вплоть до нескольких порядков. Приведенные в таблице 1 значения концентрации были рассчитаны по двум пикам в спектре поглощения для всех точек, кроме точки 3, для наглядности работы разработанного ПО. Однако в соответствии с алгоритмом (рис. 2) правильными и точными значениями будут являться следующие: для точки 1 – по пику 1290 см⁻¹, для 2 и 3 точек – по 2454 см⁻¹.

Благодарность

Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2025-0007 (государственное задание Минобрнауки Российской Федерации № 075-00003-25-00 от 25.12.2024).

Научный руководитель – м.н.с. А.В. Соломникова

Библиографический список

1. Integrated photonic devices in single crystal diamond / S. Mi, M. Kiss, T. Graziosi, N. Quack // Journal of Physics: Photonics. — 2020. — № 2.
2. Характеристика электрофизическими методами монокристаллического алмаза, легированного бором (обзор) / В. И. Зубков, А. В. Соломникова, А. В. Соломонов [и др.]. // Журнал технической физики. — 2023. — № 93. — С. 5-28.
3. Zaitsev, A. M. Optical properties of diamond: a data handbook / A. M. Zaitsev. — 17. — Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. — 502 с.
4. D. Howell, A.T. Collins, L.C. Loudin, P.L. Diggle, U.F.S. D'Haenens-Johansson, K. V. Smit, A.N. Katrusha, J.E. Butler, F. Nestola, Automated FTIR mapping of boron distribution in diamond // Diam. Relat. Mater. 96, 2019, p. 207–215. doi:10.1016/j.diamond.2019.02.029
5. Klepikov I.V., Koliadin A.V., Vasilev, E.A. Analysis of type IIb synthetic diamond using FTIR spectrometry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, p. 286.
6. Зубков В. И., Соломонов А. В. Компьютерные технологии в научных исследованиях / Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006, 88 с.

УДК 535.211

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ЛАЗЕРА НА СВЕРЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА В УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

П.С. Куранов, Е.Г. Руденский, А.Т. Ульянчиков

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Аннотация

В данной работе представлены результаты исследования различных режимов работы лазера для сверления отверстий диаметром менее 200 мкм лазерным излучением на глубину 0,68 мм в листах углеродистой стали sk5.

Введение

С развитием технологий появилась потребность в новых методах сверления отверстий. Традиционные способы неэффективно показывают себя в таких задачах, как сверление под углом к плоскости предмета и сверление отверстий малого диаметра. Для оптимального решения этих задач можно использовать лазерное сверление, которое методом выдавливания расплавленного материала пробивает отверстие в изделии. Статья: Филиппов А.И. Анализ применения лазерного излучения в сверлении отверстий, 2020 - 3с.

Оптимизация лазерного сверления поможет продвинуть авиационную и космические отрасли, а также науку в целом.

Данный вопрос начали рассматривать в статье : Sanjay M., Vinod V. Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of thin aluminum sheet, 2013. - 614 с., в которой они меняли такие параметры, как фокусное расстояние и газовое давление, за счет которого и происходит выдавливание расплава.

Так же было изучено, как изменения режимов работы лазера и технологических газов под давлением влияют на качество и скорость обработки нержавеющей стали толщиной марки 12X18H10TM2a, алюминия Амг5, стали аустенитного класса Ст2пк в статье: Хайруллина Л.Р., Смородин Ф.К. Технология лазерного сверления и резки отверстий в изделиях деталей авиастроения, 2016 - 4 с.

Наше исследование, описанное в данной работе, предоставит актуальную информацию по рассматриваемой теме, что поможет продвинуть технологию сверления отверстий малого диаметра.

Целью данной работы является определение оптимального режима работы лазера для сверления отверстий в исследуемой стали.

1. Экспериментальная установка

Излучение лазера с активной средой Nd: YAG и длиной волны 1,064 мкм проходит через прозрачное стекло, собирающую линзу с фокусным расстоянием $F = 90$ мм и воздействует на перпендикулярно закрепленную по отношению к оси лазера пластину углеродистой стали sk5 толщиной $H = 0,65 \pm 0,01$ мм (рисунок 1). Лазер работает в импульсном режиме с длительностью импульсов $\tau = 165$ мкс. Энергия одного импульса E варьировалась от 280 до 337 мДж. Сверление осуществлялось одиночными импульсами, следующими друг за другом с частотой f : 1, 2.5, 5, 7.5, 10 Гц.

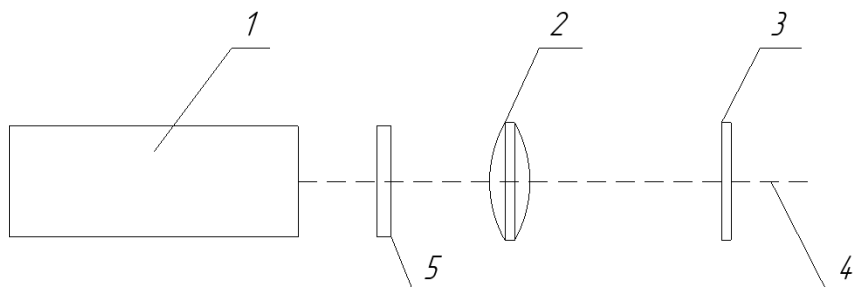


Рисунок 1 - схема экспериментальной установки

Здесь 1 - лазер, 2 – фокусирующая линза, 3 - стальная пластина, 4 – ось, 5 – стекло.

Энергия импульса изменялась при помощи прозрачного стекла, которое располагалось каждый раз под разными углами к оси лазера, однако оставалось параллельным полу. Таким образом, чем больше угол между плоскостью стекла и осью, тем больший путь излучение преодолевает внутри стекла, тем самым испытывая большие потери на рассеянии и поглощении. Энергию импульса измеряли оптическим мощиметром, который располагался между стеклом и линзой. На время сверления мощиметр убирали.

Для вычисления каждого отдельного приведенного в таблице значения совершалось 5 измерений. Далее для полученных значений вычислялось среднее арифметическое и уже оно записывалось в таблицу.

Опытные образцы были помечены белым маркером, для более быстрого определения расположения отверстий. Далее металлическая пластинка помещалась на подставку, которая в свою очередь была на предметном столике. Далее через монитор, к которому был подключен микроскоп мы находили входные и выходные отверстия, делая их снимки через специальное приложение.

Обработка фотографий и определение размера производились в той же программе. Для определения размеров необходимо было программно определить область снимка, далее программа сама выстраивает размерную сетку, по которой можно произвести вычисление размера отверстия.

На рисунке 2 представлен снимок входного отверстия с указанными на нем размерами



Рисунок 2 – Снимок входного отверстия

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Условия и результаты сверления представлены в таблице 1. Здесь f - частота следования импульсов; n_1 , n_2 - необходимое для пробития сквозного отверстия количество импульсов при энергии E_1 и E_2 соответственно; n_p - количество импульсов, обрабатывающих отверстие; t_1 , t_2 - среднее время, затраченное на сверление отверстия при заданной энергии импульса E_1 и E_2 соответственно.

Таблица 1 - Условия и результаты сверления.

N	H, мм	f , Гц	E_1 , мДж	E_2 , мДж	n_1	n_2	t_1 , с	t_2 , с	n_p
1	0,65	1	320	280	4	30	5	30	1
2	0,65	2,5	327	280	4	60	5	24	8
3	0,65	5	328	290	4	95	5	19	21
4	0,65	7,5	335	290	4	135	5	18	33
5	0,65	10	337	295	4	270	5	27	46

Первый эксперимент.

Для пробития отверстия в исследуемой пластине требуется 4 импульса с энергией $E = 320$ мДж. Было решено выбрать единое для всех экспериментов время сверления $t_1 = 5$ с для того, чтобы в каждом эксперименте была возможность после пробития отверстия его обработать разным количеством импульсов.

В данном эксперименте исследуется влияние излучения на качество обработки поверхности в зависимости от количества обрабатывающих импульсов. Количество обрабатывающих импульсов n_p приведено в таблице 1.

В ходе исследования было обнаружено, что после образования сквозного отверстия, канал вдоль своей длины заполняется расплавом. Для его очистки использовалось лазерное излучение. Так, при частоте 1 Гц, отверстие обрабатывалось от образовавшегося расплава единственным импульсом. При частоте 2,5 Гц, на отверстие воздействовало уже 8 импульсов и т.д.

На рисунке (2) показаны входные и выходные диаметры отверстий, обрабатываемых разным количеством импульсов.

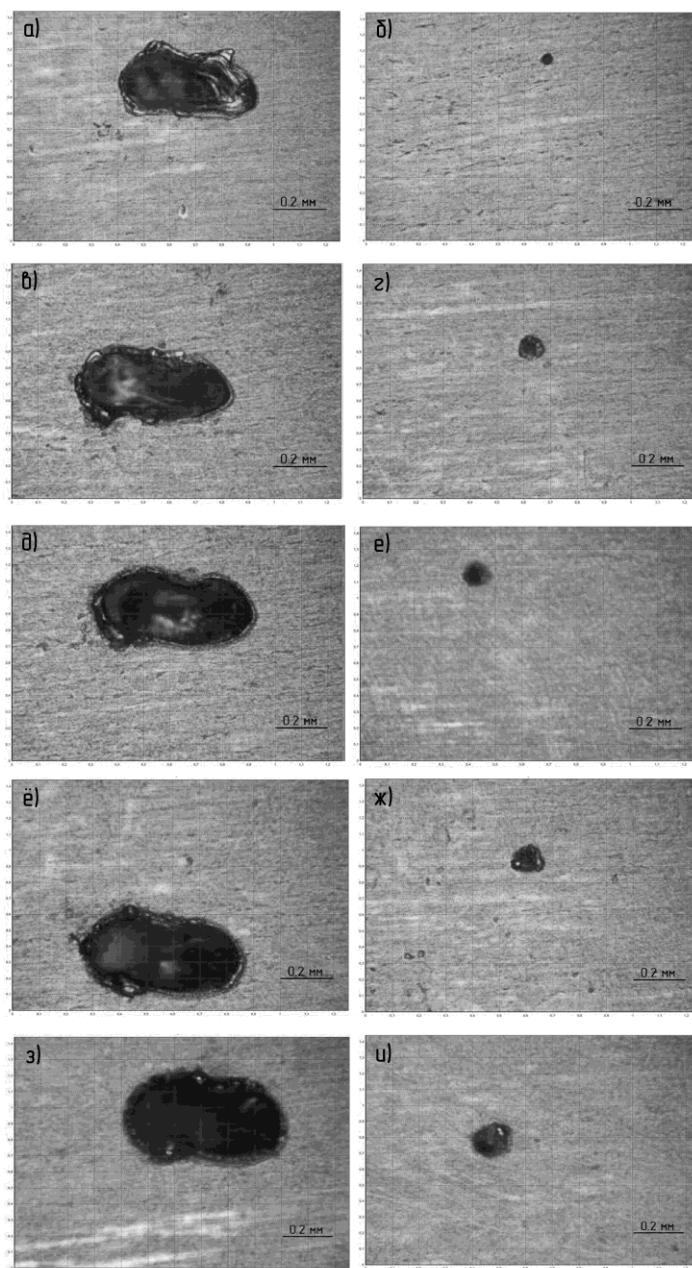


Рисунок 3 – Входные и выходные диаметры отверстий

На рисунке 3 на картинках “а”, “в”, “д”, “ж”, “и” показаны виды входных диаметров отверстий в пластине sk5 толщиной $H = 0,68$ мм, обрабатываемые с энергией импульса $E = 320; 327; 328; 335; 337$ мДж с частотой $f = 1; 2,5; 5; 7,5; 10$ Гц, с $n_p = 1; 8; 21; 33; 46$ соответственно. На картинках “б”, “г”, “е”, “з”, “к” показаны виды выходных диаметров отверстий.

Как видно из приведенных выше рисунков, желательна хотя бы минимальная очистка лазерными импульсами для удаления большей части расплава с поверхности отверстия. Выявлено, что чем больше импульсов обрабатывает отверстие, тем более гладкую форму оно принимает.

Было установлено, что подобная очистка не оказывает влияние на размер отверстия.

Второй эксперимент.

Для пробития отверстия было задано количество энергии в импульсе $E_2 = 280; 290; 295$ мДж, что составляет 85% энергии от используемой в первом эксперименте.

В данном эксперименте исследуется форма и качество обработки поверхности отверстия при разном количестве воздействующих на него импульсов с меньшей энергией.

На рисунке 4 показаны входные и выходные диаметры отверстий, обрабатываемых разным количеством импульсов.

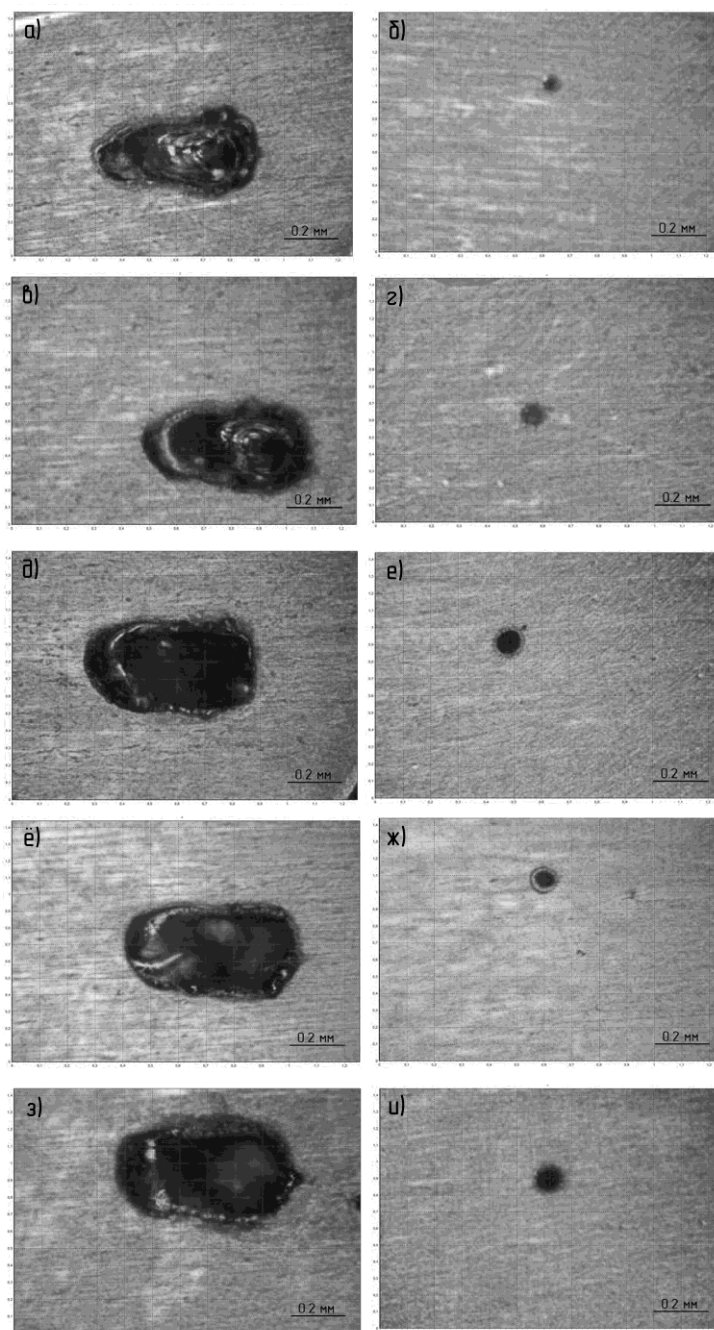


Рисунок 4 – Входные и выходные диаметры отверстий

На рисунке 4 на картинках “а”, “в”, “д”, “ж”, “и” показаны виды входных диаметров отверстий в пластине sk5 толщиной $H = 0,68$ мм, обрабатываемые с энергией импульса $E = 280; 280; 290; 290; 295$ мДж с частотой $f = 1; 2,5; 5; 7,5; 10$ Гц, с $p_2 = 30; 60; 95; 135; 270$ соответственно. На картинках “б”, “г”, “е”, “з”, “к” показаны виды выходных диаметров отверстий.

Как видно из рисунков, оптимальным количеством обрабатывающих импульсов является 95 импульсов с энергией в одном импульсе – 290 мДж. Однако, заметно, что чем большее количество импульсов действует на материал, тем выше качество поверхности отверстия.

Заключение

В качестве основных критериев для оценки полученных результатов и выбора оптимального режима работы лазера возьмем скорость пробития отверстия и качество обработки его поверхности (таблица 2).

Здесь N - номер эксперимента; E – энергия импульса; f – частота следования импульсов; t – время сверления.

Таблица 2 – Результаты сверления.

N	E , мДж	f , Гц	Качество поверхности	t , с
-----	-----------	----------	----------------------	---------

Первый эксперимент				
1	320	1	Низкое	5
2	327	2,5	Низкое	5
3	328	5	Среднее	5
4	335	7,5	Хорошее	5
5	337	10	Высокое	5
Второй эксперимент				
1	280	1	Низкое	30
2	280	2,5	Низкое	24
3	290	5	Среднее	19
4	290	7,5	Среднее	18
5	295	10	Среднее	27

Качество поверхности определялось исходя из приведенных выше рисунков 2 и 3.

Проведенные эксперименты показали, что при сверлении пластин из углеродистой стали sk5 толщиной $H = 0,68$ мм лазерным импульсным излучением с частотой следования f от 1 до 10 Гц микросекундной длительности с энергией одного импульса E в пределах от 280 до 338 мДж, формирование сквозных отверстий минимального диаметра возможно за время от 0,2 до 30 секунд. На примере множества экспериментов, было определено, что получение минимальных отверстий с хорошим качеством поверхности возможно при дополнительной обработке и очистки отверстий лазерным излучением от расплава. Обнаружено, что наиболее качественное отверстие получается при энергии импульса 338 мДж, частоте 10 Гц и времени действия излучения – 5 с. При таких параметрах лазера удастся получить сквозное отверстие минимального выходного диаметра высокого качества за минимальное время.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Е.Э. Попов

Библиографический список

1. Sanjay M., Vinod V. Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of thin aluminum sheet, 2013. - 614 с.
2. Глова А.Ф., Клочков И.Д., Лысиков А.Ю., Нелюбин С.С. Лазерное сверление отверстий малого диаметра с высоким аспектным отношением “АО ГНЦ ТРИНИТИ”, 2006 - 5 с.
3. M.M. Hanon, E. Akman, B. Genc Oztoprak, M. Gunes, Z.A. Taha, K.I. Hajim, E. Kacar, O. Gundogdu, A. Demir. Experimental and theoretical investigation of the drilling of alumina ceramic using Nd:YAG pulsed laser, 2012 - 912 с.
4. Konstantinos Salonitis, Aristidis Stournaras, George Tsoukantas, Panagiotis Stavropoulos, George Chrysosouris. A theoretical and experimental investigation on limitations of pulsed laser drilling, 2007 - 96 с.
5. Солохин С.А., Сметанин С.Н., Гаврилов А.В., Ершков М.Н., Федин А.В. Принципы лазерного сверления отверстий при адаптированном управлении параметрами повторяющихся лазерных импульсов “Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева”, 2012 - 5 с.
6. Хайруллина Л.Р., Смородин Ф.К. Технология лазерного сверления и резки отверстий в изделиях деталей авиационного строения, 2016 - 4 с.
7. F.A. Al-Sulaiman, B.S. Yilbas. CO2 laser cutting of a carbon/carbon multi-lamelled plain-weave structure, 2006 - 345 с.
8. X. Chen; W. T. Lotshaw; A. L. Ortiz; P. R. Staver; C. E. Erikson; M. H. McLaughlin; T. J. Rockstroh Laser drilling of advanced materials: Effects of peak power, pulse format, and wavelength, 1996 - 8с.
9. Филиппов А.И. Анализ применения лазерного излучения в сверлении отверстий, 2020 - 3с.
10. Мосави Р.К. Лазерные системы для сверления отверстий в медицинских устройствах, 2019 - 19с.

УДК 621.373.826

ВЛИЯНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ЛИНЗЫ НА СКОРОСТЬ ПРОБИТИЯ И ДИАМЕТР ОТВЕРСТИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ СВЕРЛЕНИИ СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

А.В. Чепыжова, С. А. Селиванова, Л.А. Новоселова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Введение

Лазерные способы обработки материалов находят широкое применение во многих областях: аэрокосмической, автомобильной, электронной и энергетической промышленности. Одним из таких методов является лазерное сверление. Такой способ обработки материала обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами: обеспечивает высокую точность и производительность

процесса за счёт бесконтактного использования инструмента, а также применим для широкого спектра материалов [1].

В мировой практике для лазерного сверления применяются фемто- и пикосекундные системы, реже с длительностью импульса 1 мкс. Однако, несмотря на это, микросекундные лазеры обладают рядом преимуществ: микросекундные лазеры значительно дешевле фемтосекундных как по начальным затратам на оборудование, так и по эксплуатационным расходам; микросекундные лазеры лучше подходят для обработки толстых материалов, таких как металлы и композиты, благодаря способности передавать больше энергии за один импульс. Эти характеристики делают их привлекательными для задач, где требуется высокая энергия импульса при ограниченном бюджете [2].

Лазерное формирование отверстий представляет собой процесс удаления материала, который включает два основных механизма: непосредственное удаление материала из зоны взаимодействия пучка и последующее распространения фронта луча в объеме материала [3]. В зависимости от поставленных задач и характеристик материала применяются различные методы сверления отверстий. Выделяют следующие виды: одноимпульсный (лазерный луч высокой энергии фокусируется на материал, что приводит к мгновенному испарению материала и образованию отверстия), ударный (использует серию коротких лазерных импульсов для постепенного удаления материала и создания отверстия), сверление с треппингом (луч движется по круговой траектории, постепенно увеличивая диаметр отверстия), спиральное сверление (лазерный луч движется по спиральной траектории, углубляясь в материал) [4].

В статье [6] результаты исследования показывают, что при увеличении толщины пробиваемого материала качество отверстий ухудшается, увеличивается конусность и появляются наплывы.

В работе [7] результаты демонстрируют, что увеличение энергии импульса и частоты повторения улучшает качество отверстий, но может приводить к увеличению зоны термического влияния.

В статье [8] отмечено улучшение конусности отверстия и поверхности материала в зоне облучения за счёт использования линз с меньшим фокусным расстоянием.

В работе [9] авторы отмечают, что под воздействием лазерного излучения на поверхность материала формируются микрократеры и наплывы из-за параметров излучения лазера.

В статье [10] длительность импульса, мощность лазера и частоту импульсов называют наиболее важными параметрами, влияющими на качество отверстия.

Ещё одним значимым фактором изменения поверхности материала при лазерном сверлении является количество импульсов. В статье [11] интенсивность повреждения образцов в облучённой зоне была связана с количеством и частотой импульсов.

Из указанных работ видно, что в литературе встречаются данные об оптимизации процесса сверления отверстий с использованием различных методов лазерного сверления и вспомогательных сред. Однако данных, позволяющих в полноценно оценить влияние фокусного расстояния линзы на параметры сверления, недостаточно. Поэтому целью данной работы является исследование влияния фокусного расстояния линзы на параметры лазерного сверления, такие как скорость пробития материала и диаметр получаемых отверстий.

Материалы и методы

Лазерное сверление выполняется с помощью твердотельного лазера с активной средой — Nd:YAG, с длиной волны 1064 нм. Лазер работает в импульсном режиме с длительностью импульса 160 мкс, мощность излучения равна 353,4 мДж. Для фокусировки лазерного пучка были использованы линзы с фокусными расстояниями, 2,3 см, 4,5 см, 5 см и 9 см.

Перпендикулярно оси лазерного излучения устанавливаются пластины из сплава стали SK-5, толщиной $0,68 \pm 0,01$ мм. Пластина передвигалась в пределах каустики лазерного пучка для точности получения результатов.

Диаметры полученных входных и выходных отверстий измерялись с помощью электронного микроскопа с объективом $\times 10$. Это позволило изучить качество краёв отверстий и оценить влияние изменения фокусирующей линзы на процесс сверления.

Основной задачей эксперимента было выявить влияние положения фокальной плоскости на диаметр входного и выходного отверстий. Сверление осуществлялось одиночными импульсами с интервалом в 1 с и частотой 1 Гц. Положение фокальной плоскости изменялось при помощи стэнда с микрометрической линейкой вручную. Таким образом для каждой из линз было проведено 3 группы измерений – в фокальной плоскости линзы, за фокальной плоскостью линзы и перед фокальной плоскостью.

Результаты

В ходе настоящего исследования влияния фокусного расстояния линзы на процесс сверления стальной пластины твердотельным лазером было установлено, что скорость пробития пластины возрастает линейно с увеличением фокусного расстояния. Также было зафиксировано, что наибольшие диаметры входных отверстий получили при использовании линзы с фокусным расстоянием 4,5 см. На рисунках 1-4 представлены результаты пробития пластин для разных линз. Наименьшие диаметры отверстий наблюдаются при использовании линзы с фокусным расстоянием 9 см, а линзы с фокусными расстояниями 2,3 см и 5 см демонстрируют промежуточные результаты. Это свидетельствует о том, что выбор фокусирующей линзы существенно влияет на распределение энергии лазерного излучения.

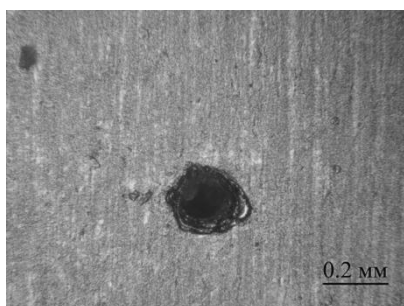


Рисунок 1 – Входное отверстие, сделанное с помощью линзы с фокусным расстоянием 2,3 см

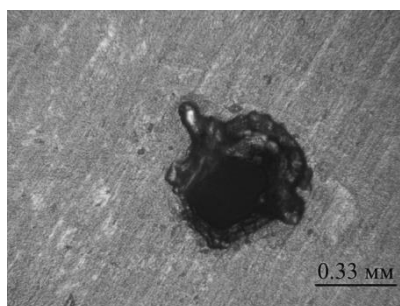


Рисунок 2 – Входное отверстие, сделанное с помощью линзы с фокусным расстоянием 4,5 см

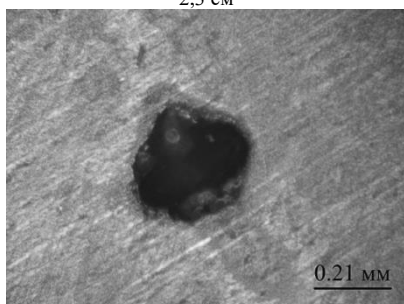


Рисунок 3 – Входное отверстие, сделанное с помощью линзы с фокусным расстоянием 5 см



Рисунок 4 – Входное отверстие, сделанное с помощью линзы с фокусным расстоянием 9 см

В ходе исследований было замечено, что качество краёв входных отверстий (минимальная зона термического влияния) лучше всего при использовании линзы с фокусным расстоянием 5 см (см. рисунки 1-4). Применение линз с меньшим фокусным расстоянием ухудшает результат из-за увеличения зоны термического влияния высокой плотности энергии. В то же время использование линз с фокусным расстоянием 9 см существенно снижает качество краёв из-за расфокусировки луча и уменьшения плотности энергии. Таким образом, линзы с фокусным расстоянием 5 см являются оптимальными для достижения высокого качества обработки стальной пластины.

В таблице 1 и 2 представлены результаты и условия лазерной сверления отверстий. Здесь N – номер отверстия; l – расстояние от главной плоскости линзы до пластины; n – количество импульсов, необходимых для пробития сквозного отверстия; $d_{вх}$ – диаметр входного отверстия; $d_{вых}$ – диаметр выходного отверстия; f – фокусное расстояние линзы; «-» – обозначение отсутствия измеряемого параметра.

Таблица 1 – представление результатов и условий измерений лазерного сверления пластины для линз с фокусными расстояниями 2,3 см и 4,5 см

$f = 2,3 \text{ см}$					$f = 4,5 \text{ см}$				
N	$l, \text{ мм}$	n	$d_{вх}, \text{ мкм}$	$d_{вых}, \text{ мкм}$	N	$l, \text{ мм}$	n	$d_{вх}, \text{ мкм}$	$d_{вых}, \text{ мкм}$
1	30	6	270	80	1	10	6	330	140
2		4	200	80	2		6	315	150
3		4	230	90	3		5	305	120
4		12	255	50	4		7	280	100
5		18	270	120	5		5	320	100
6	29	8	230	60	6	10,51	10	320	90
7		10	260	70	7		6	320	60
8		6	230	70	8		6	300	55
9		9	230	60	9		4	260	110
10		14	200	65	10		4	250	130
11	29,5	21	180	70	11	10,59	9	265	130
12		25	130	60	12		5	270	105
13		18	160	70	13		7	270	110
14		19	170	50	14		5	230	130
15		17	150	90	15		5	270	100

Таблица 2 – представление результатов и условий измерений лазерного сверления пластины для линз с фокусными расстояниями 5 см и 9 см

f = 5 см					f = 9 см				
N	l, мм	n	d _{вх} , МКМ	d _{вых} , МКМ	N	l, мм	n	d _{вх} , МКМ	d _{вых} , МКМ
1	5,6	24	270	60	1	10	7	250	85
2		7	270	130	2		6	220	50
3		18	300	80	3		6	220	90
4		14	270	50	4		6	200	80
5		7	300	70	5		5	200	90
6	5,3	12	240	90	6	10,51	6	130	-
7		5	220	55	7		6	130	-
8		9	210	80	8		4	100	70
9		6	280	70	9		5	100	-
10		13	250	50	10		8	100	50
11	5,4	10	210	70	11	10,59	7	90	-
12		6	180	70	12		12	90	-
13		10	180	115	13		5	80	-
14		8	180	75	14		7	85	50
15		8	190	75	15		7	100	-

На основе полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости диаметров входных и выходных отверстий от количества импульсов для различных линз (см. рисунки 5- 8). Проанализировав их, можно заметить, что линза с фокусным расстоянием 2,3 см менее эффективна для лазерного сверления, так как для пробития стальной пластины толщиной $0,68 \pm 0,01$ мм потребовалось наибольшее количество импульсов. В то же время использование линз с фокусными расстояниями 4,5 см и 9 см обеспечило более быстрое пробитие.



Рисунок 5 – График зависимости диаметра отверстия от количества импульсов для линзы с фокусным расстоянием 2,3 см

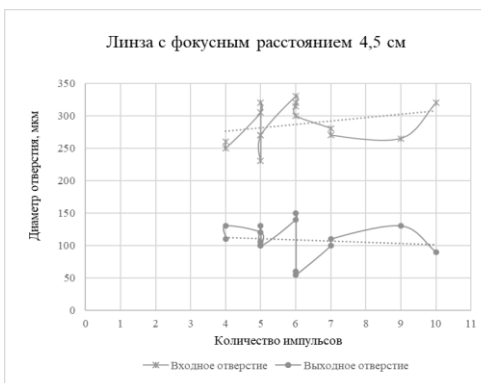


Рисунок 6 – График зависимости диаметра отверстия от количества импульсов для линзы с фокусным расстоянием 4,5 см



Рисунок 7 – График зависимости диаметра отверстия от количества импульсов для линзы с фокусным расстоянием 5 см

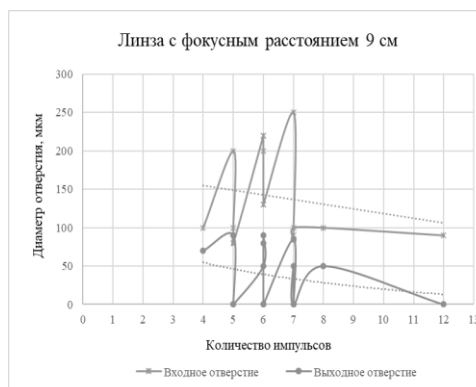


Рисунок 8 – График зависимости диаметра отверстия от количества импульсов для линзы с фокусным расстоянием 9 см

Обсуждение

Таким образом, подводя итоги нашего исследования влияния фокусного расстояния линзы на процесс сверления пластины из стали SK-5 твердотельным лазером были получены важные результаты, позволяющие прийти к выводам о зависимости параметров обработки материала от выбора фокусного расстояния.

Экспериментально установлено, что скорость пробития стальной пластины возрастает линейно с увеличением фокусного расстояния линзы. Данный факт подтверждается тем, что для линз с фокусными расстояниями 4,5 и 9 см обеспечивают более быстрое пробитие по сравнению с линзой 2,3 см, для которой потребовалось наибольшее количество импульсов. Это объясняется улучшением распределением энергии лазерного излучения при увеличении фокусного расстояния.

Линза с фокусным расстоянием 2,3 см оказалась наименее эффективной для данной задачи, так как высокая концентрация энергии на малой площади приводит к локальному перегреву и требует большего количества импульсов для пробития. Линза с фокусным расстоянием 4,5 см является наиболее эффективной для задач, требующих быстрого пробития и получения отверстий с большим диаметром. Линза с фокусным расстоянием 5 см оптимальна для достижения высокого качества обработки, включая минимальную зону термического влияния и точность краёв отверстий.

Результаты исследования влияния фокусного расстояния линзы на лазерное сверление стальной пластины показали, что оптимизация данного параметра критически важна для достижения требуемых характеристик отверстий. Полученные данные позволяют сделать вывод о необходимости тщательного подбора фокусирующей линзы в зависимости от конкретных задач лазерного сверления.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Попов Е. Э.

Библиографический список

1. Люхтер А.Б., Скворцов К. В., Вознесенская А. А., Ежов А. С., Бекетов А. А. Поиск решений по перфорированию микроотверстий в хромистых и хромоникелевых сталях // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2016. - №6.
2. ZHANG Hongyu, DI Jianke, ZHOU Ming, YAN Yu A Comparison in Laser Precision Drilling of Stainless Steel 304 with Nanosecond and Picosecond Laser Pulses // Chinese journal of mechanical engineering. - 2014. - №5. - С. 972-977.
3. Yuwen Zhang Effect of focal position on the geometry of laser-drilled holes // Optics & Laser Technology. - 2018.
4. Matti Manninen, Marika Hirvimäki, Ville-Pekka Matilainen, Antti Salminen Comparison of Laser-Engraved Hole Properties between Cold-Rolled and Laser Additive Manufactured Stainless Steel Sheets // Applied Sciences. - 2017. - №7.
5. Ganesh Dongre, Avadhoot U Rajurkar, Ramesh Gondil Effect of Change in Focal Plane Position on Hole Characteristics of Nanosecond Pulsed Laser Micro Drilled Holes // Recent Trends in Mechanical Engineering. - 2020. - С. 169-176.
6. Yuwen Zhang Effects of Beam Size and Pulse Duration on the Laser Drilling Process // American Society of Mechanical Engineers. - 2016. - №2.
7. Kuar A.S., Doloi B., Bhattacharyya B. Modelling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia (ZrO₂) // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 2005. - №46. - С. 1301-1310.
8. Vahid Nasrollahi, Pavel Penchev, Tahseen Jwad, Stefan Dimov, Kyunghan Kim, Changmin Im Drilling of micron-scale high aspect ratio holes with ultra-short pulsed lasers: Critical effects of focusing lenses and fluence on the resulting holes' morphology // Optics and Lasers in Engineering. - 2018. - №110. - С. 315-322.
9. Ranjib Biswas, A. S. Kuar, Sampad Biswas, Souren Mitra Effects of Process Parameters on Hole Circularity and Taper in Pulsed Nd:YAG Laser Microdrilling of Tin-Al₂O₃ Composites // Materials and Manufacturing Processes. - 2010. - №25. - С. 503-514.
10. P. Deepu, T. Jagadesh A review on short and ultrashort pulsed laser microdrilling: materials, mechanism, methods, and applications // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. - 2024. - №46.
11. Y.H. Liu, J.D. Hu, L. Zhao, Z.X. Guo, A.N. Chumakov, N.A. Bosak Accumulation morphology on the surface of stainless steel irradiated by a nanosecond Nd:YAG pulsed laser // Optics & Laser Technology. - 2009. - №42. - С. 647-652.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ВЫХОДНОГО ЗЕРКАЛА НА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ КПД ЛАЗЕРА

С.С. Макарин, Д.А. Гацко, М.М. Соловьёв

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Введение:

На сегодняшний день использование твердотельных лазеров, в частности с активной средой Nd:YAG, очень распространено во многих сферах промышленности, медицины, науки и т.д. [1]. В качестве примеров можно привести применения для таких способов использования, как лазерная сварка, лазерное сверление отверстий, QSNYL-терапия, спектроскопия, LJSCH и многих других [2, 9, 10].

Одной из основных проблем лазеров был и остаётся низкий коэффициент полезного действия, который зависит в том числе и от зеркал, используемых в резонаторе [3]. В нашем случае использовался резонатор Фабри-Перо, состоящий из двух плоскопараллельных зеркал: опорное и выходное [8]. Для опорного зеркала коэффициент отражения оставался неизменным в течение всего эксперимента и стремился к 100%. А в качестве выходного зеркала мы последовательно использовали семь зеркал с различными коэффициентами отражения.

Объектом нашего исследования стала зависимость дифференциального КПД лазера от коэффициента отражения выходного зеркала.

Методы:

Чтобы решить данную задачу нам было необходимо измерить коэффициент отражения используемых зеркал. Для этого мы использовали 2 различных метода:

1. Многократное измерение спектра пропускания зеркал при помощи спектрометра «AvaSpec-2048» на диапазоне длин волн от 200 нм до 1300 нм, нахождение коэффициента пропускания на интересующей нас длине волны ($\lambda = 1064$ нм) и усреднение данных значений для каждого зеркала.

2. Измерение энергии в импульсе с помощью прибора «OPHIR VEGA» и датчика «OPHIR PE50BF-DIF» без зеркала и с зеркалом, помещённым между выходным зеркалом и датчиком.

Таблица 3 – результаты измерения коэффициентов отражения зеркал

№ зеркала	Результат эксперимента 1	Результат эксперимента 2	Итоговое значение
1	53	49	53
2	73	70	70
3	89	93	89
4	62	64	64
5	42	44	42
6	59	21	21
7	94	96	94

Далее, для вычисления дифференциального КПД лазера, мы подставляли последовательно зеркала как выходные в экспериментальную установку (рисунок 1) и, постепенно повышая мощность источника, считываем энергию импульса [5]:

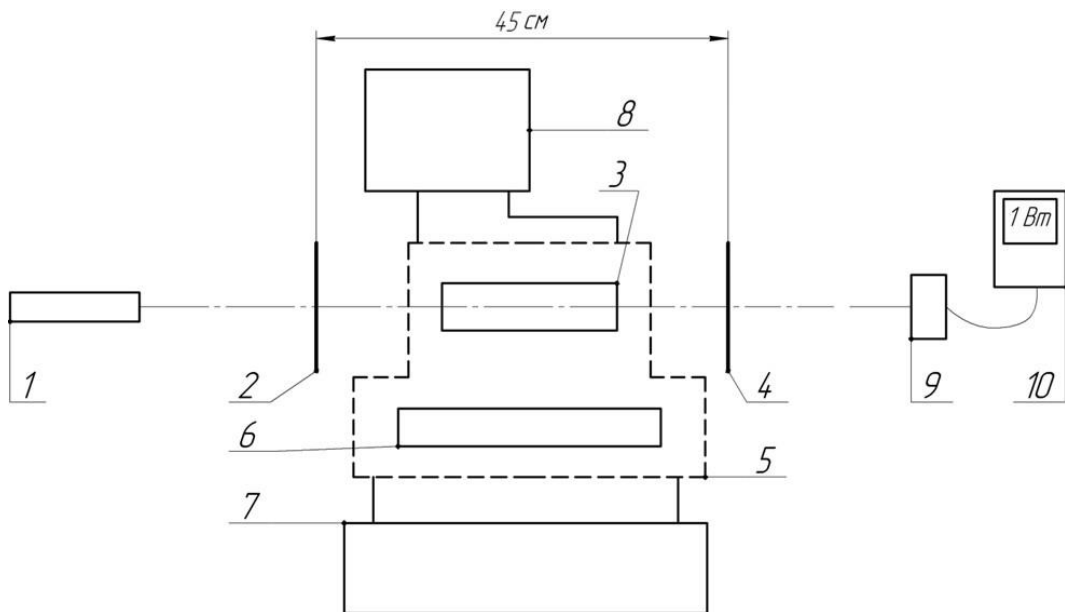


Рисунок 9 – Схема экспериментальной установки

где:

1. Юстировочный лазер;

2. Опорное зеркало;
3. Активный элемент (Nd:YAG);
4. Выходное зеркало;
5. Квантрон;
6. Лампа накачки;
7. Блок питания накачки (FEDAL Model SF 134);
8. Система охлаждения (S&A CW-6100);
9. Датчик измерения мощности (OPHIR PE50BF-DIF);
10. Измеритель мощности (OPHIR VEGA).

После мы аппроксимируем полученные данные и получаем прямую зависимость выходной энергии от входной для каждого из зеркал (рисунки 2 и 3):

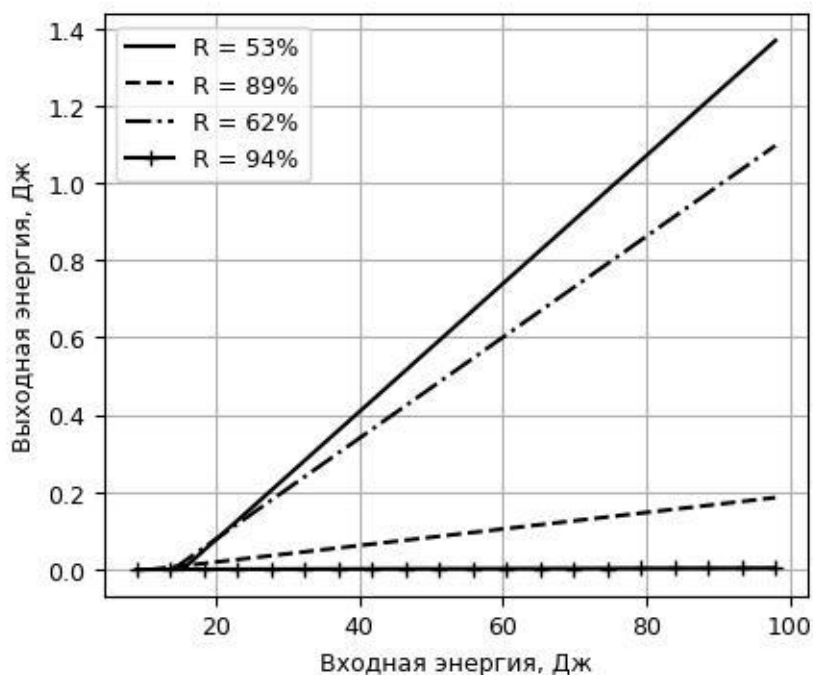


Рисунок 10 – Зависимость энергии импульса от энергии накачки

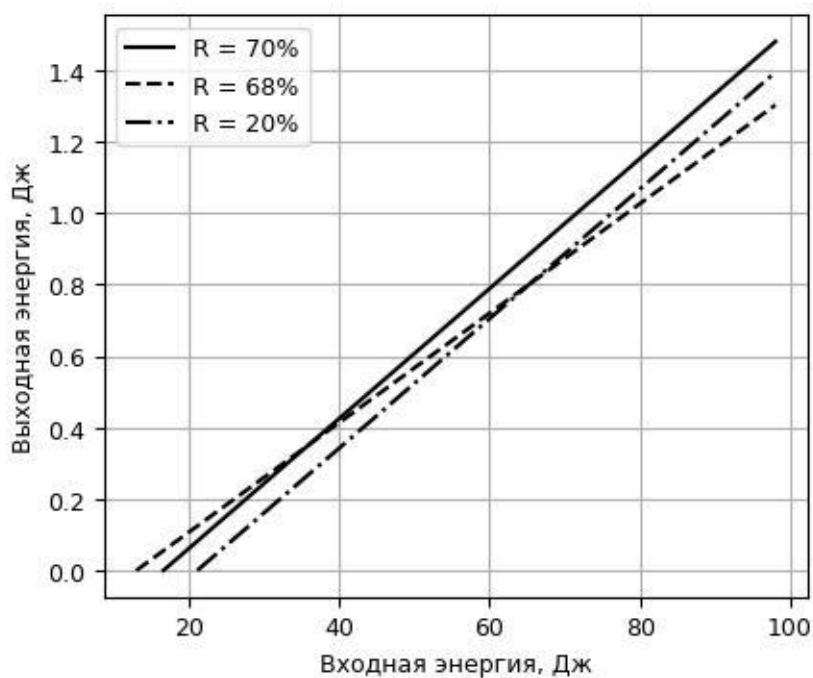


Рисунок 11 – Зависимость энергии импульса от энергии накачки

Результаты:

Исходя из зависимостей, приведённых выше, мы можем получить значение КПД для каждого из выходных зеркал, как производные получившихся прямых (тангенс угла наклона) [4]:

Таблица 4 – значение КПД в зависимости от коэффициента отражения выходного зеркала

№ зеркала	Коэффициент отражения, %	КПД, %
1	53	1,7
2	70	1,8
3	89	0,2
4	62	1,3
5	68	1,5
6	20	1,8
7	94	0,004

Далее необходимо привести график (рисунок 4) данной зависимости для более наглядного представления результатов эксперимента:

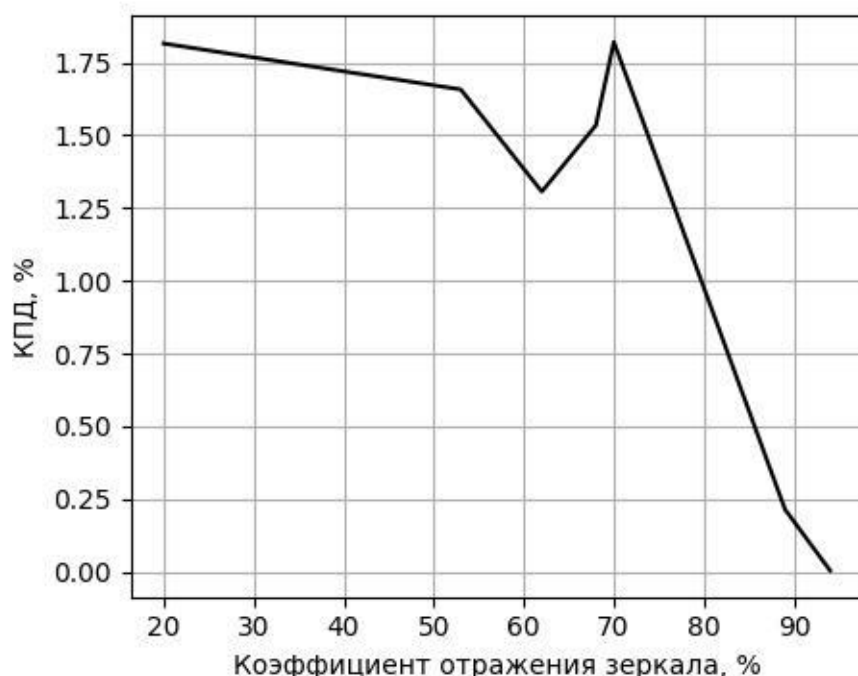


Рисунок 12 – График зависимости КПД от коэффициента отражения выходного зеркала

Основываясь на данном графике, мы можем сказать, что для лазера с активной средой Nd:YAG, широкополосной ламповой накачкой, жидкостным охлаждением и резонатором Фабри-Перо наиболее предпочтительным коэффициентом отражения выходного зеркала будет значение около 70%.

Обсуждение:

Подводя итог проведённому эксперименту и материалу, изложенному выше, мы можем сделать вывод, что полученные нами данные не полностью сходятся с исследованиями, проводимыми ранее. Для выяснения причин данного несоответствия мы будем проводить дальнейшие исследования по данной теме [6, 7].

Научный руководитель – к.т.н., доцент Е.Э. Попов

Библиографический список

1. Едалина Д.И., Горячев Н.В., Кузина Е.А., Юрков Н.К. ЯВЛЕНИЕ ЛАЗЕРА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ [Электронный ресурс] // Elibrary; URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30068225_10480325.pdf (Дата обращения: 05.03.2025).
2. Костина М.В., Ворончук С.Д., Костина В.С. Высокопрочные сварные соединения азотсодержащей аустенитной стали, полученные лазерной сваркой... [Электронный ресурс] // Elibrary; URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35454421_17962014.pdf (Дата обращения: 07.03.2025).
3. В.С. Айрапетян, О.К. Ушаков Физика лазеров [Электронный ресурс] // <http://www.decoder.ru/media/file/0/378.pdf> (Дата обращения 06.03.2025)

4. Звелто О. Принципы лазеров // Пер. с англ. — М.: Лань. — 2008. С. 302-303
5. А.С. Борейшо, С.В. Ивакин Лазеры: устройство и действие // М.: Лань — 2017. С. 170 - 173
6. W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, [электронный ресурс] // Holography Forum https://www.holographyforum.org/data/pdf/aa-Collection_a_k/aa-Laser/Solid-State_Laser_Engineering.pdf, p. 137-139 (Дата обращения 07.03.2025)
7. Couture M., Piche. M., (1987). Resonator with variable-reflectivity output coupler. Applied optics, 26(13), 2510-1513
8. Маракин А.В., Томилов С. М., Тарабрин М.К., Лазарев В.А., Карасик В. Е. Моделирование зависимости спектрального коэффициента пропускания эталона Фабри-Перо по интенсивности от его конструктивных параметров [Электронный ресурс] // Elibrary; URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?pff=1&id=35454398> (Дата обращения 07.03.2025)
9. Ляндрес И.Г., Шкадаревич А.П., Какшинский И.А., Людчик Т.Б., Базык-Новикова О.М., Гурбанов Т.В. Полупроводниковый хирургический лазер для стоматологии, челюстнолицевой и мининвазивной хирургии: устройство и применение. [Электронный ресурс] // Elibrary; URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35454416_16268746.pdf (Дата обращения 07.03.2025)
10. Шиганов И.Н., Кулешов С.С. Выращивание деталей из алюминиевых сплавов лазерной объёмной наплавкой [Электронный ресурс] // Elibrary; URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35454422_50145089.pdf (Дата обращения 07.03.2025)

УДК 543.424.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДЕНОВИРУСА В ЖИДКИХ ОБРАЗЦАХ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНО УСИЛЕННОЙ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А.Т. Табаров^{1,3}, К. В. Пригода², А. А. Ермина²

¹. Университет ИТМО

². Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе

³. ФГБОУ ВО СПбГПМУ Минздрава России

Метод SERS (поверхностно-усиленное комбинационное рассеяние света) активно развивается как технология для детектирования различных веществ и находит широкое применение в таких областях, как химия, биология и медицина. Важнейшим элементом устройств, функционирующих на основе SERS, являются подложки, которые существенно влияют на повышение чувствительности и разрешающей способности спектров [1-4].

Характеризация подложек представляет собой ключевой этап в разработке устройств, основанных на методе SERS, поскольку их структура и химический состав оказывают значительное влияние на результаты измерений [4,5]. Морфология, размер частиц и тип материалов, используемых для создания подложек, играют решающую роль в усилении рамановского сигнала, что напрямую определяет чувствительность и точность метода [6,7]. Поэтому детальное исследование этих параметров позволяет не только оптимизировать экспериментальные условия, но и повысить воспроизводимость и достоверность получаемых данных.

Совершенствование технологий производства и анализа подложек является важным направлением в развитии SERS, что подтверждается многочисленными исследованиями, посвященными их разработке и практическому применению [8-12]. В частности, значительный интерес вызывает использование SERS в медицинской диагностике, особенно в условиях пунктов оказания медицинской помощи. Этот подход позволяет проводить быстрый и точный анализ биологических образцов, что делает его перспективным инструментом для ранней диагностики заболеваний и мониторинга состояния пациентов [13]. Таким образом, дальнейший прогресс в области SERS тесно связан с улучшением методов создания и характеристики подложек, а также с расширением их практического применения в различных научных и медицинских областях.

Идентификация конкретного вируса, вызывающего заболевание, играет критически важную роль по нескольким причинам. Во-первых, точное определение вирусного патогена позволяет установить корректный диагноз, что является основой для выбора оптимальной терапевтической стратегии, предотвращения осложнений и учета индивидуальных особенностей пациента. Во-вторых, обнаружение конкретного вируса способствует мониторингу эпидемиологических вспышек, анализу путей распространения инфекции и оценке потенциальных рисков для общественного здоровья. Это становится особенно актуальным в условиях пандемий, когда оперативное выявление возбудителя необходимо для принятия своевременных мер по сдерживанию инфекции. В связи с этим, метод SERS-спектроскопии активно исследуется как перспективный инструмент для диагностики вирусных инфекций. Ряд научных работ демонстрирует его потенциал для быстрого и точного обнаружения вирусов, что подтверждается исследованиями, посвященными применению SERS в этой области [14-21].

Аденовирусы относятся к группе вирусов, способных вызывать у человека разнообразные заболевания, такие как респираторные инфекции, гастроэнтерит, конъюнктивит и другие патологии [22]. Быстрая и точная идентификация аденовирусов играет ключевую роль в своевременной диагностике, лечении и предотвращении эпидемических вспышек. Актуальность разработки методов обнаружения аденовирусов обусловлена рядом факторов. Во-первых, аденовирусные инфекции имеют глобальное распространение и характеризуются высокой скоростью передачи в замкнутых коллективах, таких как образовательные учреждения, медицинские стационары и военные объекты [23]. Во-вторых, хотя большинство случаев аденовирусных инфекций протекают в легкой форме, они

могут приводить к тяжелым осложнениям у уязвимых групп населения, включая детей раннего возраста, пожилых людей и лиц с иммунодефицитными состояниями [24].

Кроме того, аденовирусы способны вызывать широкий спектр клинических проявлений, что затрудняет их диагностику исключительно на основе симптоматики [25]. Симптомы аденовирусной инфекции часто схожи с проявлениями других вирусных заболеваний, что подчеркивает необходимость использования точных методов идентификации возбудителя. Эффективное обнаружение аденовирусов также важно для мониторинга их циркуляции в популяции и предотвращения эпидемических вспышек [26]. Наконец, разработка и оценка новых терапевтических подходов и вакцин против аденовирусов требуют применения высокоточных методов диагностики [27].

Спектроскопический метод, такой как SERS, позволяет обнаруживать низкие концентрации вирусов [18]. SERS в сочетании с машинным обучением является многообещающим подходом, который может преодолеть ограничения существующих методов и обеспечить быструю и точную диагностику. В этой статье мы демонстрируем подложки SERS на основе серебряных дендритов на кремниевой пластине и исследуем влияние подложки SERS на результат классификации биологических образцов с помощью алгоритмов машинного обучения.

Исследование проводилось в несколько этапов, каждый из которых был направлен на достижение конкретных целей.

На первом этапе для точного выбора подложки, подходящей для конкретного биологического образца, был измерен размер вирусных частиц с использованием метода малоуглового рассеяния. Этот подход обеспечил высокую точность определения размеров частиц, что сыграло ключевую роль в выборе наиболее подходящей подложки для последующих исследований.

На втором этапе были изготовлены и охарактеризованы подложки, которые стали основой для дальнейших экспериментов. Эти подложки были тщательно изучены для определения их физических и химических свойств, что позволило выбрать оптимальные условия для взаимодействия с биологическими образцами.

На третьем этапе были измерены и обработаны спектры SERS биологических образцов на созданных подложках. Полученные спектры позволили провести детальный анализ и классификацию образцов, что открывает возможность обнаружения аденовирусов на основе SERS спектров.

Аденовирусы культивировали в клеточной линии A-549 (ATCC). Затем образцы, содержащие вирус, инактивировали с использованием бета-пропиолактона (объемное соотношение 1:1000). Эффективность инактивации аденовирусов оценивали путем трех последовательных пассажей инактивированного вируса в культурах клеток A-549, контролируя отсутствие характерных цитопатических эффектов (ЦПЭ).

Образцы вирусов измеряли методом малоуглового рассеяния. Метод SAXS позволяет определить размер, форму и структуру сложных биологических молекул. Преимущество этого метода заключается в том, что исследуемый образец находится в естественной биологической среде и не подвергается конформационным изменениям, что крайне важно при работе с вирусами. В настоящее время известен диапазон размеров аденовируса (70–90 нм), однако этой информации недостаточно для создания SERS-подложек. Для улучшения адсорбционных свойств подложек и усиления рамановского сигнала крайне важно определить средние размеры вирусных частиц. Анализ функций распределения расстояний позволил уточнить размер частицы аденовируса, который составил 82 ± 2 нм. Этот размер попадает в ранее известный диапазон значений: 70–90 нм.

В качестве основы для формирования дендритных структур серебра использовали монокристаллический кремний (c-Si) p-типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом·см, легированный бором, с кристаллографической ориентацией (111). Кремниевые пластины подвергали стандартной промывке RCA (Radio Corporation of America), после чего помещали в раствор 0,02 M $\text{AgNO}_3 + 5$ M HF (соотношение объемов 5:1). В этом растворе происходило восстановление серебра на поверхности кремниевой пластины, и в процессе реакции гальванического замещения (GDR) формировались дендритные наноструктуры Ag. Для создания дендритных структур различной морфологии время обработки в растворе варьировали от 40 до 90 секунд при комнатной температуре. В данной работе была создана большая серия образцов с высотой серебряных дендритов от ~300 до ~1000 нм. Для определения оптических характеристик структур, а именно для измерения зеркального отражения наших подложек, было решено провести измерения на трех выбранных образцах: мы взяли две крайние средние границы по высоте структур, а именно ~300 (D1) и ~1000 (D3) нм, а также некоторое медианное значение высоты структуры ~600 (D2) нм. Это было сделано для того, чтобы проследить тенденцию изменения поведения спектра зеркального отражения в зависимости от увеличения толщины исследуемой структуры. В качестве контрольного образца использовалась коммерческая подложка от компании SERSetive.

Измерения комбинационного рассеяния света (Рамана) и SERS проводились с использованием спектрометра Labram HR800 (HORIBA, Франция), оснащенного лазером с длиной волны 633 нм. Использовалась дифракционная решетка с 600 линиями/мм, а для фокусировки лазерного луча на поверхность образца в пятно диаметром примерно 1 мкм применялся объектив Olympus 100× (NA = 0,9). Мощность лазера на поверхности образца составляла 14 мкВт, а время накопления для каждого спектра — 2 секунды. Спектры анализируемых веществ собирались с области размером 30×40 мкм с шагом 0,5 мкм в высушенной капле на исследуемых образцах. В результате удалось получить 1736 спектров для каждого образца.

Для классификации спектров аденовируса в буферном растворе и спектров чистого буферного раствора, полученных на различных подложках, использовались алгоритмы машинного обучения. Для анализа спектральных данных и разработки модели классификации применялся язык

программирования Python вместе с набором специализированных библиотек. Библиотека scikit-learn предоставила инструменты для построения и оценки модели машинного обучения, включая RandomForestClassifier для реализации алгоритма случайного леса, а также функцию кросс-валидации. Предобработка данных включала стандартизацию признаков с использованием StandardScaler.

Для повышения качества спектральных данных применялись методы предобработки. Во-первых, коррекция базовой линии: линейная базовая линия рассчитывалась и вычиталась из каждого спектра. Во-вторых, нормализация: каждый спектр нормализовался путем деления на его максимальное значение, что позволило привести все спектры к единому уровню интенсивности. В-третьих, обрезка спектров: спектральные данные обрезались на основе предварительного анализа, который показал, что наиболее информативная область спектра лежит в диапазоне от 800 см^{-1} до 1000 см^{-1} . Без обрезки классификация основывалась бы на различиях в интенсивности пиков, связанных с буферной средой, что приводило бы к неточным результатам. Это было определено с помощью анализа важности признаков с использованием алгоритма RandomForestClassifier. Таким образом, спектры были обрезаны до этого диапазона для дальнейшего анализа.

Таблица 1. Результаты классификации чистого буфера и буфера с аденовирусом с использованием алгоритма случайного леса.

Характеристика	SERSitive	Образец D1	Образец D2	Образец D3
Точность классификации (%)	76.1	92.6	80.6	72.8
Ошибка классификации (%)	2.5	0.7	2.3	2.5
Ложноположительные (%)	29.2	13.9	27.8	23.1
Ложноотрицательные (%)	18.9	1.3	11.5	31.0

Применение алгоритма случайного леса для классификации спектров аденовируса в буферном растворе и буферного раствора без вируса дало следующие результаты (Таблица 1). Для классификации использовался набор данных из 3472 спектров: 1736 спектров чистого буфера и 1736 спектров буфера, содержащего частицы аденовируса. 70% спектров использовались для обучения алгоритма случайного леса, а 30% спектров — для валидации. Наивысшая точность классификации была достигнута для образца подложки D1. Ошибка точности рассчитывалась как стандартное отклонение значений точности, полученных в ходе кросс-валидации. На рисунке 1 представлен пример матрицы неточностей классификации спектров для каждого образца.

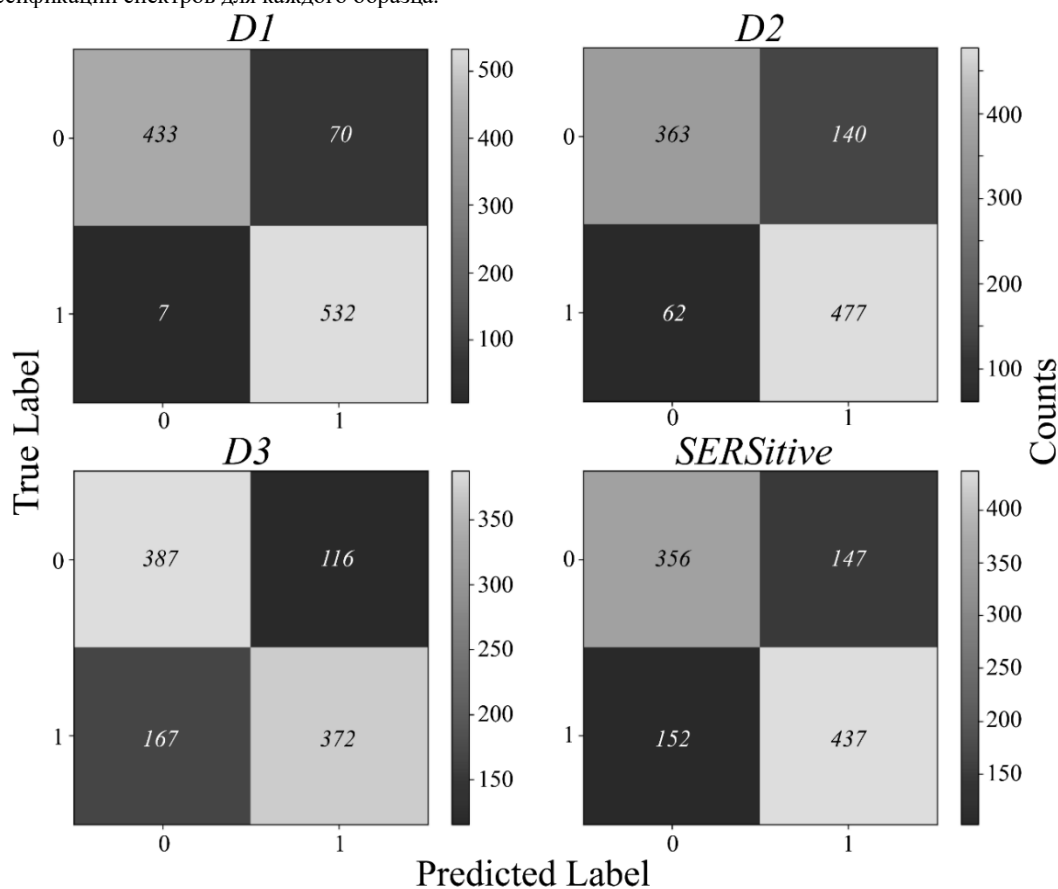


Рисунок 1. Матрица неточностей показывает количество истинно положительных (0;0), ложноположительных (1;0), ложноотрицательных (0;1), истинно отрицательных результатов (1;1). В каждой ячейке указано количество спектров.

Эти результаты демонстрируют высокую эффективность предложенного метода обнаружения аденовируса с использованием поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии и алгоритма случайного леса на различных подложках. Однако наилучшие результаты показал образец подложки D1 с серебряными дендритными структурами высотой ~300 нм. Наблюдается увеличение точности по мере приближения размера структуры к размеру вируса.

Научный руководитель – к.т.н., доцент В.В. Виткин

Библиографический список

1. J.P. Li, F. Long, W. Chen, J. Chen, P.K. Chu, H. Wang, Fundamentals and applications of surface-enhanced Raman spectroscopy-based biosensors, *Curr. Opin. Biomed. Eng.* 13 (2020) 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2019.08.008>.
2. X. Wang, S.-C. Huang, S. Hu, S. Yan, B. Rene, Fundamental understanding and applications of plasmon-enhanced Raman spectroscopy, *Nat. Rev. Phys.* 2 (5) (2020) 253–271. <https://doi.org/10.1038/s42254-020-0171-y>.
3. R.R. Jones, D.C. Hooper, L. Zhang, D. Wolverson, V.K. Valev, 2019. Raman techniques: fundamentals and frontiers. *Nanoscale Res. Lett.* 14, 231. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-3039-2>.
4. T. Itoh, M. Procházka, Z.-C. Dong, W. Ji, Y.S. Yamamoto, Y. Zhang, Y. Ozaki, Toward a new era of SERS and TERS at the nanometer scale: From fundamentals to innovative applications, *Chem. Rev.* 123 (4) (2023) 1552–1634. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00316>.
5. Y. Zhao, A. Kumar, Y. Yang, Unveiling practical considerations for reliable and standardized SERS measurements: lessons from a comprehensive review of oblique angle deposition-fabricated silver nanorod array substrates, *Chem. Soc. Rev.* 53 (2024) 1004–1057. <https://doi.org/10.1039/D3CS00540B>.
6. Á.I. López-Lorente, 2021. Recent developments on gold nanostructures for surface enhanced Raman spectroscopy: Particle shape, substrates and analytical applications. A review. *Anal. Chim. Acta.* 1168, 338474. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338474>.
7. V. Shvalya, G. Filipič, J. Zavašnik, I. Abdulhalim, U. Cvelbar, 2020. Surface-enhanced Raman spectroscopy for chemical and biological sensing using nanoplasmonics: The relevance of interparticle spacing and surface morphology. *Appl. Phys. Rev.* 7 (3), 031307. <https://doi.org/10.1063/5.0015246>.
8. M. Fan, G.F.S. Andrade, A.G. Brolo, A review on the fabrication of substrates for surface enhanced Raman spectroscopy and their applications in analytical chemistry, *Anal. Chim. Acta.* 693 (1–2) (2011) 7–25. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.03.002>.
9. P.A. Mosier-Boss, 2017. Review of SERS substrates for chemical sensing. *Nanomaterials.* 7 (6), 142. <https://doi.org/10.3390/nano7060142>.
10. A. Mukherjee, F. Wackenhut, A. Dohare, A. Homeber, A. Lorenz, H. Mühler, A.J. Meixner, H.A. Mayer, M. Brecht, Three-dimensional (3D) surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) substrates: fabrication and SERS applications, *J. Phys. Chem. C.* 127 (28) (2023) 13689–13698. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c02410>.
11. K. Vilkevičius, I. Ignatjev, A. Selskis, G. Niaura, E. Stankevičius, Tuning SERS performance through the laser-induced morphology changes of gold nanostructures, *Appl. Surf. Sci.* 660 (2024) 160003. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160003>.
12. E. Stankevičius, E. Daugnoraitė, I. Ignatjev, Z. Kuodis, G. Niaura, G. Račiukaitis, Concentric microring structures containing gold nanoparticles for SERS-based applications, *Appl. Surf. Sci.* 497 (2019) 143752. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143752>.
13. X. Liu, J. Guo, Y. Li, B. Wang, S. Yang, W. Chen, X. Wu, J. Guo, X. Ma, SERS substrate fabrication for biochemical sensing: Towards point-of-care diagnostics, *J. Mater. Chem. B.* 9 (40) (2021) 8378–8388.
14. A. Tabarov et al., 2022. Detection of A and B influenza viruses by surface-enhanced Raman scattering spectroscopy and machine learning. *Biosensors.* 12 (12), 1065. <https://doi.org/10.3390/bios12121065>.
15. O. Andreeva et al., 2024. Comparison of SERS spectra of intact and inactivated viruses via machine learning algorithms for the viral disease's diagnosis application. *Photonics Nanostructures: Fundam. Appl.* 61, 101290. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2024.101290>.
16. K. Prigoda et al., 2024. Dendritic Ag@ c-Si structure for influenza a virus detection by SERS and machine learning. *Opt. Mater.* 149, 114977. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.114977>.
17. A.T. Tabarov et al., 2024. Influenza A Virus Detection via Ag@ c-Si SERS and Machine Learning. *International Conference Laser Optics (ICLO).* 570. <https://doi.org/10.1109/ICLO59702.2024.10624285>.
18. J. S.-C. Luo, K. Sivashanmugan, J.-D. Liao, C.-K. Yao, H.-C. Peng, Nanofabricated SERS-active substrates for single-molecule to virus detection in vitro: A review, *Biosens. Bioelectron.* 61 (2014) 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.05.013>.
19. Chen H. et al., 2020. SERS imaging-based aptasensor for ultrasensitive and reproducible detection of influenza virus A. *Biosens. Bioelectron.* 167, 112496. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112496>.
20. J. Neng, M.H. Harpster, W.C. Wilson, P.A. Johnson, Surface-enhanced Raman scattering (SERS) detection of multiple viral antigens using magnetic capture of SERS-active nanoparticles, *Biosens. Bioelectron.* 41 (2013) 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2012.08.048>.
21. J. Xia, W. Li, M. Sun, H. Wang, 2022. Application of SERS in the Detection of Fungi, Bacteria and Viruses. *Nanomaterials.* 12 (20), 3572. <https://doi.org/10.3390/nano12203572>.
22. T. Lion, Adenovirus infections in immunocompetent and immunocompromised patients, *Clin. Microbiol. Rev.* 27 (3) (2014) 441–462. <https://doi.org/10.1128/cmr.00116-13>.
23. B. Ghebremedhin, Human adenovirus: Viral pathogen with increasing importance, *Eur. J. Microbiol. Immunol.* 4 (1) (2014) 26–33. <https://doi.org/10.1556/eujmi.4.2014.1.2>.
24. J.P. Lynch, A.E. Kajon, Adenovirus: Epidemiology, global spread of novel serotypes, and advances in treatment and prevention, *Semin. Respir. Crit. Care Med.* 37 (4) (2016) 586–602. <https://doi.org/10.1055/s-0036-1584923>.
25. [25] M. Echavarria, Adenoviruses in immunocompromised hosts, *Clin. Microbiol. Rev.* 21 (4) (2008) 704–715. <https://doi.org/10.1128/cmr.00052-07>.
26. E. Hage, D. Huzly, T. Ganzenmueller, R. Beck, T.F. Schulz, A. Heim, A human adenovirus species B subtype 21a associated with severe pneumonia, *J. Infect.* 69 (5) (2014) 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2014.06.015>.
27. M.M.Y. Waye, C.W. Sing, Anti-viral drugs for human adenoviruses, *Pharmaceuticals.* 3 (10) (2010) 3343–3354. <https://doi.org/10.3390/ph3103343>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИРУСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Д.А. Крылов
Университет ИТМО

Данная работа посвящена уточнению размеров аденовируса с помощью метода Малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) и тесно связана с разработкой новых приборов для диагностики респираторных заболеваний, основанных на принципе поверхностно усиленной рамановской спектроскопии (SERS) [1].

Аденовирусы вызывают конъюнктивит, тонзиллит, отит, гастроэнтерит и инфекцию дыхательных путей. Аденовирусы имеют диаметр 70 – 90 нм [2]. Общая схема аденовируса приведена на Рис. 1

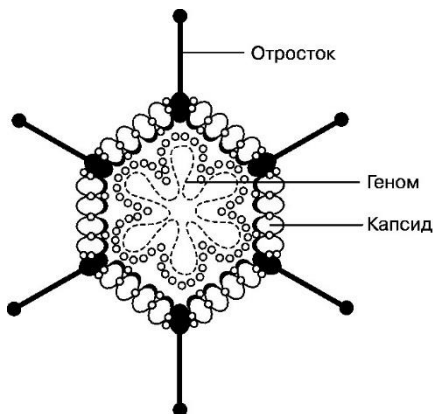


Рис. 1. Аденовирусы имеют форму икосаэдра с шипами в вершинах. Важно отметить, что количество поверхностных шипов у аденовируса невелико, поэтому потеря вирусом шипов в результате инактивации не приводит к сильной полидисперсности.

Преимущество метода МУРР перед другими методами состоит в том, что во время проведения малоуглового эксперимента вирусы пребывают в естественной жидкой среде (суспензии), следовательно, не претерпевают конформационных изменений, что крайне важно при работе с вирусами. Следует отметить, что оптическая микроскопия непригодна для изучения вирусов, так как свет в видимом диапазоне претерпевает дифракцию на нано-масштабных объектах. В то же время, электронная микроскопия, которая позволяет получать качественные фотографии вирусов, остаётся трудозатратным методом. Кроме того, в процессе подготовки образцов для изучения с помощью электронного микроскопа вирусы изымаются из жидкой среды, что может привести к изменению их формы и негативно сказаться на качестве результатов.

В ходе эксперимента МУРР рентгеновский луч рассеивается на образце и регистрируется детектором. Интегрирование двумерной картины рассеяния (рис. 2) даёт график $I(s)$ — зависимость интенсивности рассеянного излучения от модуля вектора рассеяния s [нм⁻¹]. Эта кривая содержит информацию о форме и размерах исследуемого объекта. Однако задача получения характеристик трёхмерного объекта по двумерной кривой, строго говоря, является некорректной. Поэтому вводятся дополнительные предположения, например, о форме образца.

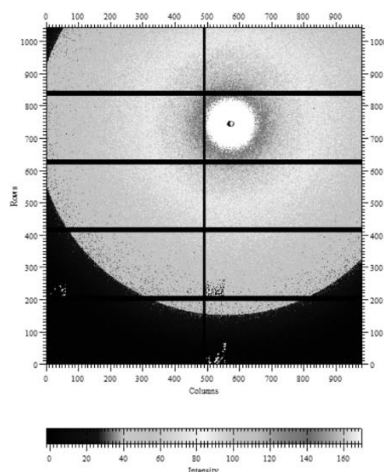


Рис. 2. Пример двумерной картины рассеяния, наблюдаемой на детекторе.

В качестве объекта исследования были представлены два штамма аденовирусов: аденовирус 6 типа штамм Tonsil-99 и аденовирус 26 типа штамм 415. Все 12 образцов были протестированы на наличие инфекционной активности на культуре клеток А-549. Инфекционный титр вируса из пробы равен нулю для всех образцов.

Для проведения измерений кривых малоуглового рентгеновского рассеяния инактивированных вирусных частиц использовались: линейный ускоритель, большое накопительное кольцо «Сибирь-2» и экспериментальная станция «БиоМУР» большого исследовательского комплекса «КИСИ-Курчатов» [3].

Основным источником информации о монодисперсных системах, состоящих из частиц одинаковой формы и одинакового размера, является функция парных расстояний (рис. 3) [4, 5]:

$$p(r) = \frac{r^2}{2\pi^2} \int_{s=s_{min}}^{s_{max}} s^2 I(s) \frac{\sin(sr)}{sr} ds$$

Данная функция является гистограммой количеств отрезков между каждыми двумя точками в интервале между r и $r + dr$ и распространяется на весь интервал $[0; D_{max}]$. В случае монодисперсных систем по графику функции парных расстояний можно судить о форме и размерах исследуемого объекта при условии $p(r) = 0, r > D_{max}$ [4, 5].

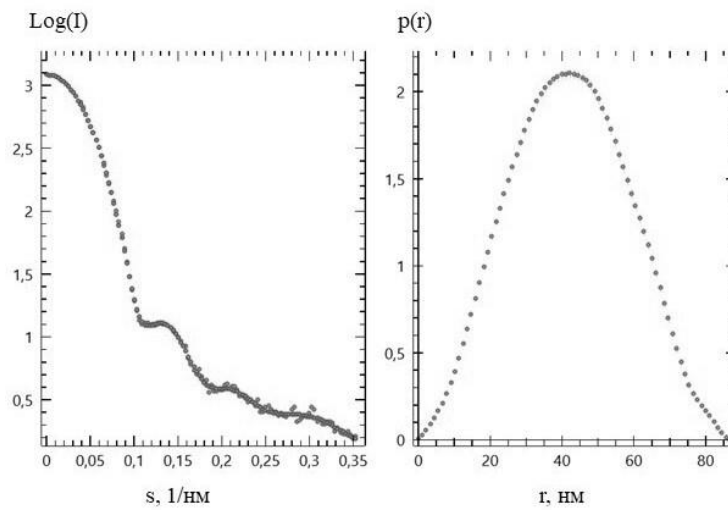


Рис. 3. Пример функции парных расстояний $p(r)$, построенный на основе кривой интенсивности рассеянного излучения $I(s)$. Колоколообразный вид функции $p(r)$ указывает на то, что исследуемые частицы по форме близки к сферическим.

Второй подход описывает системы из частиц одинаковой формы, но разного размера. Здесь интенсивность рассеяния определяется интегралом, учитывающим объемную функцию распределения частиц по размерам [4, 5]:

$$I(s) = \Delta\rho^2 \int_{R_{min}}^{R_{max}} D_v(R) V(R) i_0(sR) dR$$

где $i_0(sR)$ — форм-фактор частицы, т.е. нормированная интенсивность рассеяния частицей заданной формы ($i_0(0) = 1$), R_{min} и R_{max} — минимальный и максимальный размер частиц, соответственно. Анализ данных МУРР часто предполагает знание форм-фактора частицы, обычно используется сферическое приближение для изотропных систем. Определение функции распределения по размерам $D_v(R)$ (рис. 4) в таких случаях проводится с помощью косвенных преобразований. Однако, сферическое усреднение, вызванное хаотической ориентацией частиц, приводит к значительной потере информации о структуре. Реконструкция трёхмерных моделей из одномерных кривых МУРР — сложная и математически некорректная задача, часто приводящая к неоднозначным решениям [4, 5].

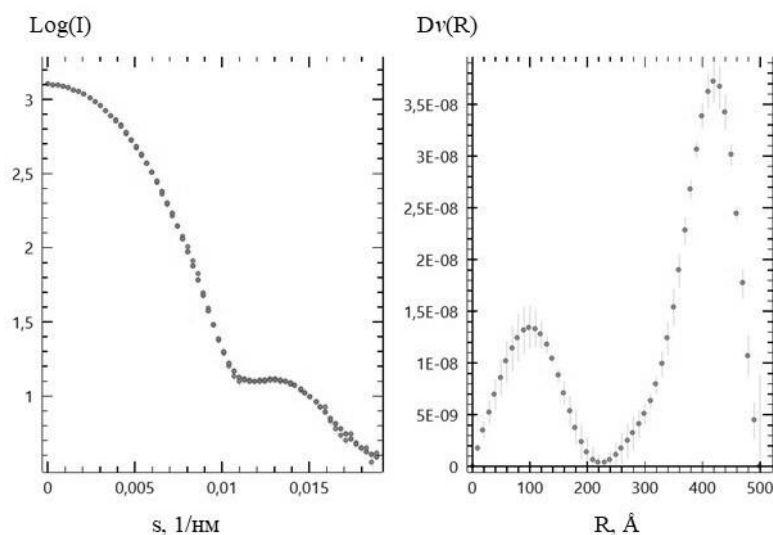


Рис. 4. Пример функции распределения по размерам $D_V(R)$, построенный на основе кривой интенсивности рассеянного излучения $I(s)$. Видны два характерных пика.

Как показывает практика, построение функции распределения по размерам требует значительного сокращения объема используемых данных и не предоставляет достаточной информации для анализа. Тем не менее, даже отдельные удачные графики $D_V(R)$ позволяют судить о размерах объектов в суспензии. Правый пик $D_V(R)$, очевидно, несёт информацию о размерах всей вирусной частицы, тогда как левый пик ассоциируется с более мелкими объектами, присутствующими в суспензии (ими могут быть как куски разрушенных культуральных клеток А-549, так и отделившиеся поверхностные шипы).

Результаты определения размера частиц аденовируса на основе анализа графика функции парных расстояний приведены в Таблице 1.

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D_{max} [нм]	87	87	86	82	82	83	87	88	84	85	83	83

Таким образом, средний размер аденовирусной частицы составляет 85 ± 3 нм. Это поможет в будущем создать селективные SERS-подложки с высоким коэффициентом усиления [6]. Важно отметить, что данный результат, полученный с использованием функции парных расстояний, соответствует результату, полученному с использованием функции распределения по расстояниям (84 нм), и укладывается в ранее известный диапазон размеров аденовируса (70 – 90 нм).

Научный руководитель — к. ф.-м. н., доцент В.В. Виткин

Библиографический список

1. Tabarov, A.T. et al. Detection of adenovirus using dendritic silver substrates combined with SERS and random forest algorithms. Applied Surface Science (2024)
2. Калинин, В. Л. Введение в молекулярную вирусологию. — СПб: СПбГТУ, 2002. — С. 120. — 301 с.
3. Peters G. S. et al. The small-angle X-ray scattering beamline BioMUR at the Kurchatov synchrotron radiation source //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – Т. 945. – С. 162616.
4. Д. И. Свергун, Э. В. Штыкова, В. В. Волков, Л. А. Фейгин. Рентгеновское малоугловое рассеяние, синхротронное излучение и структура био- и наносистем. Обзор. Кристаллография, 2011, том 56, № 5, с. 847–875.
5. Свергун Д. И., Фейгин Л. А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. — Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — С. 280.
6. Managò S. et al. Tailoring lab-on-fiber SERS optrodes towards biological targets of different sizes //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2021. – Т. 339. – С. 129321.

УДК 621.396.969.11

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО ШУМА НА ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОФОТОННЫХ РАДАРОВ

М.М. Ткачик

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Введение

Традиционные радары создаются на основе исключительно электронных технологий, которые сталкиваются с серьезными ограничениями вследствие узкой полосы пропускания, малого количества функций, низкой скорости работы и недостаточного разрешения, что затрудняет обнаружение и идентификацию целей в сложной электромагнитной обстановке. Для решения этих проблем в радары были внедрены технологии на основе фотоники. Благодаря широкой полосе пропускания, низким потерям при передаче, возможности многоканального мультиплексирования, быстрой аналоговой обработке сигналов и устойчивости к электромагнитным помехам, предоставляемых фотоникой, исполнение радаров в оптической области позволяет достичь лучших характеристик с точки зрения разрешения, обнаружения и скорости [1].

На пути к эффективному применению этих технологий стоят проблемы, связанные с воздействием фазового шума. Фазовый шум, проявляющийся как случайные флуктуации фазы сигнала, оказывает значительное влияние на чувствительность радиопотонных систем, что особенно важно в задачах обнаружения и отслеживания объектов на больших расстояниях. При высоком уровне шума в спектре сигналов возникают сложности с выделением слабых обратных сигналов, что непосредственно снижает дальность обнаружения и точность измерений [2].

Опико-электронное преобразование

В традиционных радарных системах микроволновые сигналы или сигналы промежуточной частоты распространяются и обрабатываются в электрической области с помощью электронных компонентов. Для того, чтобы воспользоваться преимуществами фотоники, в систему интегрируются широкополосные электронно-оптические и опико-электронные преобразователи так, чтобы сигналы могли передаваться и обрабатываться в оптической области с помощью оптических устройств, как продемонстрировано на рис. 1.

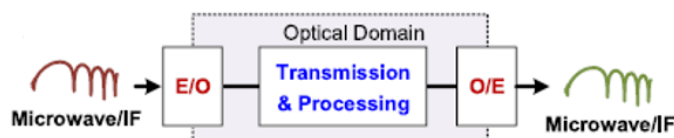


Рис. 1. Передача и обработка сигнала в оптической области [1]

Оптоволокно считается лучшей средой для передачи информации благодаря низким потерям при распространении ($\sim 0,2$ дБ/км для длин волн около 1550 нм), малому весу, относительно низкой стоимости и высокой устойчивости к электромагнитным помехам [6].

Неотъемлемой частью радаров является генератор локальных колебаний (локальный осциллятор), который генерирует опорные сигналы для преобразования частоты принятого радиочастотного сигнала в промежуточную частоту. Локальный осциллятор должен поддерживать высокую стабильность, чтобы обеспечивать точное преобразование частот для извлечения информации даже из слабых эхо-сигналов в условиях сильного загромождения или помеховой обстановки [3].

Одним из наиболее перспективных подходов в генерации фотонных локальных колебаний для радарных систем является опико-электронное преобразование, функциональная блок-схема которого показана на рис. 2.

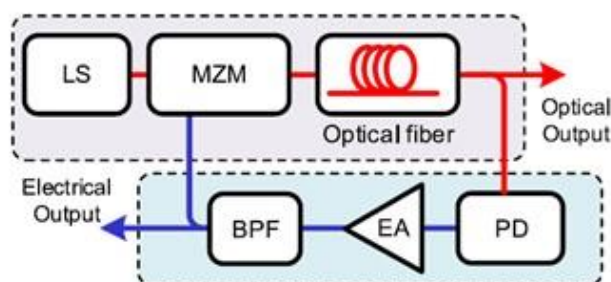


Рис. 2. Схема опико-электронного преобразования [1]

Лазерное излучение от источника проходит через модулятор Маха-Цендера (ММЦ) и длинное оптическое волокно, а затем преобразуется в электрический сигнал на фотоприемнике (ФП). Образующийся электрический сигнал поступает на электронный усилитель, проходит через полосовой фильтр и подается обратно в радиочастотный порт модулятора Маха-Цендера, образуя колебательный контур [1]. Модулятор Маха-Цендера изменяет интенсивность света в зависимости от поданного на него радиочастотного сигнала. Оптическое волокно задерживает свет и позволяет накапливать фазовую информацию, что позволяет формировать узкополосные и стабильные колебания.

Обратная подача сигнала на ММЦ создает петлю положительной обратной связи, то есть колебательный контур, который нужен для самогенерации сигнала и создания устойчивого радиочастотного колебания на определенной частоте. Благодаря петле обратной связи система может сама поддерживать колебания без внешнего источника радиосигнала. На выходе формируется стабильное радиочастотное колебание, генерируемое за счет взаимодействия оптического сигнала с модулятором и петлей обратной связи. Это колебание можно использовать в качестве локального осциллятора в фотонном радаре. Оно обладает высокой частотной стабильностью за счет оптических методов генерации [4].

Фазовый шум

Фазовый шум определяется как шум, возникающий из-за быстрых, кратковременных, случайных флуктуаций фазы, которые происходят в сигнале. Он отражается в спектре в виде паразитных боковых составляющих [5].

Фазовый шум однопетлевого оптико-электронного преобразования $S_\phi(f)$ можно определить по формуле (1).

$$S_\phi(f) = -10 \lg \left[\left(1 - \frac{f_{osc}}{f_{osc} + 2jQf} e^{-2j\pi f n_r L / c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

где f_{osc} – частота колебаний локального осциллятора, f – смещение частоты относительно f_{osc} , Q – коэффициент, характеризующий качество электрического фильтра, L – длина волокна, n_r – коэффициент преломления сердцевины волокна [1].

По формуле (1) видно, что фазовый шум экспоненциально усиливается за счет длины оптического волокна.

При распространении по оптоволокну фаза сигнала ϕ изменяется пропорционально его длине согласно формуле (2).

$$\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \quad (2)$$

где L – длина оптоволокну, λ – длина волны оптического сигнала [2].

Изменения длины волокна ΔL , вызванные флуктуациями температуры, механическими вибрациями, приводят к изменению фазы сигнала.

Температурные флуктуации происходят не из-за воздействия мощности сигнала, проходящего через оптическое волокно, а из-за внешних факторов, таких как колебания температуры окружающей среды, термическое расширение и локальный нагрев сопрягаемого оборудования.

Длина волокна изменяется в зависимости от температуры по формуле (3).

$$\Delta L = \alpha \Delta T \quad (3)$$

где α — коэффициент термического расширения волокна ($\approx 5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ для кварца), ΔT — изменение температуры.

Изменение фазы из-за термических флуктуаций будет определяться по формуле (4).

$$\Delta \phi_T = \frac{2\pi \alpha \Delta T}{\lambda} \quad (4)$$

Еще одним явлением, приводящим к искажению фазы сигнала, проходящего по оптическому волокну, является дисперсия. Вследствие дисперсии различные частоты испытывают разное запаздывание, что приводит к растяжению импульса [4].

В результате дисперсии фаза сигнала сдвигается нелинейно по частоте, что можно описать через фазовую задержку.

Для волокна длиной L , фаза сигнала ϕ на частоте f_1 вычисляется по формуле (5).

$$\phi(f) = \beta_0 + \beta_1 f_1 + \frac{\beta_2 f_1^2}{2} + \dots \quad (5)$$

где β_0 — статическая задержка, β_1 — групповая задержка ($\beta_1 = 1/v_g$, где v_g — групповая скорость), β_2 — параметр, связанный с дисперсией (время запаздывания на единицу длины и ширины спектра), f_1 — частота сигнала.

Фазовый сдвиг из-за дисперсии можно выразить по формуле (6).

$$\Delta \phi_{disp} = \beta_2 L \Delta f_1^2 \quad (6)$$

где Δf_1 — ширина спектра сигнала.

Параметр β_2 связан с коэффициентом хроматической дисперсии D формулой (7).

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad (7)$$

где c — скорость света, D — коэффициент хроматической дисперсии оптического волокна, λ — длина волны.

Подставив β_2 , получаем фазовый сдвиг из-за дисперсии, который определяется по формуле (8).

$$\Delta \phi_{disp} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D L \Delta f_1^2 \quad (8)$$

Для узкополосного сигнала, где ширина спектра Δf мала, эффект дисперсии слабо выражен, и фазовый сдвиг можно компенсировать программно или с помощью коррекции.

Для широкополосного сигнала дисперсия приводит к временной растяжке (Δt) и фазовым искажениям, что ухудшает когерентность сигнала. Это особенно важно для радиопотонных систем, работающих с широкополосными радиосигналами ($\Delta f \sim$ десятки ГГц) [1, 2, 4].

Таким образом, суммарный фазовый шум включает в себя вклад от:

- шума оптико-электронного генератора: внутренний шум с плотностью $S_\phi(f)$,
- температурных изменений: фазовый сдвиг из-за изменения длины волокна,
- дисперсии: фазовый сдвиг из-за временного расширения сигнала.

Суммарный фазовый шум вычисляется по формуле (9).

$$\Delta\varphi_{total}^2 = \Delta\varphi_T^2 + \Delta\varphi_{disp}^2 + S_\phi(f) \quad (9)$$

Максимальная дальность обнаружения радара

В соответствии с уравнением радиолокации дальность обнаружения определяется по формуле (10).

$$R = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda_1^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{r_{min}} L_s} \right)^{1/4} \quad (10)$$

где P_t — передаваемая мощность, G_t и G_r — коэффициенты усиления передающей и принимающей антенн, λ_1 — длина волны радиосигнала, σ — эффективная площадь рассеяния цели, L_s — потери в системе, $P_{r_{min}}$ — минимальная детектируемая мощность, зависящая от фазового шума и SNR [7].

Чувствительность радара определяется минимальной мощностью принимаемого сигнала $P_{r_{min}}$. Минимальная мощность связана с необходимым отношением сигнал/шум SNR_{eff} по формуле (11).

$$P_{r_{min}} = \frac{kTB}{SNR_{eff}} \quad (11)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура приёмника, B — полоса пропускания, SNR_{eff} — отношение сигнал/шум [7].

Фазовый шум ухудшает SNR_{eff} в соответствии с формулой (12).

$$SNR_{eff} = SNR_{ideal} * \exp(-\Delta\varphi_{total}^2) \quad (12)$$

где $\Delta\varphi_{total}^2$ — суммарное влияние фазового шума, SNR_{ideal} — идеальное отношение сигнал/шум (без учета влияния фазового шума) [1].

Подставляя фазовый шум в выражение для SNR_{eff} и далее в формулу для $P_{r_{min}}$, получаем, что максимальная дальность обнаружения вычисляется по формуле (13) [2].

$$R_{max} = R * \exp\left(-\frac{\Delta\varphi_{total}^2}{4}\right) \quad (13)$$

где R — дальность при идеальной когерентности.

С учётом всех составляющих фазового шума максимальная дальность обнаружения радиодифракционного радара будет вычисляться по формуле (14) [2, 7].

$$R_{max} = R * \exp\left(-\frac{1}{4} \left[\frac{(2\pi L \alpha \Delta T)^2}{\lambda^2} + \frac{\lambda^4 D^2 L^2 (\Delta f_1)^4}{(2\pi c)^2} + \int_{\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} S_\phi(f) df \right] \right) \quad (14)$$

где $S_\phi(f)$ — спектральная плотность мощности шума оптико-электронного генератора, L — длина оптического волокна, α — коэффициент термического расширения оптоволокна, ΔT — изменение температуры, λ — длина волны оптического сигнала, D — коэффициент хроматической дисперсии оптического волокна, Δf_1 — ширина спектра сигнала, c — скорость света.

Заключение

В результате проведенной работы были выявлены основные составляющие компоненты фазового шума, оказывающие влияние на работоспособность радиодифракционных радаров, а именно: шум оптико-электронного генератора, фазовые сдвиги из-за температурных изменений и воздействия дисперсии волокна. Исследование позволило вывести формулу для определения максимальной дальности обнаружения фотонного радара. Фазовый шум, описываемый выведенной формулой, приводит к деградации чувствительности системы, что выражается в снижении дальности обнаружения слабых сигналов. Он определяется как случайные изменения фазы сигнала во времени и проявляется в спектре в виде боковых полос вокруг основной частоты. Результаты работы подчеркивают необходимость комплексного подхода к снижению фазового шума радиодифракционных систем, что особенно важно для их применения в условиях повышенных требований к чувствительности, точности и дальности детектирования, таких как метеорология, авиация и оборонная отрасль.

Научный руководитель – д.т.н., профессор М.А. Коняев

Библиографический список

1. Pan S., Zhang Y. Microwave Photonic Radars // Journal of Lightwave technology. 2020. Vol. 38. P. 5450-5457.

2. Siddiq K. et. al. Phase Noise in FMCW Radar Systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2018.
3. Белкин М. Е. Оптоэлектронный генератор – первое устройство СВЧ-оптоэлектроники // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2010.
4. A. J. Seeds, K. J. Williams. Microwave Photonics // Journal of Lightwave technology. 2006. Vol. 24. P. 4628-4636.
5. M. S. Islam, U. Chong. Noise reduction of continuous wave radar and pulse radar using matched filter and wavelets // EURASIP Journal on Image and Video Processing. 2014.
6. Шумов А. В., Нефедов С. И., Бикметов А. Р. Концепция построения радиолокационной станции на основе элементов радиопотоники // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2016. С. 41-65.
7. M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm. Principles of Modern Radar Volume I - Basic Principles // SciTech Publishing. 2010.
8. Преображенский А. П. Методы обработки радиолокационных сигналов с помехами // Наука и современность. Воронеж. Воронежский институт высоких технологий. 2010.

УДК 681.786.23

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСТАНЦИИ В 3Д СКАНЕРАХ НА ОСНОВЕ ФАЗОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ

Д.К. Бобрецов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Введение

В последние десятилетия технологии лазерного сканирования стремительно развиваются и находят широкое применение в различных отраслях науки и промышленности. Одним из ключевых инструментов для построения точной пространственной модели удаленного объекта являются лазерные 3D сканеры. Современные лазерные 3D сканеры обеспечивают быстрое и высокоточное построение цифровых моделей объектов и окружающего пространства.

На сегодняшний день высокоскоростное лазерное сканирование востребовано в таких областях, как:

1. Геодезия - создание точных цифровых моделей местности и инфраструктуры;
2. Промышленное производство - контроль качества изделий, обратное проектирование и метрологические исследования;
3. Робототехника - навигация мобильных роботов и беспилотных транспортных средств.

На данный момент наиболее популярными и востребованными на рынке являются сканеры от Leica Geosystems, FARO Technologies и Riegl. В статье [1] представлена таблица сравнения основных параметров вышеприведенных сканеров (таблица 1).

Таблица 5 – Характеристики наиболее популярных сканеров на рынке

Название сканера	Riegl VZ-400i	Leica ScanStation C-10	Faro Focus 3d
Метод измерения дальности	Времяпролетный	Времяпролетный	Фазовый
Скорость измерения, точек в секунду	До 500000	50000	До 1000000
Дальность, м	800	300	120

Как можно заметить из вышеприведенной таблицы, не всегда в сканерах используется фазовые лазерные дальномеры, если ошибка измерения у всех моделей лежит в одном порядке, то скорость сканирования существенно больше у фазового сканера, т.к. времяпролетные сканеры измеряют время, за которое лазерный импульс проходит до объекта и обратно, это требует более сложных вычислений и времени на обработку каждого импульса. Фазовые сканеры используют модулированный непрерывный лазерный сигнал и измеряют фазовый сдвиг между отправленным и полученным сигналом, что позволяет быстрее получать данные. Они обеспечивают более высокую плотность точек и подходят для детального сканирования на коротких расстояниях. В целом, фазовые сканеры быстрее, но времяпролетные более точны и эффективны на больших расстояниях.

Рассмотрим одну из моделей под названием FARO LASER SCANNER FOCUS3D X 130, ее ключевые характеристики касательно дальнометрии приведены в таблице 2.

Таблица 6 – Характеристики FARO LASER SCANNER FOCUS3D X 130

Рабочая дистанция, м	0.6 – 130 (до 90% отражающей поверхности)
Скорость измерения, точек в секунду	122000 / 244000 / 488000 / 976000
Ошибка определения расстояния, мм	± 2

Постановка задачи

Сложность разработки высокоскоростного лазерного фазового дальномера обусловлена влиянием различных факторов: шумов, цифровой обработке сигналов, динамических изменений сцены.

В современной научно-технической литературе представлен широкий выбор алгоритмов для определения фазового сдвига: синхронного и квадратурного детектирования, посредством преобразования Фурье, алгоритмом Герцеля [2]. Также немаловажным при разработке систем такого рода является необходимость использования нескольких частот модуляции, для оценки больших

расстояний с высокой точностью. Нередко величина высокой частоты может достигать до 200 МГц, т.к. с увеличением частоты, уменьшается ошибка измерения расстояния по формуле 1, представленной ниже:

$$\Delta l = c \frac{\Delta \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (1)$$

где $\Delta \varphi$ – погрешность измерения фазы; f – частота модуляции излучения, Гц; c – скорость света, м/с. Поэтому для оцифровки таких частот придется использовать дорогостоящие аналого-цифровые преобразователи (АЦП), либо применять различные методы понижения частоты дискретизации, такие как: гетеродинное преобразование частот или aliasing (сглаживание) [3].

В данной статье будут рассматриваться алгоритмы фазовой многочастотной дальнометрии и их реализация в среде MATHCAD, а также факторы, влияющие на точностные и скоростные параметры дальномера.

Как уже было сказано выше для получения высоких точностей (порядка 2 мм) на таких дистанциях (порядка 100 м) потребуется использовать несколько частот. Из учета скорости работы для первой, самой низкой частоты, выберем значение равное 1 МГц для того, чтобы обеспечить максимальную дальность выше заявленного аналога (150 м), а также скорость не ниже 976000 точек в секунду.

Выбор высокой частоты основывается на требуемой точности, чем выше частота, тем меньше будет ошибка определения расстояния, а также повысятся требования к АЦП. Обычно частоту выбирают так, чтобы ошибка определения фазового сдвига была того же порядка что и для низкой частоты. Если взять частоту 100 МГц, у которой предел разрешения 1.5 метра, тогда величина ошибки определения фазового сдвига на низкой частоте должна быть не больше 0.9 градусов, а на высокой 0.24 градусов.

Для математической модели фазового дальномера на вход будет поступать величина полной линии задержки до объекта и обратно, равная двойному расстоянию.

Описание работы модели фазового дальномера на основе квадратурного детектирования фазового сдвига

В качестве опорного сигнала возьмем комбинированный сигнал двух синусов, принимаемый сигнал сдвинем относительно опорного на величину задержки и прибавим аддитивный белый гауссовский шум (формула 2, 3, 4, 5).

$$\tau = \frac{2 \cdot D}{c} \quad (2)$$

$$x1(t) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) + \sin(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t) \quad (3)$$

$$x2(t) = x1(t + \tau) + noise \quad (4)$$

$$x3(t) = x2(t) \cdot x1(t) \quad (5)$$

где τ – временная задержка, с; D – расстояние до объекта, м; f_1 – первая (низкая) частота, Гц; f_2 – вторая (высокая) частота, Гц; noise – белый гауссовский шум; $x1(t)$ – опорный сигнал; $x2(t)$ – измеряемый сигнал; $x3(t)$ – результат смещения двух сигналов.

После смещения сигнала, требуется провести оцифровку сигнала, частота дискретизации и глубина квантования будет подбираться в будущих работах исходя из требований точности и отношения сигнал/шум, на данном этапе важно понимать какое количество точек получится накопить, используя формулу 6 можно рассчитать частоту сглаживания [4].

$$f_s = \frac{4 \cdot f}{4 \cdot p + 1} \quad (6)$$

где p – целое число (1, 2, 3...).

Стоит отметить, что в данном случае при смещении сигналов произойдет удвоение частоты, как высокой, так и низкой, поэтому частота дискретизации при сглаживании первого порядка будет равна 160 МГц. Квантование сигнала будем производить через встроенную функцию quantize (x, n) в MATHCAD, которая на вход принимает выборку сигнала и количество уровней.

После получения цифрового сигнала требуется вычислить среднее значение или смещение, которое вызвано фазовым сдвигом в следствии выражения 7.

$$\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) = \frac{1}{2} (\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)) \quad (7)$$

где α и β – полные фазы колебаний опорного и измеряемого сигнала. Для случая в котором частоты будут совпадать: разностная часть обратится в косинус фазового сдвига и даст то самое смещение, а суммарная приведет к удвоению частоты сигнала. В случае одночастотного измерения потребовалось бы всего лишь посчитать среднее от такой функции, но в нашем случае придется сначала отфильтровать сигнал. Для этого в среде MATHCAD воспользуемся встроенными функциями lowpass и bandpass для низкой и высокой частоты соответственно, данные функции возвращают коэффициенты фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ – фильтр), после чего требуется провести

операцию свертки полученного цифрового сигнала с коэффициентами, возвращенными от lowpass и bandpass.

Для того чтобы верно оценить фазовый сдвиг на всем промежутке от 0 до 2π , требуется также смещать измеряемый сигнал с опорной квадратурной составляющей (формула 8) и реализовать алгоритм, приведенный в выражении 9.

$$x_4(t) = x_2(t) \cdot (\cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) + \cos(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t)) \quad (8)$$

$$\varphi = \begin{cases} \arccos(\text{mean}(x_{1j})), & \text{mean}(x_{2j}) \geq 0 \\ 2\pi - \arccos(\text{mean}(x_{1j})), & \text{mean}(x_{2j}) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

где $\text{mean}(x)$ – встроенная функция MATHCAD, которая возвращает среднее значение элементов выборки, x_{1j} – выборка сигнала синхронной составляющей, отфильтрованной на низкой частоте, x_{2j} – выборка сигнала квадратурной составляющей, отфильтрованной на низкой частоте. Аналогично требуется провести расчеты для высокой частоты, после чего провести разрешение неоднозначности, которое будет рассмотрено в следующем разделе.

Описание работы модели фазового дальномера на основе алгоритма Герцеля

После получения цифрового сигнала, о котором было упомянуто в предыдущем разделе, можно перейти к алгоритму Герцеля, который реализуется в форме фильтра с бесконечно-импульсной характеристикой (БИХ - фильтра) второго порядка с двумя действительными коэффициентами обратной связи и одним комплексным коэффициентом в цепи прямой связи, как показано на рисунке 1.

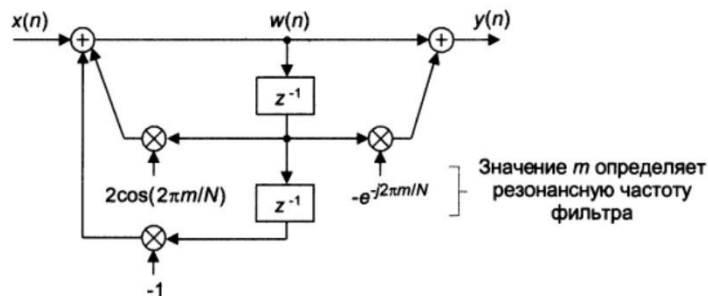


Рисунок 1 - Структурная схема БИХ-фильтра реализующего расчет спектрального отсчета с номером m [5]

Алгоритм Герцеля позволяет эффективно рассчитывать фиксированные спектральные отсчеты дискретного преобразования Фурье (ДПФ) без необходимости рассчитывать все ДПФ. В случае фазового дальномера алгоритм Герцеля является наиболее предпочтительным, т.к. можно однозначно утверждать какие спектральные составляющие будут приходить после обработки сигнала. Безусловно данный алгоритм зависит от фликкер шума используемого генератора, также стоит учитывать и тот факт, что измеряемая сцена может меняться, объекты могут двигаться, что вызовет доплеровский сдвиг частот и также повлияет на качество определения спектральной составляющей.

Рассчитать номер спектральной составляющей можно по формуле 10:

$$M = \frac{f \cdot N}{f_s} \quad (10)$$

где N – количество точек.

Тогда вычислить значение единственного отсчета ДПФ можно по формуле 11:

$$X_j = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=0}^{N-1} x_{1j} \cdot \exp \frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot M \cdot j}{N} \quad (11)$$

где j – номер выборки. В результате работы алгоритма возвращается комплексное число, арктангенс отношения мнимой части к вещественной позволит определить фазовый сдвиг. Стоит отметить, что определение фазы имеет ограниченную область значений, что следует из определения арктангенса. Для расширения области значений вводится исправленная функция арктангенса для четырех квадрантов, зависящая от двух аргументов в соответствии с выражением 12 [6]:

$$\varphi = \begin{cases} \arctg \frac{\text{Im}(X_j)}{\text{Re}(X_j)}, \Im(X_j) \geq 0, \Re(X_j) > 0 \\ -\arctg \frac{\text{Im}(X_j)}{\text{Re}(X_j)}, \Im(X_j) < 0, \Re(X_j) > 0 \\ \pi - \arctg \frac{\text{Im}(X_j)}{\text{Re}(X_j)}, \Im(X_j) \geq 0, \Re(X_j) < 0 \\ -\pi + \arctg \frac{\text{Im}(X_j)}{\text{Re}(X_j)}, \Im(X_j) < 0, \Re(X_j) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Данный алгоритм также требует доработки, чтобы фаза сигнала определялась с анвраппингом – устранения скачков фазы, возникающих при её линейном изменении в диапазоне от -180 до +180. Для этого сначала посчитаем фазу сигнала с помощью арктангенса, после чего составим новую систему в соответствии с выражением 13, которая будет выводить фазу в градусах с вышеупомянутым анвраппингом:

$$\varphi = \begin{cases} -\frac{180 \cdot \varphi}{\pi}, \Im(X_j) \geq 0, \Re(X_j) > 0 \\ 180 - \frac{180 \cdot \varphi}{\pi}, \Im(X_j) < 0, \Re(X_j) > 0 \\ 180 - \frac{180 \cdot \varphi}{\pi}, \Im(X_j) \geq 0, \Re(X_j) < 0 \\ 360 - \frac{180 \cdot \varphi}{\pi}, \Im(X_j) < 0, \Re(X_j) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Аналогично требуется провести расчет и для высокой частоты после чего следует перейти к разрешению неоднозначности, для этого определим в каком периоде высокой частоты находится объект через расстояние, вычисленное на низкой частоте и предел разрешения высокой, по формуле 14:

$$Q = \text{floor} \left(\frac{D_{\text{низкой частоты}}}{D_{\text{предел высокой}}} \right) \quad (14)$$

где floor(x) – встроенная функция MATHCAD, которая возвращает наибольшее целое число, меньшее или равное x; $D_{\text{низкой частоты}}$ – расстояние, вычисленное с помощью низкой частоты, м; $D_{\text{предел высокой}}$ – предел разрешения высокой частоты, м.

Используя вычисленное расстояние с помощью низкой и высокой частоты, можно получить выражение 15 для расчета расстояния с точностью соответствующей высокой частоте:

$$D_{\text{измеренное}} = D_{\text{предел высокой}} \cdot Q + D_{\text{высокой частоты}} \quad (15)$$

где $D_{\text{высокой частоты}}$ – расстояние, измеренное с помощью высокой частоты, м.

Сравнение алгоритма Герцеля с квадратурным детектированием

Квадратурный метод измерения фазового сдвига сигналов, также позволяет определять расстояние в пределах от 0 до 2π и является традиционным в фазовой дальнометрии, но имеет значительный минус при работе в многочастотном режиме – требуется применения фильтров для расчёта расстояния на низкой и высокой частоте, что также приводит к незначительным ошибкам, тогда как использование алгоритма Герцеля само по себе фильтрует сигнал в частотной области. При разработке математических моделей и в процессе работы, было обнаружено что максимальная ошибка по дальности будет при максимальных фазовых сдвигах кратных π для квадратурного метода и кратных 2π для алгоритма Герцеля в соответствии с графиками приведенными на рисунках 2 и 3. Графики были построены с накоплением равным 10 (10 мкс), для низкой частоты и аппроксимированы с помощью программного пакета Excel, отношение сигнал/шум = 10, частота дискретизации 160 МГц, глубина квантования 1024.

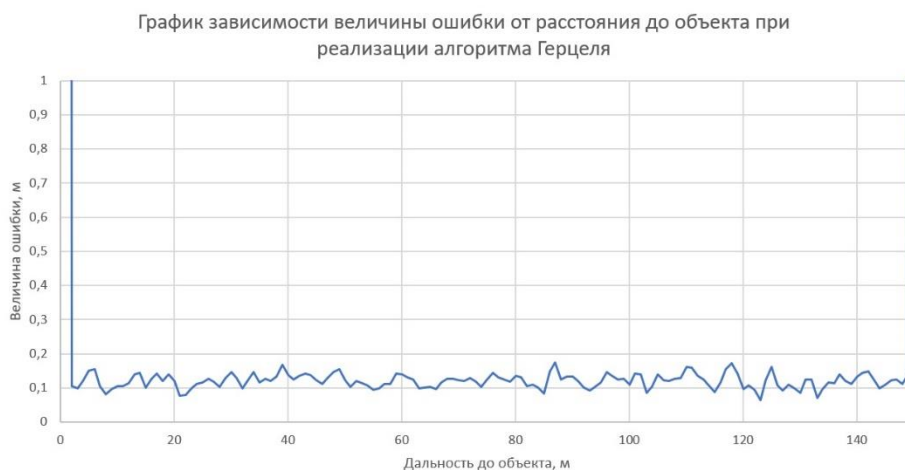


Рисунок 2 - График зависимости величины ошибки от расстояния при реализации алгоритма Герцеля

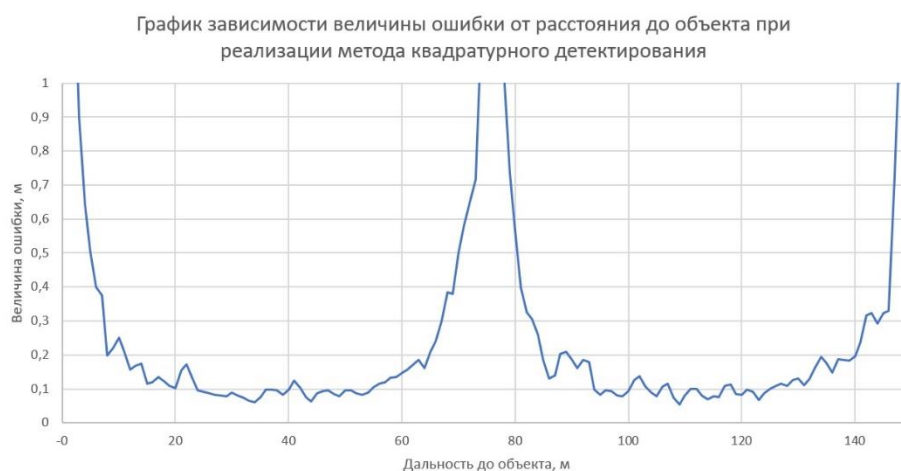


Рисунок 3 - График зависимости величины ошибки от расстояния методом квадратурного детектирования

Заключение

В статье разработана математическая модель для реализации квадратурного детектирования фазового сдвига и алгоритма Герцеля в многочастотном фазовом дальномере с разрешением неоднозначности и анвраппингом фазы. Проведено сравнение между данными методами, и выведены зависимости величины ошибки от расстояния до объекта, в результате чего можно утверждать, что разработанный алгоритм Герцеля может работать без уменьшения скорости сканирования на расстояниях эквивалентных фазовому сдвигу равному π и больше, т.к. не потребуется отправлять несколько паттернов сигнала, сдвинутых по фазе изначально.

Также в результате сравнения было выявлено что для квадратурного метода детектирования ошибка стремится к минимальной на расстояниях эквивалентных $\pi/4$, а при приближении к $\pi \cdot n$, где n – целое число, ошибка нарастает; тогда как в реализации алгоритма Герцеля распределения ошибки от 0 до 2π более равномерное.

Стоит также заметить что в будущем требуется проработка вопросов влияния частоты дискретизации, глубины квантования и отношения сигнал/шум на точность лазерного фазового дальномера, а также не смотря на превосходство алгоритма Герцеля над квадратурным методом детектирования в плане оценки расстояний свыше π , данный алгоритм также подвержен высоким ошибкам в 0 и 2π на высокой частоте, что требует также модуляции опорного сигнала по фазе, для разрешения данных участков.

Научный руководитель – д.т.н., профессор, М.А. Коняев

Библиографический список

1. Czesław Suchocki Comparison of Time-of-Flight and Phase-Shift TLS Intensity Data for the Diagnostics Measurements of Buildings [Электронный ресурс] // MDPI; URL: <https://www.mdpi.com/journal/materials> (дата обращения 12.02.2025)

2. Бокшанский В. Б., Вязовых М. В., Е Тэ Вун Метод высокоточного измерения дальности путем использования цифровой обработки эхо-сигнала // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «приборостроение», 2011. С. 177 – 186.
3. Берников Б.О., Бокшанский В. Б., Вязовых М. В., Федоров С.В. Методы повышения точности измерения дальности в лазерных фазовых дальномерах // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «приборостроение», 2012. С. 131 – 140.
4. Stéphane Poujouly, Bernard Journet A twofold modulation frequency laser range finder J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 4, 2002. С. 356 – 363.
5. Галанина Н.А., Дмитриев Д.Д., Ахметзянов Д. И. АЛГОРИТМ ГЕРЦЕЛЯ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ // Программные системы и вычислительные методы – №4(5), 2013. С. 376 – 383.
6. Курбаналиев В. К. Измерение разности фаз в программной среде MATLAB/Simulink // Наука в цифрах. – 2017. – С. 9-12.

УДК 535.343.2

АНАЛИЗ КРАЯ СОБСТВЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

К. Е. Брусина, А. В. Соломникова

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Введение

Фосфид галлия GaP является важным материалом для современной оптоэлектроники, так как он позволяет создавать устройства, эффективно работающие как в видимом, так и в инфракрасном диапазонах. Для раскрытия потенциала этого непрямозонного полупроводника необходимо осуществить детальный анализ его оптических свойств и, в частности, края собственного поглощения, который определяет возможность использования данного материала для детектирования и преобразования энергии электромагнитного излучения. В данной работе осуществлены моделирование и описание спектров поглощения непрямозонного полупроводника GaP с учетом экситонных эффектов.

Применение фосфида галлия

Фосфид галлия GaP – непрямозонный полупроводник, активно применяющийся в области фотоники с 1960-х годов в первую очередь в качестве материала для создания светоизлучающих устройств – зеленых светодиодов. Ширина запрещенной зоны GaP составляет 2,26 эВ, так что генерация излучения осуществляется на длине волны 555 нм, что соответствует зеленой области спектра. Однако стоит отметить, что из-за не прямой запрещенной зоны, структура которой представлена на рис. 1, эффективность преобразования энергии в чистом GaP составляет всего 1%, так что для создания светодиодов осуществляется легирование фосфида галлия азотом, цинком или кислородом. Для изготовления светодиодов может быть использован аморфный GaP. Также GaP является перспективным материалом для создания детекторов ультрафиолетового, синего и сине-зеленого излучения в диапазоне от 250 до 500 нм [1].

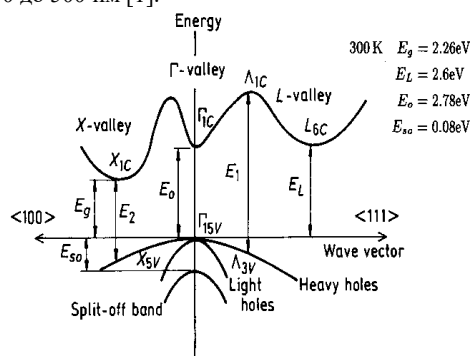


Рис. 1. Зонная структура GaP [2]

В последнее время по ряду причин все большее внимание уделяется нанофотонным устройствам на базе GaP. Во-первых, кристаллическая решетка GaP практически совпадает с решеткой кремния Si, что значительно упрощает масштабирование технологии изготовления структур на основе рассматриваемого полупроводника. Во-вторых, среди всех прозрачных для излучения видимого диапазона полупроводников класса A_{III}B_V GaP обладает самым высоким показателем преломления ($n_0 > 3$) и, соответственно, большой нелинейной восприимчивостью среды 3-го порядка $\chi^{(3)}$. Наконец, благодаря отсутствию центра инверсии в кристаллической решетке GaP характеризуется значительной восприимчивостью среды 2-го порядка $\chi^{(2)}$. Эти особенности фосфида галлия обеспечивают возможность его применения, к примеру для создания удвоителей частоты, наноантенн, использующихся для усиления фотолюминесценции, и твердотельных квантовых излучателей [3].

За счет большой нелинейности и широкого окна прозрачности GaP является перспективным материалом для интегрированной нелинейной фотоники. При создании фотонных кристаллов GaP может быть использован в качестве перфорированной мембраны. Стоит отметить, что в последнее

время большой интерес вызывают разработки по совмещению этих фотонных кристаллов с NV-центрами – точечными дефектами алмаза, представляющими из себя комплекс азота и вакансии. Такие структуры могут быть использованы для создания однофотонных излучателей [4]. Более того, большая ширина запрещенной зоны и отработанная технология эпитаксиального роста высококачественных слоев GaP позволяют использовать его для изготовления фотоэлементов [5].

Край собственного поглощения в непрямозонном полупроводнике

Очень важной характеристикой любого полупроводника, применяющегося в фотонных технологиях, является край собственного поглощения. В непрямозонном полупроводнике поглощение происходит за счет взаимодействия электрона с фононами или дефектами кристаллической решетки, способными перевести электрон в состояние с волновым вектором \mathbf{k}_0 , соответствующее минимуму зоны проводимости. Схема такого оптического перехода представлена на рис. 2.

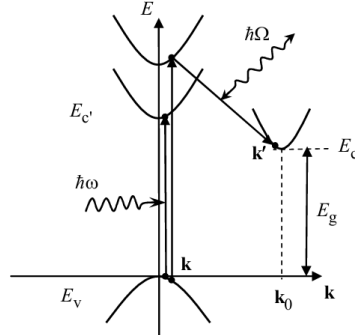


Рис. 2. Схема оптического перехода в непрямозонном полупроводнике

Выделяют два основных процесса, влияющих на вид края поглощения в собственном полупроводнике, – связанно-связанные и связанно-свободные электронные переходы. Если энергия падающего фотона превышает ширину запрещенной зоны, при поглощении света электрон переходит в зону проводимости, что сопровождается образованием дырки в валентной зоне, при этом электрон считается свободной квазичастицей. Однако экспериментально наблюдается и поглощение фотонов, энергии которых меньше ширины запрещенной зоны, что обусловлено существованием таких электронных переходов, в которых электрон проводимости и дырка в валентной зоне оказываются связанными друг с другом силами Кулона, это связанное состояние называют экситоном. В результате при описании края поглощения переходят от классической зонной структуры, описанной в одночастичном приближении, к экситонной зонной структуре, учитывающей взаимодействие двух квазичастиц – электрона в валентной зоне и дырки в зоне проводимости.

В кристаллах, в частности в GaP, экситонное возбуждение распространяется на большое число элементарных ячеек решетки. В этом случае для описания экситонов используется приближение слабой связи. Энергетический спектр экситона аналогичен спектру атома водорода, то есть в нем присутствуют дискретная и непрерывная составляющие:

$$\varepsilon = \begin{cases} -\frac{R_{\text{ex}}}{n^2}, & \varepsilon < 0 \\ \varepsilon, & \varepsilon \geq 0 \end{cases},$$

где R_{ex} – эффективная экситонная постоянная Ритберга, n – главное квантовое число, описывающее состояние экситона, стоит отметить, что выражение R_{ex}/n^2 – энергия связи экситона. Экситонная зонная структура непрямозонного полупроводника представлена на рис. 3.

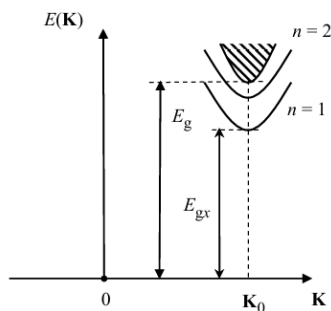


Рис. 3. Экситонная зонная структура непрямозонного полупроводника

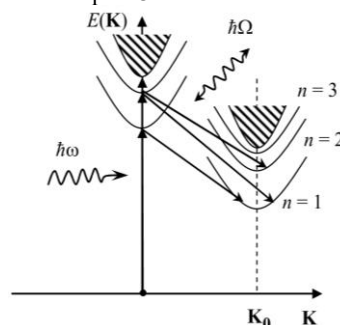


Рис. 4. Схема оптического перехода, происходящего с испусканием фонона

Штриховкой на зонной структуре показан непрерывный спектр экситона, соответствующий ионизованному состоянию. Минимум зоны проводимости в экситонной зонной структуре находится в той же точке обратного пространства, что и в обычной зонной структуре, т. е. $\mathbf{K}_0 = \mathbf{k}_0$.

Непрямые оптические переходы обычно описываются как двухэтапный процесс. На первом этапе образуется экситон с $\mathbf{K} = 0$, при этом волновой вектор участвующего в процессе электрона не изменяется, а его энергия равняется энергии падающего фотона $\hbar\omega$. На втором этапе происходит рассеяние экситона на фононе энергией $\hbar\Omega$ в состояние с волновым вектором \mathbf{K}_0 . Процесс поглощения

проходит как с испусканием, так и с поглощением фонона, что дополнительно влияет на форму края собственного поглощения. Схема такого перехода с представлена на рис 4.

Поскольку в результате поглощения экситон может оказаться как в состоянии, отвечающем дискретной составляющей спектра ($n = 1, 2, 3, \dots$), так и в состоянии с непрерывной энергией ($\varepsilon \geq 0$), коэффициент поглощения для непрямозонного полупроводника определяется следующим выражением

$$\alpha_{\pm}(\hbar\omega) \sim \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left(\hbar\omega - E_g + \frac{R_{ex}}{n^2} \pm \hbar\Omega \right)^{1/2} + \frac{1}{2R_{ex}} \int_0^{\hbar\omega - E_g \pm \hbar\Omega} \frac{(\hbar\omega - E_g + \varepsilon \pm \hbar\Omega)^{1/2}}{1 - \exp\left(-2\pi\sqrt{\frac{R_{ex}}{\varepsilon}}\right)} d\varepsilon.$$

где знак «+» соответствует процессам с поглощением, а «-» – с испусканием фонона [6].

На рис. 5 представлен общий вид суммы и интеграла для процесса собственного поглощения с учетом экситонных эффектов.

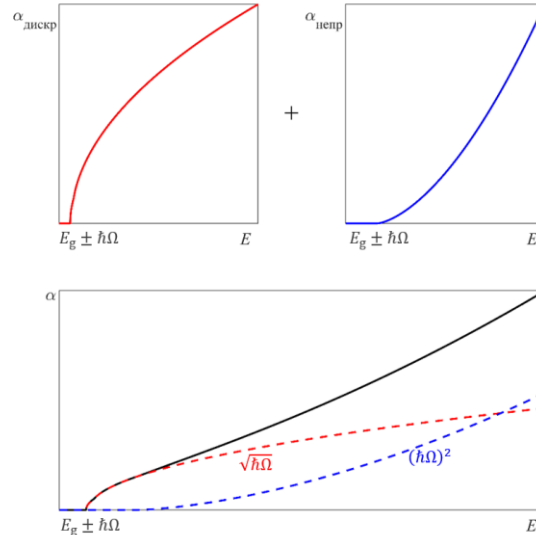


Рис. 5. Общий вид функций, описывающих край собственного поглощения непрямозонного полупроводника: $\alpha_{\text{дискр}}$ – вклад дискретной составляющей экситонного спектра в показатель поглощения, $\alpha_{\text{непр}}$ – вклад непрерывной составляющей экситонного спектра в показатель поглощения, α – суммарный показатель поглощения

Из выражения для $\alpha_{\pm}(\hbar\omega)$ видно, что спектр поглощения вблизи непрямого оптического перехода определяется именно экситонными процессами, которые описываются корневой зависимостью. В случае, когда энергия фотона $\hbar\omega$ значительно превышает ширину запрещенной зоны E_g , поглощение определяется непрерывными состояниями экситона, а $\alpha_{\pm}(\hbar\omega)$ стремится к квадратичной зависимости, характерной для одноэлектронного приближения.

Моделирование края собственного поглощения фосфида галлия

При анализе и моделировании края поглощения непрямозонного полупроводника GaP необходимо учитывать, что вероятность поглощения или испускания фононов зависит от температуры, определяющей среднее число фононов с данной энергией $\hbar\Omega$. В результате для описания температурной зависимости в модель вводятся коэффициенты B_+ и B_- для процессов, идущих с поглощением и испусканием фононов соответственно. Эти коэффициенты определяются распределением Бозе-Эйнштейна, вероятностью перехода и другими характеристиками полупроводника.

В работе осуществляется моделирование имеющихся в литературе высококачественных экспериментальных спектров поглощения фосфида галлия GaP [7]. В табл. 1 представлены параметры, необходимые для описания спектра: подобранные энергии фононов, участвующих в процессе поглощения, ширина запрещенной зоны E_g и эффективная экситонная постоянная Ритберга R_{ex} .

Табл.1. Энергии, необходимые для моделирования края собственного поглощения

Фонон	$\hbar\Omega$, мэВ	E_g , эВ	R_{ex} , мэВ
TA	12,8	2,33	8,9
LA	31,3		
TO	46,5		
(TA+LO ^I)	64,3		

Моделирование осуществлялось в графической среде разработки приложений LabVIEW. На рис. 6 представлена лицевая панель виртуального прибора, позволяющего моделировать спектр поглощения с учетом экситонных эффектов, процессов поглощения и испускания фононов.

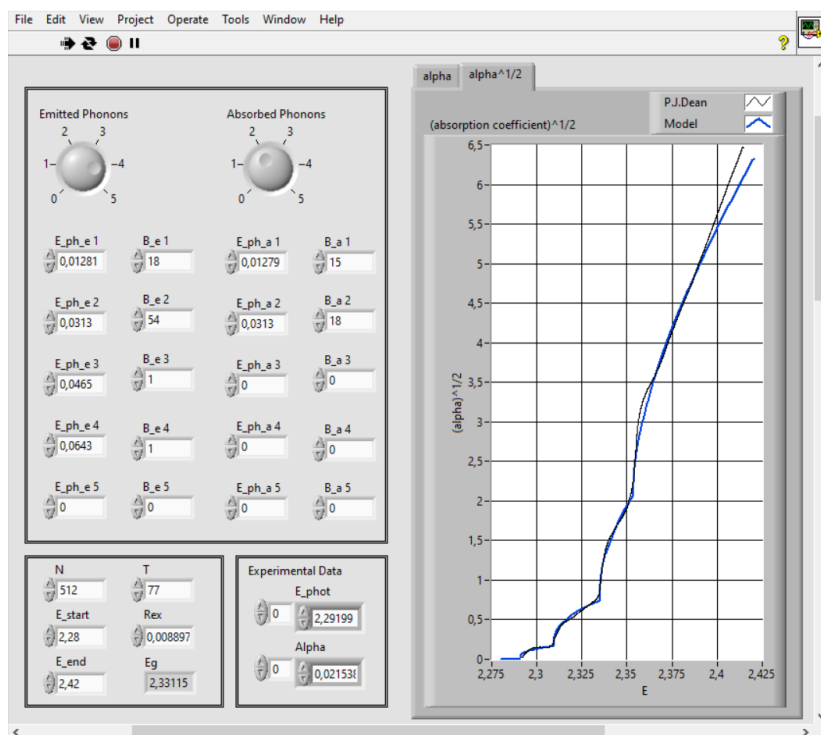


Рис. 6. Лицевая панель виртуального прибора для моделирования края поглощения

Программа включает в себя 2 основные подпрограммы, позволяющие рассчитать сумму, учитывающую дискретный спектр экситона, и интеграл, учитывающий непрерывный спектр.

В процессе моделирования спектров определено, что для адекватной подгонки рассчитанных данных к экспериментальным, необходимо вводить разные коэффициенты B_+ и B_- для всех фононов, для процессов испускания и поглощения фононов и для различных температур.

Заключение

В ходе выполнения работы осуществлено моделирование края собственного поглощения GaP. В процессе подгонки спектров определено, что для адекватного описания реальных зависимостей, необходимо вводить разные коэффициенты B не только для разных температур, но и для разных фононов и процессов их испускания и поглощения. Разработанная программа может быть использована для анализа спектров оптического поглощения других непрямозонных полупроводников, к примеру, алмаза.

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор В.И. Зубков

Библиографический список

1. Václavík J., Vápenka D. Gallium Phosphide as a material for visible and infrared optics // EPJ Web of Conferences. 2013. Т. 48. С. 1–4.
2. GaP – Gallium Phosphide. Band structure and carrier concentration [Электронный ресурс] // Ioffe.ru; URL: <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaP/bandstr.html> (дата обращения: 01.03.2025).
3. Wilson D. J. Integrated Gallium Phosphide Nonlinear Photonics / Wilson D. J., Schneider K., Hoenl S. [и др.] // Nature Photonics. 2019. Т. 14. С. 57–62.
4. Englund D. Deterministic Coupling of a Single Nitrogen Vacancy Center to a Photonic Crystal Cavity / Englund D., Shields B., Rivoire K. [и др.] // Nano Letters. 2010. Т. 10. №10. С. 3922–3926.
5. Aparna A. R. Review on Synthesis and Characterization of Gallium Phosphide / Aparna A. R., Brahmajiraob V., Karthikeyan T. V. // Procedia Materials Science. 2014. Т. 6. С. 1650–1657.
6. Виолина Г. Н. Оптические и кинетические явления в твердых телах: лабораторный практикум / Виолина Г. Н., Глинский Г. Ф., Зубков В. И. С-Пб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 80 с.
7. Dean P. J., Thomas D. G. Intrinsic Absorption-Edge Spectrum of Gallium Phosphide // Physical Review. 1966. Т. 150. №2. С. 690–730.

УДК 621.373.8

ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА С ВЫСОКИМ ЗНАЧЕНИЕМ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 800-900 НМ

А.С. Митрофанова, М. В. Гавриш

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Одним из самых актуальных методов передачи информации в оптическом диапазоне является лазерная связь. Благодаря используемому ближнему инфракрасному диапазону – 800-900 нм, который

не виден человеческому глазу, но воспринимается большинством фотоприемников, такой метод обладает высокой помехозащищенностью, пропускной способностью и низкой стоимостью. Лазерная связь может применяться как в воздушном пространстве, так и в космическом.

Для обеспечения передачи на большие расстояния требуется высокие выходные энергетические значения лазерного источника. Существуют следующие лазерные источники, удовлетворяющие диапазону 800-900 нм: полупроводники, фториды (Cr:LiSAF, Cr:LiCAF), корунды (Ti:Sapphire), хризобериллы (александрит). Основные характеристики данных лазерных источников представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики лазерных источников

	Ti:sapphire	Alexandrite	Cr:LiSAF	Cr:LiCAF	Диоды
Пиковая длина волны λ_L , нм	790	750	830	855	808, 810, 840, 860, 880
Диапазон перестройки, нм	660-1180	700-858	770-1110	720-887	-
$\sigma_{\text{set}}, \cdot 10^{-19} \text{ см}^2\text{-мкс}$	13,1	18,3	32,2	22,8	-
Накачка	Вторая гармоника Nd:YAG	Красные диоды	Красные диоды	Красные диоды	Электрический ток
Выходная мощность, Вт	10 [1]	26,2 [2]	3 [3], 30 [4], 44 [5]	2,54 [6], 30 [4], 44 [5]	0,05 [7]

Таким образом, для получения системы с высоким значением средней мощности наиболее подходящим лазерным источником является Cr:LiSAF, благодаря дешевой накачке, широкой полосе перестройки излучения, высокому производству времени жизни и поперечного сечения лазерного уровня. Используя данную активную среду, возможно получить мощные и короткие импульсы.

Однако, для Cr:LiSAF есть значимые ограничения по мощности в виде низкого коэффициента теплопроводности, устойчивости к тепловому удару и трещиностойкости. Эти ограничения возможно устранить укрепив активную среду или воспользовавшись некогерентным спектральным сложением.

Из экспериментальной установки на лазерном источнике Cr:LiSAF были получены следующие данные: энергия импульса 1,5 Дж при частоте следования 3 Гц, время импульса 300 нс, диапазон перестройки 795-900 нм. Среднюю мощность импульса можем рассчитать по формуле (1):

$$P_{\text{ср}} = E_{\text{имп}} \nu \quad (1)$$

Тогда средняя мощность равняется 4,5 Вт. Для получения высокой средней мощности порядка 20 Вт понадобится 5 лазерных модулей.

Для достижения высоких значений средней мощности существует способ с достаточно простой реализацией – спектральное некогерентное сложения лазерного излучения. Он хорошо подходит для импульсных источников, так как происходит временное уплотнение, когда промежутки между импульсами одного лазера заполняются импульсами другого (рис.1).

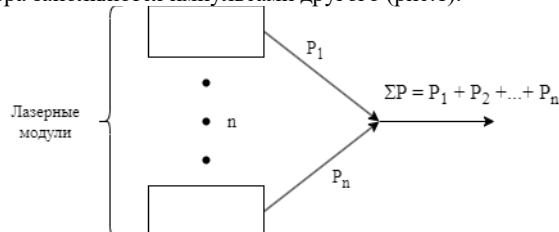


Рис. 1. Принцип спектрального некогерентного сложения лазерного излучения

На данный момент существуют следующие реализуемые схемы:

- Схема сложения на дисперсионном элементе;
- Схема акустооптического сложения;
- Схема сложения оптоволоконным сумматором.

В качестве дисперсионного элемента для схем суммирования используется дифракционная решетка, работающая в «обратном направлении», как показано на рис. 2.

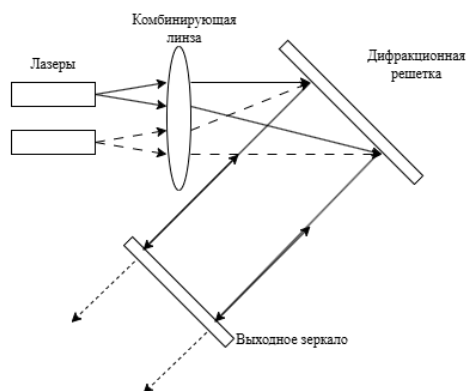


Рис. 2. Схема сложения на дисперсионном элементе

Для данного метода рассмотрим решетку Брэгга из фото-термо-рефрактивного стекла. Этот материал обладает высокой механической и термической прочностью. В статье [8] данный материал показал высокую устойчивость к высоким мощностям, превышающих 700 Вт.

В схеме с акустооптическим модулятором сложение мощностей происходит за счет акустооптического эффекта, принцип действия которого заключается в изменении показателя преломления среды за счет деформаций, созданных акустической волной, распространяющейся в этой прозрачной среде. Такая среда становится фазовой дифракционной решеткой для падающего света [9]. Принцип действия показан на рис. 3.

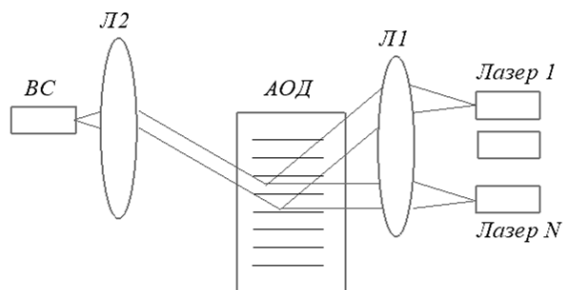


Рис. 3. Схема сложения на акустооптическом модуляторе

Для заданного спектрального диапазона 800-900 нм рабочее значение мощности соответствует 3 Вт.

В схеме с волоконным сумматором суммирование мощностей происходит за счет объединения нескольких лазеров в одно выходное волокно. На рынке представлены вариации объединения 4x1 и 7x1, для желаемой мощности в 20 Вт подходим сумматор типа 7x1. Также мощностные характеристики достигают 300 Вт.

Исходя из энергетических характеристик, можем заметить, что подходящими схемами являются с дисперсионным элементом и волоконным сумматором.

Проведем расчет для выбранных схем. Для решетки Брэгга выберем начальную длину волны $\lambda_0 = 890$ нм, для которой брэгговский угол составляет 90° , и определим период по формуле (2):

$$2d \sin \alpha = \frac{\lambda_n}{n} \quad (2)$$

где d – постоянная решетки, α – угол между решеткой и падающим излучением, n – показатель преломления ФТР стекла. Таким образом, $d = 0,299$ мкм. Для диапазона перестройки рассчитаем углы Брэгга и найдем, на сколько они отличаются от угла Брэгга для λ_0 . Результат представлен на рис. 4.

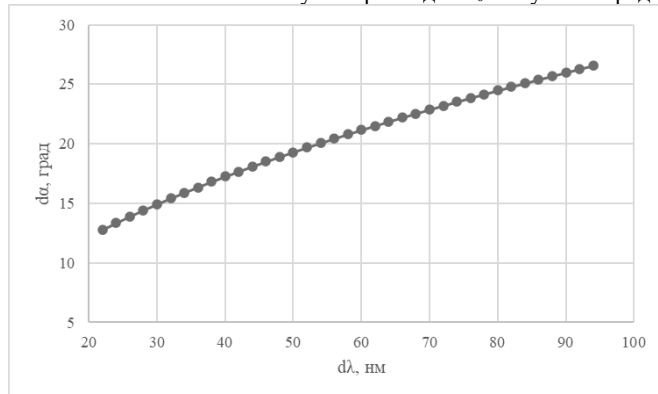


Рис. 4. Отличие длин волн и углов Брэгга от начального

Лучи необходимо развести в пространстве на 5-6°. Такая схема возможна, но сложна в реализации из-за юстировки.

В схеме с волоконным сумматором необходимо фокусировать излучение лазерного модуля в волокно, а выводить с помощью коллиматора, как представлено на рис. 5.

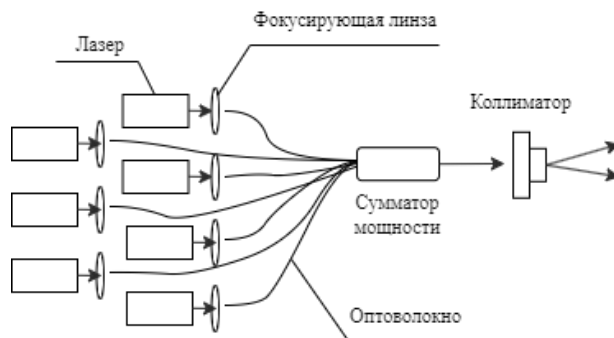


Рис. 5. Объединение излучений волоконным сумматором

Подходящая вариация волоконного сумматора – 7х1, таким образом, на выходе должно быть 31,5 Вт. Можем рассчитать потери мощности на выходе из сумматора по формуле (3):

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{P_0}{P_1} \quad (3)$$

где α – потери на отражение, P_0 – мощность падающего источника, P_1 – отраженная мощность.

Средние потери – 35дБ. Тогда мощность на выходе $P = 31,49$ Вт.

Таким образом, оптимальная схема для увеличения мощности лазерной системы с активной средой Cr:LiSAF является схема объединения излучений на волоконном сумматоре. Выходная средняя мощность должна достигать 31,5 Вт. Такая схема является достаточно габаритной, поэтому уменьшение размеров и увеличение мощности сводится к задаче по укреплению термомеханических характеристик лазерного источника Cr:LiSAF.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент кафедры «И1» А.П. Погода

Библиографический список

1. F. Cassouret, T. Tairaa, Cr:LiSAF DFC chip for high power and broadband tiny integrated laser, Solid State Lasers XXXIII: Technology and Devices, Proc. of SPIE Vol. 12864, (2024).
2. A. Teppitaksak, A. Minassian, G.M. Thomas, M.J. Damzen, High efficiency > 26 W diode end-pumped Alexandrite laser. Opt. Express 22, 16386–16392 (2014).
3. A. Dergachev, J.H. Flint, Y. Isyanova, B. Pati, E.V. Slobodichikov, K.F. Wall, P.F. Moulton, Review of multipass slab laser systems. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 13, 647–660 (2007).
4. U. Demirbas, Power scaling potential of continuous-wave Cr:LiSAF and Cr:LiCAF lasers in thin-disk geometry. Laser Technology Laboratory, Antalya Bilim University (2018).
5. F. Cassouret, T. Tairaa, Cr:LiSAF DFC chip for high power and broadband tiny integrated laser, Solid State Lasers XXXIII: Technology and Devices, Proc. of SPIE Vol. 12864, (2024).
6. U. Demirbas, I. Baali, D.A.E. Acar, A. Leitenstorfer, Diode pumped continuous-wave and femtosecond Cr:LiCAF lasers with high average power in the near infrared, visible and near ultraviolet. Opt. Express 23, 8901–8909 (2015).
7. Е. В. Андреева, С. Н. Ильиченко, Ю. О. Костин, М. А. Ладогин, П. И. Лапин, А. А. Мармалюк, С. Д. Якубович, Широкополосные суперлюминесцентные диоды диапазона 800 – 900 нм с колоколообразной формой спектра, Квантовая электроника, 2013, том 43, номер 8, 751–756.
8. L. Glebov, Volume Bragg Gratings in PTR glass – New Optical Elements for Laser Design, CREOL, 2008.
9. В.И. Балакиш, В.Б. Волошинов, С.Н. Манцевич, Акустооптический эффект и его применение для управления оптическим излучением. Методическая разработка к одноименной задаче "Практикума колебаний" кафедры физики колебаний. – М., изд. физического факультета МГУ, 2020, 27 с.

СЕКЦИЯ 8 ЭКОЛОГИЯ, ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 656.131

К ВОПРОСУ О МЕТОДАХ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ВЫБРОСОВ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ ОТ АВТОТРАНСПОРТА

Е.А. Василенко, А.Г. Лозинский, А.А. Шишкин, П.Л. Лазукин

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Окружающая среда находится под угрозой из-за загрязнения, представляющего серьезную глобальную проблему. Крайне важно активизировать усилия по минимизации вреда, наносимого экономическими субъектами.

Эксплуатация автомобилей, оснащенных двигателями внутреннего сгорания, вызывает значительное потребление нефтяных ресурсов и, как следствие, оказывает существенное негативное воздействие на окружающую среду, в особенности, загрязняя атмосферу. В городских агломерациях, характеризующихся высокой концентрацией автотранспорта, происходит снижение содержания кислорода в воздухе и его загрязнение токсичными компонентами выхлопных газов.

Проблема обеспечения экологической безопасности автомобильного транспорта приобретает все большую актуальность, обусловленную его существенным вкладом в общее загрязнение окружающей среды (39-63%, а в крупных городских центрах до 70-80%).

Эмиссии загрязняющих веществ от автотранспортных средств приводят к комплексному негативному воздействию на все компоненты окружающей среды, от атмосферы и гидросферы до почвы, а также техносферы и ноосферы.

Выбросы загрязняющих веществ от автотранспорта в России достигают более 25 миллионов тонн в год. Выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания представляют собой сложную смесь, включающую более 200 различных вредных веществ и соединений, среди которых присутствуют канцерогенные компоненты.

Автомобильные выхлопные газы – это сложный коктейль, содержащий от 1000 до 1200 различных компонентов. Хотя в их составе есть и безвредные вещества (азот, кислород, водяной пар, углекислый газ), они также содержат опасные токсины, такие как оксиды углерода, углеводороды, оксиды азота, альдегиды и сажу, а также ряд канцерогенов, включая бензапирен, соединения свинца, формальдегид и бензол, представляющих серьезную угрозу для здоровья.

Угарный газ (оксид углерода) — основной токсичный компонент выбросов автомобилей, опасный для живых организмов. Однако, ещё большую опасность представляет взаимодействие этих выбросов с другими загрязняющими веществами в воздухе, приводящее к образованию новых, более агрессивных соединений, таких как смог.

В связи с этим, рассмотрим некоторые методы снижения негативных выбросов в окружающую среду от автотранспорта, их исторические ретроспективы и перспективы развития.

Внедрение нейтрализаторов с целью снижения загрязняющих выбросов.

Внедрение нейтрализаторов в выхлопные системы автотранспортных средств привело к существенному уменьшению суммарного объема выбросов загрязняющих веществ. В Соединенных Штатах Америки, благодаря широкому распространению данной технологии (более 85% автотранспортных средств), за период с 1980 по 1985 год наблюдалось сокращение общей массы выбросов с 76 миллионов тонн до 55 миллионов тонн. Проведенные в Швеции испытания автомобилей, оснащенных каталитическими выхлопными фильтрами, продемонстрировали сокращение выбросов оксида углерода на 34%, углеводородов на 36%, и оксидов азота на 58%, что свидетельствует о высокой эффективности данной технологии.

Процессы каталитического окисления оксида углерода и углеводородов в автомобильных нейтрализаторах требуют дополнительной подачи воздуха, в то время как восстановление оксидов азота протекает без его участия. Конструктивно каталитические нейтрализаторы представляют собой двухкамерные реакторы, в которых осуществляются эти разнонаправленные процессы. Несмотря на широкое применение данных устройств в автомобилях как с бензиновыми, так и с дизельными двигателями, их эффективность в последних оказывается ограниченной из-за избыточного содержания кислорода в отработавших газах, что препятствует процессу восстановления оксидов азота. Как следствие, в дизельных двигателях обеспечивается лишь частичная нейтрализация оксида углерода, несгоревших углеводородов и альдегидов. Помимо этого, в ходе эксплуатации были выявлены и другие недостатки каталитических нейтрализаторов.

Эксплуатация автомобилей на этилированном бензине приводит к быстрому загрязнению поверхности каталитических нейтрализаторов свинцом, сажей и серой, что негативно сказывается на их эффективности и сокращает срок службы.

Применение различных видов природного газа.

Переход на природный газ в качестве моторного топлива открывает перспективные возможности для уменьшения вредного воздействия автомобилей на окружающую среду.

Использование природного газа в ДВС автомобилями способен снизить выбросы негативных компонентов в атмосферу практически на два порядка. Кроме того, переход на природный газ способствует значительной экономии нефтепродуктов. Например, при эксплуатации 1000 автомобилей с газовыми установками позволяет ежегодно сэкономить до 14 500 тонн топлива в грузовых перевозках, до 8 300 тонн в таксомоторных парках и до 45 000 тонн в пассажирских автобусных перевозках.

Переход на газовое топливо, в виде сжиженного или сжатого газа, является экономически и экологически обоснованным решением, позволяющим снизить расходы на охрану окружающей среды и атмосферного воздуха. Газ представляет собой более доступную альтернативу бензину и дизельному топливу, его запасы существенно превышают запасы нефти, а технология производства является более простой и экономичной. Помимо этого, перевод двигателей внутреннего сгорания на газовое топливо не требует существенных конструктивных изменений и обеспечивает снижение уровня выбросов оксидов углерода и азота по сравнению с бензиновыми двигателями, даже оборудованными современными каталитическими нейтрализаторами.

Ключевыми преимуществами газового топлива являются практически полное отсутствие в его составе соединений свинца и серы, а также его способность к образованию однородной смеси с

воздухом, обеспечивающей полное сгорание и высокую топливную экономичность. Данные преимущества особенно проявляются при эксплуатации двигателя в условиях низких температур. Применение газового топлива способствует увеличению срока службы двигателя, поскольку исключает эффект вымывания смазки, свойственный бензину. В настоящее время до 3 миллионов автомобилей в мире используют метан, количество которых непрерывно растет в связи с его экологической безопасностью и экономической привлекательностью. Полная загрузка действующих автомобильных газонаполнительных компрессорных станций позволила бы сократить суммарный объем вредных выбросов на 14%.

Основной трудностью является замена топливной аппаратуры. Увеличение числа автомобилей в городах приводит к загрязнению воздуха выхлопными газами. Поэтому власти некоторых регионов рассматривают возможность использования природного сжатого газа для транспорта. Перевод транспорта на газ также может быть выгоден сельхозпроизводителям, поскольку газ дешевле бензина и дизеля примерно в два раза.

Машины с газовым топливом планируется освободить от проверки на окись углерода. Получат существенные финансовые стимулы для перехода на экологически чистое топливо. Стимулирование газификации транспорта: Частные и коммерческие автомобили будут получать льготы при переводе на газ. Транспорт госпредприятий будет принудительно газифицирован. Газификация автотранспорта значительно снизит выбросы в атмосферу. Италия, Новая Зеландия, США, и Испания демонстрируют успешный опыт внедрения государственных программ по переводу транспорта на газовое топливо. В США налоговые и кредитные льготы, а также государственные субсидии поддерживают газификацию. В Нью-Йорке реализуется программа по переводу такси на газ с выделением специального фонда и финансовыми стимулами. В Италии в 1930 году началась работа по газификации транспорта, а с 2006 года действует национальная экологическая программа по использованию сжиженного природного газа. В Италии стоимость газа существенно ниже стоимости бензина, а налоги на автомобили, работающие на газе, значительно ниже, чем на бензиновые.

Водород-топливо будущего.

Использование водорода в качестве основного источника энергии обещает революционные изменения в технологиях и охране окружающей среды. Экологические преимущества Водород выделяет экологически чистые отработанные газы, практически устраняя загрязнение воздуха. Он горит без вредных выбросов, создавая лишь воду в качестве побочного продукта. Отличные характеристики как топлива Водород обладает чрезвычайно высокой теплотой сгорания и быстрым сгоранием, что делает его идеальным топливом для двигателей. Он также легко воспламеняется, устраняя необходимость сложных систем зажигания. Многократные источники производства Водород можно производить различными способами, включая конверсию топлива на основе углеводов, электролиз воды и газификацию угля. Это гибкость производства обеспечивает надежность и доступность. Усовершенствованное хранение Хотя газообразный водород имеет низкую плотность, его можно хранить в жидком или твердом состоянии. Металлогидриды, особенно интерметаллические сплавы, предлагают компактные и эффективные решения для хранения, позволяя безопасно удерживать большие объемы водорода. Инновационное применение в автомобилях В новых разработках автомобилей с водородными элементами топливными баками выступают интерметаллические аккумуляторы водорода. Эти аккумуляторы высвобождают водород. Электрохимический генератор основан на принципе прямого преобразования химической энергии водорода в электрическую посредством его реакции с кислородом, в результате чего образуется водяной пар. Данный подход позволяет полностью исключить необходимость в двигателях внутреннего сгорания и, как следствие, в их вредных выбросах.

Электрохимические генераторы, функционирующие при температуре кипения воды (100°C) с использованием полимерных электролитических мембран, обеспечивают эффективное прямое преобразование химической энергии водорода в электрическую энергию. Отсутствие процесса синтеза оксидов азота из атмосферного воздуха гарантирует полное отсутствие вредных выбросов в окружающую среду, при этом единственным продуктом реакции является чистая вода.

В основе работы топливных элементов лежит передовая технология экологически чистого производства электроэнергии путем каталитической реакции водорода и кислорода воздуха при прохождении через мембрану. Высокий коэффициент полезного действия топливных элементов (70% и выше) существенно превосходит аналогичный показатель традиционных двигателей внутреннего сгорания (29-48%). Топливные элементы, продемонстрировавшие свою эффективность в специализированных областях, включая космонавтику, в настоящее время находят широкое применение в качестве источников энергии для стационарных и мобильных электростанций, а также на надводных и подводных судах. Широкий круг экспертов рассматривает топливные элементы как перспективную альтернативу природному газу в контексте энергетического рынка.

Некоторые модели автомобилей, используемые двигатели на водородном топливе.

BMW iX5 Hydrogen. Полноценный запуск намечен на 2025 год. Автомобиль мощный (410 л. с.), разгон до «сотни» занимает менее шести секунд, заправка водородом занимает 3–4 минуты, а запаса хватит на 503 км.

Toyota Mirai. 13 Мощность автомобиля составляет около 182 л. с., запас хода — 646 км.

Hyundai N Vision 74. Концепт водородно-электрического гибридного автомобиля оснащён батареей ёмкостью 62,4 кВт и водородным топливным элементом, передающим 671 л. с. на двоянные двигатели, расположенные на задней оси. Ожидается, что автомобиль сможет проехать на одном заряде 600 км.

Honda CR-V FCEV. Кроссовер будет сочетать в себе электрические и водородные технологии. То есть автомобиль можно будет зарядить от розетки для коротких поездок по городу, а для дальних путешествий предусмотрена заправка водородом.

Почему автопроизводители не спешат с массовым производством водородных машин? Причинами являются: дороговизна производства водорода и отсутствие заправочной инфраструктуры; проблемы безопасности из-за взрывоопасности; значительный вес автомобиля, требующий мощных батарей; дорогое обслуживание, включая замену топливных элементов; недостаток квалифицированных сервисных центров; и, наконец, привычка потребителей к традиционному топливу.

Использование отличных от традиционных видов топлива

В настоящее время в мире ведется активная разработка новых видов топлива, в том числе в экологически неблагополучных регионах. Одним из распространенных решений является использование этилового спирта, получаемого из сельскохозяйственных и лесных отходов, в качестве добавки к бензину или дизельному топливу (15-24%).

Правительственная программа "Проалколь", реализованная в период с 1968 по 1973 год, ставила своей целью перевод не менее двух третей автотранспортных средств страны на использование нефтеспиртового топлива. Для реализации данной цели были разработаны и внедрены в эксплуатацию двухтопливные двигатели, конструктивно адаптированные для работы как на бензине, так и на спирте. В результате к 2007 году 75% легкового и 60% грузового транспорта в Бразилии работали на спирто-нефтяном топливе, что привело к значительному сокращению загрязнения воздуха и потребления нефтяного топлива.

Успешный опыт Бразилии в области внедрения альтернативных видов топлива послужил стимулом для ряда других стран, включая Зимбабве, Мозамбик, Южно-Африканскую Республику и государства Юго-Восточной Азии, которые приступили к реализации подобных программ.

С середины 1980-х годов США также начали производство двухтопливных двигателей и разработку альтернативных видов горючего для легковых и грузовых автомобилей.

В Западной Европе широкое распространение получило "биодизельное топливо" для дизельных двигателей. Биодизельное топливо представляет собой горючее, получаемое в результате переработки растительных масел и их отходов с целью извлечения эфиров жирных кислот.

Ключевыми потребителями биодизельного топлива на территории Европейского Союза являются грузовые и междугородные автобусные транспортные средства, на использование которых распространяется запрет на применение стандартного дизельного топлива. Эксперименты с рапсово-метиловым эфиром (РМЭ) показали его высокую экономическую эффективность, низкие капитальные вложения и надежность.

Метанол также рассматривается как многообещающий бензиновый заменитель. Его сгорание выделяет диоксид углерода и воду, что делает его экологически чистым топливом. Кроме того, давление паров метанола значительно ниже, чем у бензина, что минимизирует испарение и загрязнение окружающей среды.

В процессе сгорания метанола в двигателях внутреннего сгорания наблюдается существенное сокращение концентрации двуокиси углерода (в 6 раз) и углеводородов (в 11 раз) в выхлопных газах по сравнению с аналогичными показателями для бензиновых двигателей. Помимо этого, для метанола характерно отсутствие твердых частиц (сажи) и большинства токсичных веществ, за исключением формальдегида.

К числу недостатков метанола следует отнести его относительно низкую энергетическую плотность, обуславливающую примерно вдвое меньшее содержание энергии в аналогичном объеме по сравнению с бензином или дизельным топливом. Однако, метанол обладает рядом существенных преимуществ, таких как высокое октановое число, низкие потери при сгорании, а также возможность повышения степени сжатия в двигателе до 15-кратного значения, что приводит к увеличению его мощности и коэффициента полезного действия. Помимо этого, метанол уменьшает потери тепла при сгорании, что ведет к уменьшению размеров системы охлаждения ДВС. Существует возможность конверсии метанола в синтез-газ (смесь монооксида углерода и водорода) непосредственно на борту транспортного средства с использованием тепла отработавших газов. Данный процесс позволяет существенно повысить КПД, топливную экономичность и экологические показатели двигателя.

К недостаткам метанола следует отнести повышенное содержание формальдегида в выхлопных газах. Однако, метанол обеспечивает значительное сокращение выбросов углеводородов, способных трансформироваться в формальдегид. Перспективы применения метанола обусловлены наличием значительных запасов угля, а также экономической привлекательностью данного вида топлива, цена на которое ниже, чем на бензин. Увеличение спроса на метанол как на транспортное топливо открывает новые рынки сбыта для угольной промышленности.

Выводы.

Анализ методов снижения негативных выбросов в автомобильных газах от автотранспорта показывает возможность существенного снижения негативных последствий от автотранспорта и, тем самым увеличение вклада в экологическое благополучие для будущих поколений.

Библиографический список

1. Мишарин А.С. Актуализация транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [Текст] / А.С. Мишарин, О.В. Евсеев // Транспорт Российской Федерации. - 2023. - № 2 (45);
2. Луканин В.Н., Буслаев А.П., Трофименко Ю.В. и др. Автотранспортные потоки и окружающая среда: Учебное пособие для вузов. М.: ИНФРА-М, 2020;

3. Константинов А.П. Экология и здоровье: опасности мифические и реальные // Экология и жизнь № 8, 2022 г;
4. Корчагин, В.А. Экологическая безопасность автомобильного транспорта: учеб. пособие /В. А. Корчагин, Д. И. Ушаков; под ред. В.А. Корчагина. - Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2008.;
5. Жуков, В.И. Оценка воздействия транспортно-дорожного комплекса на окружающую среду: учеб.пособие/ В. И. Жуков, Л.Н.Горбунова, С. В. Севастьянов. - П-Камчатский:Изд-во Сиб.федер. ун-та,2012.Т.1.

УДК 658.5.012.7

К ВОПРОСУ О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Р.И. Абрамович, П.Л. Лазукин, А.Г. Лозинский, А.А. Шишкин

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Впервые концепция «Экоэффективность» была предложена в начале 1970-х годов в рамках исследований о воздействии человека на окружающую среду. Термин впервые был использован в 1992 году на Саммите Земли, где Стефан Шмидхайне представил доклад, в котором объединил понятия экономики и экологии под эгидой «эко».

Всемирный совет предпринимателей по устойчивому развитию определяет экоэффективность как предоставление конкурентоспособных товаров и услуг, которые удовлетворяют потребности человека, повышают качество жизни и одновременно снижают экологические последствия и потребление ресурсов.

Практически концепция была успешно применена многими компаниями по всему миру. Она оказалась эффективной на микроуровне, способствуя устойчивому развитию бизнеса. Особенно актуальна в регионах с высокими ценами на ресурсы и строгим экологическим законодательством.

Некоторые организации расширяют определение до «стратегии социального действия» по сокращению использования материальных ресурсов, снижению экологических последствий и созданию более справедливого распределения экономического благосостояния. В Австралии экоэффективность понимается как управление, направленное на производство большего количества с меньшими затратами посредством эффективного использования ресурсов и сокращения выбросов.

Европейское экологическое агентство определяет экоэффективность как количество используемой «среды» на единицу хозяйственной деятельности. Глобальный исследовательский центр развития связывает экоэффективность с соотношением между выпуском продукции и воздействием на окружающую среду в процессе производства, потребления и утилизации.

Компания Nokia интерпретирует это как получение более высоких результатов с меньшими затратами материалов и энергии, включая снижение энергопотребления, токсичных выбросов и потребления материалов, а также увеличение срока службы продукции и повторное использование ресурсов.

Toshiba определяет «экоэффективность» как отношение «стоимости продукта» к его «воздействию на окружающую среду». Стоимость продукта оценивается на основе его функциональности, производительности и спроса потребителей. Воздействие на окружающую среду охватывает весь жизненный цикл продукта, включая использование и утилизацию. Следовательно, меньшее воздействие и большая стоимость приводят к более высокой «экоэффективности».

Концепция «экоэффективности» широко применяется в бизнесе, правительстве и управлении. Она отражает уровень влияния экономической деятельности на окружающую среду и способность компаний минимизировать отрицательное воздействие.

Несколько авторов предлагали свои интерпретации «экоэффективности»: Стефан Шмидхайнер: Соединение идей защиты окружающей среды с экономическим ростом. Клаус Норт: Сокращение отходов в производстве для повышения экологической эффективности, энергосбережения и снижения потребления материалов. Джозеф Фиксель: Удовлетворение экономических, качественных и экологических целей путем снижения негативного воздействия на окружающую среду и рационального использования ресурсов. Лоран Гримал: Интеграция технологий «чистого производства» для уменьшения использования материалов, энергии и загрязнения окружающей среды.

Экологическая безопасность, являющаяся ключевым элементом управления окружающей средой, определяется как состояние равновесия в природе и обеспечение комфортной и безопасной жизни для населения. Для ее достижения разрабатываются и внедряются принципы, методы и действия по минимизации негативного воздействия человека, включая меры по надлежащей утилизации отходов и безопасному хранению химикатов.

Концепция «экоэффективности» ставит во главу угла принцип получения максимальных результатов с минимальными затратами ресурсов, отходами и загрязнением. Она охватывает широкий спектр аспектов, включая рациональное потребление ресурсов, социальную ответственность предприятий и устойчивое развитие. В современном мире экоэффективность является ключевым фактором конкурентоспособности, так как защита окружающей среды и устойчивое развитие становятся все более значимыми для потребителей.

Мониторинг экоэффективности служит инструментом, стимулирующим ответственность компаний за экологию и их стремление к устойчивому развитию. Однако для эффективной реализации

этого подхода необходимо активное участие руководства. Поэтому международные организации разработали соответствующие управленческие стандарты.

Исследования, изучавшие процессы добровольной сертификации ISO 14001 и внедрения различных управленческих стандартов, показали, что наиболее активно в эти процессы вовлекаются крупные компании, ориентированные на работу с потребителями и государственными структурами. Также было отмечено, что представители таких отраслей, как нефтепереработка, производство резинотехнических изделий, химическая, электротехническая и фармацевтическая промышленность, проявляют наибольшую склонность к данным процессам.

Противоречивые результаты исследований демонстрируют отсутствие прямой связи между экоэффективностью и экономическими показателями бизнеса, что соответствует принципу, когда инвестиции в экологические проекты осуществляются лишь до тех пор, пока они приносят прибыль.

Концепция экоэффективности строится на идее «нулевых выбросов», которая побуждает к разработке более разумных и рациональных методов, направленных на достижение максимальных результатов при минимальных затратах. Основной акцент при этом делается на осмысленное использование природных ресурсов и энергоресурсов.

Несмотря на разнообразие конкретных подходов к экоэффективности, существующих в различных контекстах, единой целью всех из них остается повышение или хотя бы сохранение ценности товаров, производимых в промышленности, при параллельной минимизации негативного влияния на природные экосистемы. Основная задача здесь состоит в том, чтобы обеспечить максимальную экономическую выгоду, не нанося вреда окружающей среде. Приверженцы данной концепции видят в ней эффективный инструмент для преодоления противоречий, существующих между интересами бизнеса и защитой экологии.

На практическом уровне организации могут достигать экоэффективности путем:

- увеличения производительности труда;
- оптимизации использования ресурсов;
- защиты окружающего мира.

Эти мероприятия способствуют росту производственных показателей, стимулированию инновационных процессов, повышению конкурентоспособности и улучшению экологических характеристик продукции.

Ключевыми принципами экоэффективности являются: сокращение потребления ресурсов и материалов, улучшение их эффективности, снижение токсичности, увеличение объемов вторичной переработки и продление срока службы товаров. Эти стратегии создают линейную схему формирования потоков материалов в промышленных системах, обеспечивая максимально эффективное преобразование ресурсов в отходы, что в свою очередь позволяет извлекать прибыль из их последующей утилизации. Кроме того, стратегии дематериализации и повышения ресурсной эффективности нацелены на достижение или даже превышение текущих объемов производства при использовании меньшего количества материалов.

Анализ основных принципов концепции экоэффективности показывает, что её основное направление связано со снижением потребления ресурсов и уменьшением загрязнения окружающей среды. Однако стоит отметить, что практическое применение этих принципов может обернуться временными экономическими выгодами, но не представляет собой устойчивого решения для гармонизации отношений между промышленностью и экосистемой. Экоэффективные стратегии не устраняют глубинные проблемы, существующие в структуре производственных систем.

В современном промышленном контексте для повышения уровня экоэффективности применяется множество инструментов и методов, направленных на минимизацию воздействия на природу и оптимизацию использования ресурсов. К числу этих инструментов можно отнести:

1. оценка жизненного цикла (LCA): этот метод дает возможность выявить и проанализировать экологические последствия продукта или процесса на всех этапах их жизненного цикла – от производства до финальной утилизации;

2. системы экологического менеджмента (EMS): такие системы, как ISO 14001, предоставляют организационную структуру и инструменты для системного управления экологическими аспектами, что содействует улучшению экологических показателей и соблюдению нормативных требований;

3. зеленые технологии и инновации: разработка и внедрение экологически чистых технологий, таких как возобновляемые источники энергии, переработка материалов и способы контроля выбросов, способны значительно сократить негативное воздействие на окружающую среду;

4. мониторинг и отчетность: регулярное отслеживание экологических показателей и открытое предоставление отчетов позволяют организациям следить за своими достижениями, выявлять области для улучшения и обеспечивать соответствие установленным экологическим стандартам;

5. устойчивое проектирование: внедрение принципов устойчивого дизайна на ранних стадиях жизненного цикла продукта способствует минимизации его влияния на природу и рациональному использованию ресурсов;

6. анализ рисков и возможностей: выявление экологических угроз и потенциальных возможностей позволяет организациям принимать более обоснованные решения, снижая негативные последствия и открывая новые горизонты для повышения экоэффективности;

7. сотрудничество и партнерство: взаимодействие со всеми заинтересованными сторонами, включая поставщиков, клиентов и регулирующие органы, может существенно улучшить обмен информацией, содействовать внедрению инноваций и укреплять совместные усилия по повышению экоэффективности. Кроме того, активное сотрудничество способствует созданию более прозрачных цепочек поставок, что позволяет лучше отслеживать экологические и социальные аспекты

производственных процессов. Это, в свою очередь, может увеличить доверие потребителей, повысить репутацию компаний и обеспечить более устойчивый подход к бизнесу. Успешное партнерство также открывает доступ к новым технологиям и ресурсам, что позволяет компаниям быстрее реагировать на изменения в рыночной среде и снижать негативное воздействие на окружающую среду. В конечном итоге, такое взаимодействие помогает создать более устойчивую экономику, где интересы бизнеса, общества и экологии находятся в гармонии.

Рациональное использование этих инструментов и методов может значительно улучшить параметры экоэффективности в промышленном секторе, уменьшить негативные воздействия на природные экосистемы, оптимально распределить ресурсы и содействовать построению более устойчивого и гармоничного будущего. В частности, внедрение экологически чистых технологий, таких как переработка отходов, снижение выбросов и использование возобновляемых источников энергии, способствует не только улучшению состояния окружающей среды, но и повышению конкурентоспособности предприятий на рынке.

Экоэффективность представляет собой стратегию, направленную на рациональное использование ресурсов и уменьшение негативного воздействия на окружающую среду, одновременно обеспечивая экономическую целесообразность.

Управление экоэффективностью требует комплексного подхода и оптимального использования различных инструментов. Внедрение систем экологического менеджмента, мониторинг и оценка экологических показателей, экоаудиты, экологическая отчетность и применение зеленых технологий способствуют достижению устойчивого развития, уменьшению негативного воздействия на экологию и повышению конкурентоспособности компаний.

Для достижения сбалансированного сочетания экоэффективности и минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду необходимо использовать специализированные методы и стратегии. Эти подходы позволят организациям разумно и безопасно расходовать ресурсы, сокращать объемы отходов и обеспечивать устойчивое развитие. Рассмотрим основные методы управления экоэффективностью, которые могут помочь компаниям повысить свою конкурентоспособность и внести весомый вклад в охрану природы:

1. анализ жизненного цикла (LCA): эта методология предполагает исследование экологических последствий продукта на всех этапах его жизненного цикла – от извлечения сырья до его окончательной утилизации;
2. оптимизация производственных процессов: внедрение принципов «чистого производства» и «экологического дизайна» позволяет значительно сократить количество отходов и использовать ресурсы более эффективно;
3. экономическое стимулирование: реализация финансовых инструментов, таких как экологические налоги или субсидии, поможет поддерживать проекты с минимальным воздействием на окружающую среду;
4. обучение и повышение уровня осведомленности: обучение сотрудников вопросам экологии способствует формированию экологической культуры на всех уровнях компании;
5. управление экологическими рисками: идентификация потенциальных экологических угроз и разработка мероприятий для их минимизации помогает предотвратить негативное воздействие на природу;
6. внедрение экологических инициатив: реализация программ, направленных на охрану среды, таких как утилизация отходов, рациональное использование ресурсов и повышение энергоэффективности;

Применяя эти инструменты и методы, компании в газовом секторе и других отраслях могут не только уменьшить свое негативное влияние на окружающую среду, но и повысить свою конкурентоспособность, соответствуя современным стандартам устойчивого развития.

Адаптация системы экологического менеджмента (СЭМ) открывает широкие перспективы и приносит множество значительных преобразований в деятельность компаний, затрагивая различные аспекты их функционирования. Одной из самых заметных характеристик этой системы является ее способность быстро и эффективно адаптироваться к изменяющимся экологическим стандартам и нормативам. Внедрение СЭМ позволяет организациям не только демонстрировать свою приверженность к защите экологии, но и существенно снизить риски юридических проблем и финансовых штрафов, что крайне важно для устойчивого роста бизнеса.

Система экологического менеджмента выполняет не просто функцию соблюдения норм, но и способствует более эффективному управлению ресурсами, такими как энергия и вода. Она помогает улучшить контроль над бизнес-процессами, распределяя ответственность среди сотрудников на всех уровнях. Рассмотрим подробнее несколько основных и наиболее значимых преимуществ, которые могут обеспечить компании внедрение СЭМ:

1. снижение рисков: проактивный подход к управлению экологическими аспектами значительно снижает вероятность возникновения экологических инцидентов, которые могут нанести серьезный вред экосистемам. Это, в свою очередь, снижает риск судебных разбирательств и финансовых штрафов, что напрямую защищает репутацию компании на рынке;
2. улучшение имиджа компании: организации, которые демонстрируют свою искреннюю преданность экологическим инициативам через внедрение эффективной СЭМ, способны привлекать клиентов, серьезно относящихся к вопросам экологии. Это не только укрепляет доверие к бренду, но и создаёт узнаваемость среди ЦА;
3. повышение эффективности ресурсопользования: глубокий анализ и устранение участков, где ресурсы используются нерационально (включая электроэнергию и воду), позволяют значительно

оптимизировать бизнес- процессы. Результатом этого становятся сокращение затрат и увеличение рентабельности, что является важным индикатором успешности;

4. непрерывное улучшение: системный подход предоставляет компаниям возможность регулярно совершенствовать свои экологические результаты. Установка конкретных целей, постоянный мониторинг достижений и внесение необходимых коррективов формируют культуру устойчивого развития – важную составляющую более ответственного и безопасного экологического будущего.

Внедрение системы экологического менеджмента играет ключевую роль в достижении значительных положительных изменений в области экологии, одновременно позволяя компаниям реализовывать свои бизнес-цели и создавать долгосрочную ценность для всех заинтересованных сторон. Будь это улучшение процессов по сокращению отходов, снижение выбросов парниковых газов или применение экологически чистых технологий, результаты внедрения СЭМ проявляются через комплексное влияние на все аспекты деятельности организации.

При соблюдении международных стандартов, таких как ISO 14000, компании получают обширный спектр дополнительных преимуществ.

В целом, преимущества внедрения системы экологического менеджмента становятся все более очевидными в свете современных вызовов и угроз. Эффективная СЭМ не только помогает организациям адаптироваться к изменяющимся условиям, но и подчеркивает их необходимость в рамках современного бизнеса, создавая устойчивую платформу для будущего роста и процветания.

Внедрение принципов устойчивого развития в газовой отрасли требует комплексного подхода, включающего как технологические инновации, так и изменения в управленческой практике. Только такой подход позволит компаниям не только соответствовать экологическим стандартам, но и получать значительные экономические выгоды от своей деятельности.

Библиографический список

1. Айзман, Р.И. Экологическая и продов.безопасность: учебное пособие / Р.И. Айзман, М.В. Иашвили, С.В. Петров и др. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2024..
2. Бобылев С. Н. Экономика устойчивого развития: учебник / С.Н. Бобылев //– М.: КНОРУС, 2021. –(Бакалавриат и магистратура).
3. Elsayed K., Paton D. The impact of environmental performance on firm performance: static and dynamic panel data evidence // Structural Change and Economic Dynamics. 2005. – № 3. doi: 10.1016/j.strueco.2004.04.004.
4. Егорова С.Е., Богданович И.С., Кистаева Н.Н. Экологические показатели как инструмент сбалансированного развития экономики // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2020. Т. 13, № 6. DOI: 10.18721/JE.13601.
5. Гайсин Р.С. Статистический анализ затрат на охрану окружающей среды в России / Р.С. Гайсин, Ю.Н. Романцева, А.Е. Ульянов // Вопросы статистики. 2020. – Т. 27. - № 1.- DOI 10.34023/2313-6383-2020-27-1-85-96.

УДК 621.45+539.23

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК Zn-Cu-Ti-O ОБЛАДАЮЩИХ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЭКСТРАКЦИОННО-ПИРОЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А. О. Захарова¹, Ф. Э. Кожевников²

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

²АО «СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз - Антей» - Обуховский завод»

Аннотация:

Риск развития и распространения болезнетворных бактерий на поверхностях и предметах велик повсеместно. Произведено исследование плёночных покрытий на основе металлов, обладающих антибактериальными свойствами с целью выявить наиболее эффективный способ получения покрытия и состав композиции из которого оно получено. В результате был выявлен наиболее эффективный образец на основе композиции экстрактов металлов, смешанных в соотношении Zn:Ti:Cu = 6:1:3. Также продиагностирована эффективность применения покрытия в помещениях.

Ключевые слова: антибактериальные покрытия, тонкие пленки, оксиды меди и титана, экстракционно-пиролитический метод, антибактериальный тест

Введение

Эффективность оксидов отдельных металлов в борьбе с патогенными микроорганизмами относительно хорошо подтверждена. Химические и молекулярные механизмы антимикробных свойств металлов исследовались на протяжении многих лет. Однако, применять их в чистом виде в качестве покрытий – дорогостоящее решение.

Исследование антибактериальной активности покрытий, полученных экстракционно-пиролитическим способом, позволяет расширять состав для приготовления композиции для получения тонких плёнок и, вместе с тем, удешевлять технологию.

Актуальность разработки тонких оксидных плёнок, которые обладают антибактериальными свойствами достаточно высока, ввиду необходимости внедрения новых мер, направленных на антибактериальную защиту и отсутствия недорогой, доступной технологии нанесения покрытий [1].

Задачами выполнения работ являлись: исследования и доказательства антибактериальных свойств, полученных образцов покрытий, разработка технической методики получения покрытий, обладающих антибактериальными свойствами.

Были получены экспериментальные образцы с различными составами, проведен антибактериальный тест. В результате этих исследований была доказана антибактериальная активность плёнок $\text{Zn}:\text{Ti}:\text{Cu} = 6:1:3$, а также обоснованы их антикоррозионные свойства.

Также, была разработана техническая методика получения покрытий, представляющая из себя определенную последовательность действий: приготовление композиции, нанесение композиции на деталь, отжиг и охлаждение. Отжиг и охлаждение циклируются до тех пор, пока не будет достигнута необходимая толщина покрытий.

В итоге выполнения работы был получен следующий технический результат: выявлен оптимальный состав композиции для получения антибактериальных покрытий, который обладает меньшей стоимостью приготовлению по сравнению с аналогичным составом, разработан и отработан технологичный метод получения антибактериальных плёнок.

В дальнейшем развитии проекта планируется исследование вариантов составов композиции с целью удешевления себестоимости изготовления покрытий.

1. Исследование состава композиции

Целью исследования является определение основного состава композиции, вследствие термической обработки которой, будут получены антибактериальные покрытия.

Были рассмотрены металлы с наиболее подтвержденными антибактериальными свойствами, органические кислоты которых имеют невысокую стоимость, а именно: медь, цинк, титан.

1.1 Обоснование антибактериальных свойств применяемых металлов

В результате оценки ряда металлов, критерием которой являлись доступность в приобретении, необходимых для реализации разработки, прекурсоров и надежности, относительно проявления антибактериальных свойств, были отдельно рассмотрены такие металлы, как: медь, титан, цинк.

Медь достаточно эффективна против патогенных микроорганизмов. Её свойства хорошо изучены и подтверждены [2,3]. Было выявлено свойство комплексности относительно антимикробной активности меди. Медные комплексы могут образовывать радикалы, которые инактивируют вирусы. Медь, подобно другим переходным металлам, может нарушить структуру и функции ферментов путем связывания с тиоловой группой или другими группами белковых молекул. Ионы меди могут вызывать инактивацию белков, также, при хелатировании, медь может способствовать разрушению связей ДНК. Cu^{2+} также может образовывать комплексы с мРНК, тем самым играя важную роль в уничтожении вирусов. Вещества или прекурсоры, имеющие в составе ионы меди –доступны, свободны в продаже и имеют сравнительно небольшую стоимость.

Титан и (и его диоксид) является фотоактивным элементом. В результате проводимых испытаний над этим химическим элементом, было доказано, что его наличие на облучаемой УФ поверхности ингибирует рост культуры сенной и кишечной палочек [4,5]. Он часто используется в фотокаталитическом процессе, как один из самых перспективных, химически и термически стабильных и нетоксичных продуктов с низкой ценой.

Цинк – широко распространён в производстве антимикробных средств, и медикаментов. Антибактериальные свойства цинка связаны с его способностью иона цинка (Zn^{2+}) связываться с сульфгидрильными группами (-SH) на поверхности клеточных стенок бактерий, что приводит к нарушению их функционирования и в конечном итоге к гибели бактерий. Нанесение цинковых соединений на кожу оказывает антисептическое действие, способствуя заживлению ран и предотвращая развитие инфекций. В медицине используются препараты на основе цинка для лечения кожных заболеваний, таких как экзема и псориаз. Цинк снижает активность токсинов, вызывающих дизентерию и другие кишечные заболевания, ингибирует активность возбудителей сифилиса и возвратного тифа, угнетает активность стрептококков, в культурах стафилококков и синегнойной палочки [4].

1.2 Выбор состава композиции

В результате обзора механизмов антибактериальной активности меди, титана и цинка, а также ввиду низкой стоимости приготовления растворов неорганических солей этих металлов (CuCl_2 , TiOSO_4 , ZnCl_2), был сделан вывод о целесообразности использования Cu , Ti , Zn в приготовлении композиции для получения антибактериальных покрытий.

2. Разработка композиции для дальнейшего нанесения на подложки

Для реализации разработки по получению антибактериальных покрытий было выбрано применение экстракционно-пиролитического метода [1]. Первостепенной задачей являлась разработка композиции, на основе которой в дальнейшем будут получены плёнки, обладающие антимикробными свойствами.

2.1 Метод получения композиции

Поставленная задача решается тем, что для приготовления композиции экстрагировали Cu , Ti и Zn из растворов неорганических солей CuCl_2 , TiOSO_4 , ZnCl_2 . Экстрагентом являлась смесь карбоновых кислот (энантовая, каприновая, каприловая, янтарная, пеларгоновая, молиновая). Данные кислоты – вторичный продукт нефтепереработки и имеют низкую стоимость. Экстракция проходила по

катионообменному механизму. Немаловажно, что чистый прекурсор в данном случае формировался за счёт того, что примесные ионы и анионы неорганических солей не экстрагировались вследствие особенности процесса проведения экстракции.

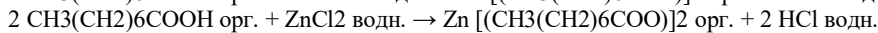
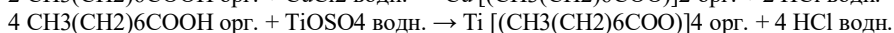
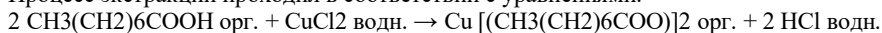
Экстракция целевого металла происходила посредством добавления раствора с содержанием эквивалентного количества гидроксида натрия, что способствовало переходу целевого металла в раствор: органическая фаза – карбоксилат целевого металла, далее было произведено контактирование со свежим раствором неорганической соли для полного замещения катионов натрия на катионы экстрагируемого металла. Описанная в данном абзаце последовательность действий циклировалась 2-4 раз. Далее, производилась фильтрация раствора через бумажный фильтр.

Чтобы уточнить заданную концентрацию металла в растворе, была проведена реэкстракция полученной экстракции (1 мл) в растворе 10-20 % HCl (50 мл). Далее, на приборе для проведения метода атомной абсорбции ААС-1М, реэкстракт был проанализирован.

В результате вышеописанной последовательности действий, была получена чистая органическая соль металла с уточненной концентрацией самого металла в ней. Соли металлов, полученные таким образом и смешанные в определённом соотношении и являлись истиной композицией для получения антибактериальных покрытий.

Экстракцию отдельных компонентов сложного оксида (меди, цинка и титана) проводили с помощью органического экстрагента $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$ из растворов их неорганических солей (CuCl_2 , ZnCl_2 , TiOSO_4).

Процесс экстракции проходил в соответствии с уравнениями:



В результате, были получены опытные образцы покрытий с соотношениями компонентов ZnO ; $\text{ZnO}, 9\text{TiO}, 1$; $\text{ZnO}, 5\text{TiO}, 5$; $\text{ZnO}, 6\text{TiO}, 1\text{CuO}, 3$ на стеклах и стеклянных шариках. Экстракционно-пирролитический метод получения антибактериальных покрытий на основе оксидов меди-титана был запатентован авторами. [5]

3. Проведение антимикробного теста

Полученные экспериментальные образцы с соотношением металлов в композиции, на основе которых были получены покрытия: $\text{Zn}:\text{Ti} = 9:1$, $5:5$; $\text{Zn}:\text{Ti}:\text{Cu} = 6:1:3$, а также раствор органической соли Zn, для получения ZnO исследовали на устойчивость к грамотрицательной бактерии *Escherichia coli* ML35 p и грамположительной *Staphylococcus aureus* SG 511.

Покрытия были нанесены на разные типы подложек – круглые покровные стекла, диаметром 13 мм и стеклянные шарики диаметром 5 мм. Результаты антимикробного теста представлены на рисунке 1 и 2:

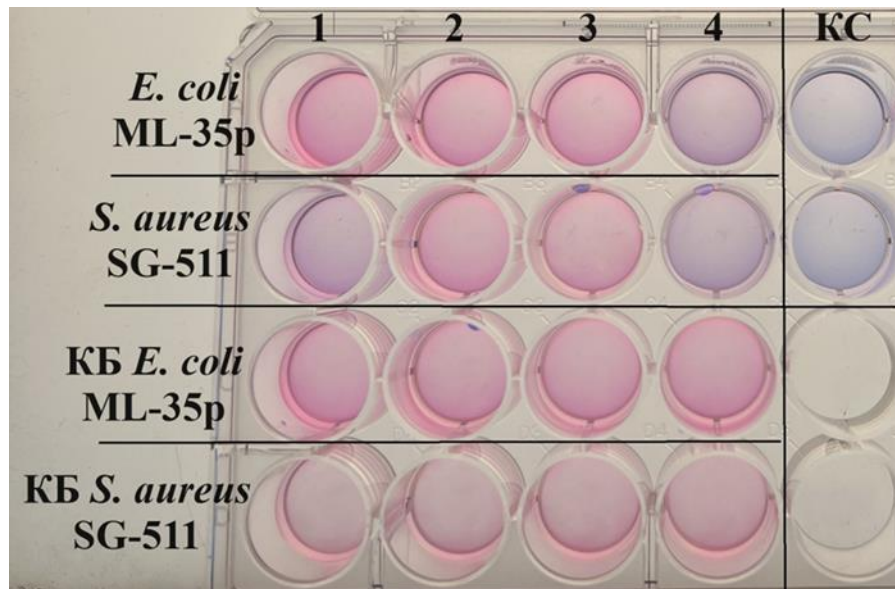


Рис. 1 – Результаты антимикробного теста на стёклах:
Стекла: 1. ZnO ; 2. $\text{ZnO}, 9\text{TiO}, 1$; 3. $\text{ZnO}, 5\text{TiO}, 5$; 4. $\text{ZnO}, 6\text{TiO}, 1\text{CuO}, 3$; KC – контроль среды

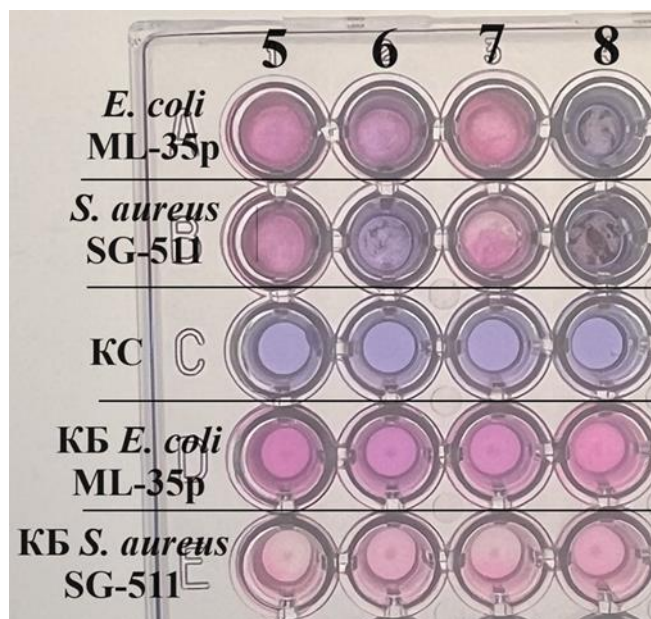


Рис. 2 – Результаты антимикробного теста на шариках:
5. ZnO; 6. Zn_{0,9}Ti_{0,1}; 7. Zn_{0,5}Ti_{0,5}; 8. Zn_{0,6}Ti_{0,1}Cu_{0,3}

Антибактериальный тест проводился следующим образом: в лунки планшета вносили смесь суспензии грамотрицательных и грамположительных бактерий с питательной средой - бульоном Мюллера-Хинтона. Также использовался маркер жизнеспособности бактерий – резазурин. После его добавления в пробы голубая окраска свидетельствует об ингибировании роста бактерий (продукты дыхания бактерий отсутствуют). Розовая окраска свидетельствует о наличии живых, метаболизирующих бактерий. Лунка, в которую не вносили ничего, кроме бактерий, была положительным контролем, лунка, где была только питательная среда - отрицательным контролем.

КБ - контроль жизнеспособности бактерии (бактерия без стекол/шариков);

КС - контроль стерильности среды - среда без бактерии и шариков/стекол.

3.1 Результаты антимикробного теста

Проанализировав результаты антибактериального теста можно сделать следующие выводы:

Для образца Zn_{0,6}:Ti_{0,1}:Cu_{0,3} активность проявилась против обеих исследованных видов бактерий, как для стекол, так и для шариков (голубая окраска).

ZnO оказался малоактивным (розовая окраска раствора).

У других оксидов результаты теста для стекол и шариков различаются. Следовательно, сложно сделать вывод о достоверности их антибактериальной активности.

В результате, можно выделить гарантированно эффективный состав [4] для получения антибактериального покрытия представляющей из себя экстракты металлов, смешанные в соотношении Zn:Ti:Cu = 6:1:3.

Полученный состав с доказанной эффективностью был оформлен как заявка на изобретение №2024132658 «Композиция для получения антибактериального покрытия Zn-Cu-Ti-O экстракционно-пиролитическим методом».

Помимо антибактериальных свойств, полученные из этого состава плёнки обладают антикоррозионной активностью.

Проявление высоких антикоррозионных свойств покрытий на основе данной композиции обусловлено образованием комплексного оксида металлов Zn-Cu-Ti-O, который служит барьером между атмосферой и металлической подложкой. Особенности тонких пленок, нанесенных из раствора, является чистота и однородность фазового и гранулометрического составов. Полное смешение компонентов в смеси экстрактов способствует получению однородных или однородных смесей, тем самым образуется равномерное покрытие, защищающее металлическую подложку от воздействий окружающей среды. Присутствие цинка в составе композиции повышает коррозионностойкие свойства покрытия, так как этот элемент обеспечивает катодную защиту металлической подложки, обладая низкой электроотрицательностью. Цинк способен вступать в электрохимическую реакцию, являясь сильным восстановителем [6].

4. Эффективность применения разработки

Исследовать и оценить инкубацию роста бактерий можно при помощи средств компьютерного моделирования. Было рассмотрено замкнутое пространство –комната, на стенки которой было нанесено антибактериальное покрытие.

Для составления математической модели необходимо принять ряд допущений:

Молекулы газа представляются как сферы известной массы и радиуса, между которыми отсутствуют силы межмолекулярного взаимодействия;

Рассматривается замкнутый объем без притока или оттока воздуха;

Соударение молекул между собой и со стенками абсолютно упругое;
 В объеме число молекул, намного меньше, чем реальное число молекул в таком же объеме при нормальных условиях;

Размер молекул много больше, чем размер реальных молекул;

В начале моделирования, во избежание «наложения» молекул друг на друга, они располагаются в узлах регулярной сетки, в заданном объеме. Скорость молекул после столкновения выводится из закона сохранения импульса и энергии. Компоненты вектора скорости задаются случайным образом, итоговое распределение скоростей должно подчиняться статистике Максвелла-Больцмана, — это критерий корректности модели. [7]

При столкновении со стенками расчетной области происходит смена знака компонентов вектора скорости v на противоположный.

Температура в объеме (куб $10 \times 10 \times 10$ м) задается 293К, в начальный момент принимается, что все 4000 молекул не обеззаражены, масса молекулы считается аналогичной воздуху.

По результатам моделирования, можно сделать вывод о скорости обеззараживания и зависимости процента загрязнённых молекул от времени (рис. 3). [8]

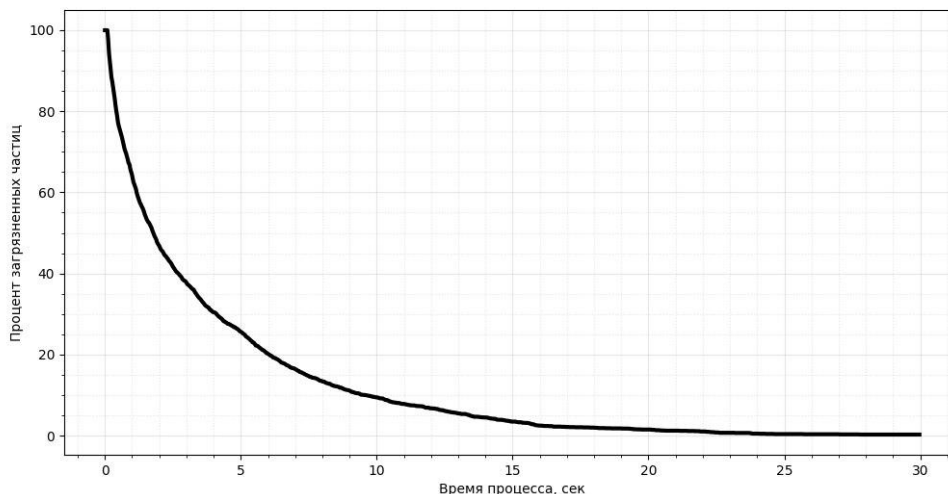


Рис. 3 – Зависимость процента загрязнённых частиц от времени

Полное обеззараживание заданного объема произойдёт за 25 секунд, зависимость процента зараженных частиц от времени не является линейной. Развитием данной задачи может быть выявление зависимости времени обеззараживания от числа молекул в модели.

Ниже представлены два рисунка, которые показывают (красным) не обеззараженные молекулы (рис. 4) и молекулы, которые уже столкнулись со стенками (синий) (рис. 5):

Зараженных частиц: 92.3% | Время: 0.21 сек.

Зараженных частиц: 1.7% | Время: 13.68 сек.

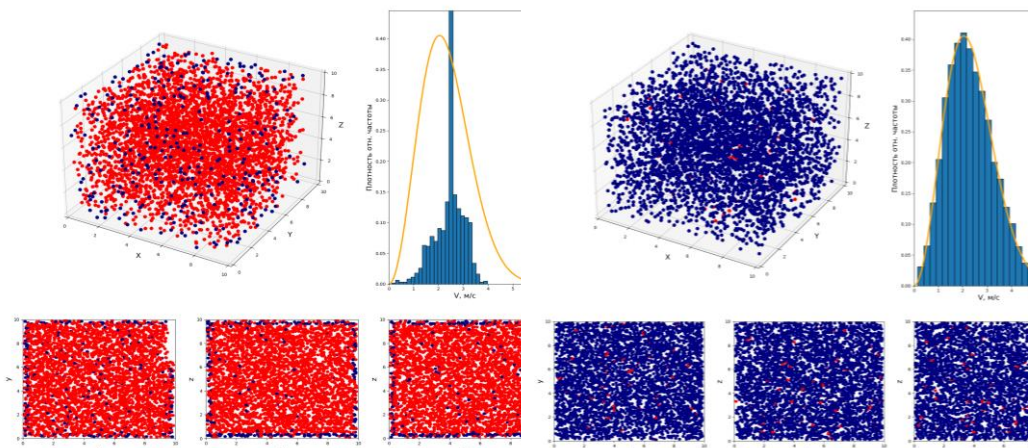


Рис. 4 – Распределение молекул в начальный момент времени

Рис. 5 – Распределение молекул по прошествии 13.7 секунд

Заключение

В результате работы был выявлен состав композиции для получения тонких оксидных плёнок на основе металлов экстракционно-пиролитическим способом. Соотношение экстрактов цинка, меди и титана составили $\text{Zn}:\text{Ti}:\text{Cu} = 6:1:3$. Образцы с применением данной композиции были протестированы в институте экспериментальной медицины РАН г. Санкт-Петербург. Эффективная композиция была оформлена в виде заявки на изобретение №2024132658 «Композиция для получения антибактериального покрытия Zn-Cu-Ti-O экстракционно-пиролитическим методом». [9]

Пленочное покрытие, полученное экстракционно-пиролитическим методом, позволит снизить риск распространения и развития микроорганизмов на поверхностях и предметах при применении данной технологии в общественных местах, специализированных производствах, в транспорте и в быту. В результате исследования скорости обеззараживания молекул в замкнутой комнате (без притока и оттока воздуха), было установлено, что взаимодействие всех молекул с покрытием происходит за малое время, что также позволяет считать разработку эффективной для применения как средства антимикробной защиты в различных учреждениях.

Научный руководитель — д.т.н., проф. Т.Н. Патрушева

Библиографический список

1. Патрушева Т.Н., Петров С.К., Владимирова Е.В., Захарова А.О., Холькин А.И. Антибактериальные покрытия оксида меди-титана, полученные экстракционно-пиролитическим методом // Химическая технология. 2021. № 11. С. 482—487.
2. Michaels H.T. Copper alloys in the fight against microorganisms // Plumbing Standarts 2004. № 4. P.22-34.
3. Anyaogu K. C., Fedorov A. V., Neckers D. C. Synthesis, Characterization, and Antifouling Potential of Functionalized Copper Nanoparticles// Langmuir. 2008. Vol. 24, No. 8. P. 4340-4346.
4. С.Б.Чекнёв, Е.И.Вострова, М.А.Сарычева, А.В.Востров, Ингибирование гемолитической активности streptococcus pyogenes в механизмах антибактериального действия катионов цинка // Коллектив авторов 2019. С. 16-23.
5. Захарова А.О., Патрушева Т.Н. Способ получения антибактериального покрытия Cu-Ti-O экстракционно-пиролитическим методом. Пат. 2801505 РФ. 2022.
6. Проскуркин Е.В. Защитные цинковые покрытия для жёстких коррозионно-эрозийных условий эксплуатации // Теория нефтегаз. 2007. №9. С. 42-50.
7. Сивухин Д.В. Механика. — М.: Наука, 1979. — 520 с.
8. Программирование для «нормальных» с нуля на языке Python: Учебник. В двух частях. Часть 1 / Ответственный редактор: В. Л. Черный — М.: Базальт СПО; МАКС Пресс, 2018. — 176 с. [+4 с. вкл]: ил. — (Библиотека ALT).
9. Захарова А.О. Композиция для получения антибактериального покрытия Zn-Cu-Ti-O экстракционно-пиролитическим методом Заявка №2024132658. 2024.

УДК 539.216.2

КАТАЛИТИЧЕСКИЕ НАНОПОКРЫТИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ МЕТАНА

А. Ю. Мильчаков

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Сокращение запасов ископаемого топлива, рост цен на нефть сделали поиск альтернативных источников энергии значимым во всем мире. В этой связи преобразование использования биотоплива предлагает новую парадигму исследований в меняющемся мире.

По сравнению с бензиновым топливом, биотопливо имеет ряд преимуществ:

1. Использование биогаза в качестве топлива позволяет снизить вредные выбросы;
2. Производство биогазового топлива дешевле чем производство бензинового топлива;
3. Положительное влияние на двигатели автомобилей.

Биогаз содержит следующие компоненты: метан — CH_4 , водород — H_2 , кислород — O_2 , оксид углерода — CO , сероводород — H_2S и др. [1] На рисунке 1 представлен примерный состав биогаза

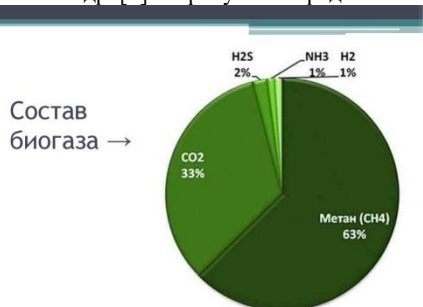


Рисунок 1 – Состав биогаза [1]

Качество биогаза определяется в первую очередь содержанием метана. Углекислый газ разбавляет биогаз и снижает его энергетические показатели. Кроме того, биогаз содержит влагу, сероводород, органические примеси. В связи с этим очистка биогаза для создания качественного топлива имеет важное значение. Для получения качественного топлива на биогазе необходима очистка газа с эффективностью до 80% и более содержания метана.

На современных газовых производствах активно применяются традиционные методы очистки биогаза, однако они имеют множества недостатков, таких как недостаточная степень очистки, высокое энергопотребление и большие финансовые затраты.[2] Сегодня существует множество способов разделения газовой смеси. Адсорбционные, абсорбционные, мембранные и криогенные методы

являются наиболее распространенными методами. Известные способы очистки биогаза можно разделить на три группы: химические; механические; термобарические. Более детально данные методы представлены на рисунке 2.

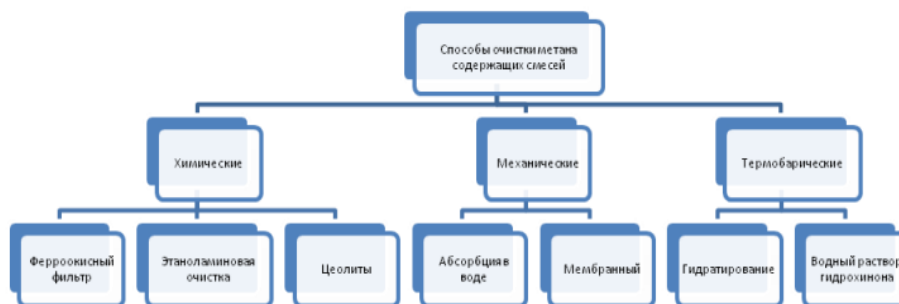


Рисунок 2 – Способы очистки метана [3]

Принцип действия адсорбционной установки представлен на рисунке 3. Адсорбционный способ основан на адсорбции активированным углем. При применении такой методики органические соединения удаляются на насадке с активированным углем. Адсорбция происходит по двухступенчатой технологии очистки, под давлением 150 кПа

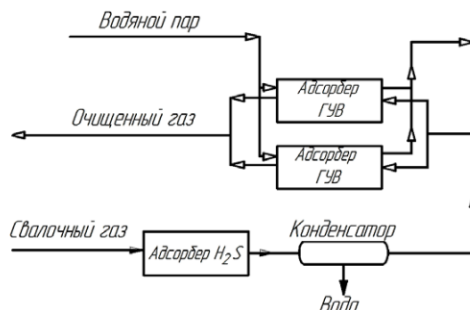
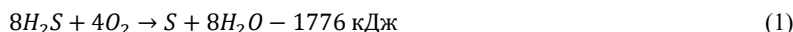


Рисунок 3 – Принципиальная схема адсорбционной установки очистки биогаза [4]

С применением фильтра на основе активированного угля сероводород окисляется до элементарной серы, которая сорбируется в порах активированного угля. Окисление проходит согласно формуле:



Образовавшаяся элементарная сера адсорбируется внутренними поверхностями пор активированного угля, а очищенный биогаз насыщается водяными парами. На втором этапе очистки газ повторно пропускают через насадку с активированным углем для удаления тяжелых и галогенсодержащих углеводородов. Галогенсодержащие соединения удерживаются за счёт сил Ван-дер-Ваальса. Далее активированный уголь очищают путем десорбции, сушат и охлаждают перед повторным использованием. Смесь пара и галогенсодержащих соединений конденсируется, а конденсат отводится в систему водоотведения.

Очистка биогаза от оксида углерода (CO_2) может производиться различными способами. К наиболее распространенным методам относятся: промывка газов через жидкие поглотители (например, воду), вымораживание, адсорбция при низких температурах.

Мембранный метод разделения основан на пропускании через мембрану сжатого компрессором биогаза: давление биогаза при помощи компрессора повышают до 10 и более атмосфер и подают его в мембранный модуль. В итоге затраты на самообеспечение такой установки достигают до 30% от выработанной энергии.

Представляет интерес использование каталитической нейтрализации и фильтров очистки отработавших газов.

Наиболее распространённый метод очистки природного газа – **использование двухслойных фильтров**. [5] В первую очередь фильтрация не является энергозатратным и дорогостоящим методом, однако вопрос получения необходимой степени очистки остаётся открытым. Фильтр имеет два слоя: полимерная или стальная мембрана и каталитическое покрытие. Основная проблема – поиск необходимого материала покрытия, который способен обеспечить необходимую степень очистки биотоплива.

В перспективе, данную проблему может решить применение каталитических нанопокровов на основе оксидов металлов, которые имеют необходимые свойства.

Тщательный анализ результатов недавних исследований в области нанотехнологий для очистки биотоплива показывает, что в то время как некоторые из них касались общего применения наночастиц для производства биотоплива, другие изучали эффективность нескольких категорий наноматериалов

для очистки биотоплива. Нанокатализаторы на основе оксидов магния, циркония, цинка, кальция и титана тестировались в переработке биодизеля и показали значимые результаты.

Перовскитные катализаторы привлекли огромный исследовательский интерес в различных реакциях (например, окисление толуола, окисление ЛОС, горение CH_4 , восстановление CO_2) из-за их гибкого состава, настраиваемых поверхностных свойств и превосходной термической стабильности. [4],[5],[6],[7] Среди перовскитов LaMnO_3 демонстрирует относительно высокую каталитическую активность, поскольку сосуществование Mn^{3+} и Mn^{4+} улучшает реакционную способность решеточных видов кислорода с метаном. [8]

Большинство оксидов металлов просто синтезируются и имеют невысокую стоимость. Для увеличения эффективности конверсии, оксиды металлов изготавливают в наноразмерном масштабе, чтобы увеличить площадь поверхности и пористость, свести к минимуму выщелачивание ионов металлов и повысить их способность переносить кислотные воздействия и термическую стабильность. Оксиды магния, кальция, титана, цинка и циркония эффективно используются в качестве гетерогенных катализаторов для стимулирования производства биодизельного топлива благодаря своим уникальным свойствам, как показано в таблице 1. [5]

Таблица 1 - Основные свойства широко используемых катализаторов из оксидов металлов для очистки биодизельного топлива. [5]

Катализатор	Каталитические свойства
Оксид магния	Мелкокристаллическое порошкообразное вещество белого или светло-серого цвета, без запаха. Поглощает воду и другие жидкие вещества, при этом не растворяется в воде и других жидкостях. При нагревании более 2000 градусов становится летучим
Оксид кальция	Оксид кальция гигроскопичен и легко присоединяет углекислый газ из воздуха. Активный оксид способствует очистке поваренной соли от карбонатов. А в промышленных производствах используют для адсорбции SO_2 из дымовых газов.
Оксид титана	TiO_2 позволяют повысить эффективность технологических процессов очистки воды и воздуха от токсичных органических примесей, осуществить синтез водорода с помощью фотолиза воды, а также восстановить CO_2 до CH_4 и его гомологов. Для большинства реакций диоксид титана в фазовом состоянии анатаза проявляет более высокую активность, чем другие полиморфные модификации.
Оксид цинка	Каталитические свойства оксида цинка заключаются в его способности выступать в роли катализатора, например, в процессах фотохимического окисления органических соединений. Повышенная каталитическая активность наночастиц оксида цинка достигается благодаря высокоразвитой поверхности (более $1500 \text{ м}^2/\text{г}$) и равномерному распределению активных центров на их поверхности.
Оксид циркония	Оксид циркония может использоваться в качестве катализатора для получения диметилового эфира путём дегидратации метанола. Активность катализатора зависит от содержания диоксида циркония, которым определяются кислотные свойства поверхности контакта. Сульфатированные катализаторы на основе оксида циркония эффективны при изомеризации низкомолекулярных алканов от бутана до гексана, а для изомеризации алканов гексангептановых фракций наиболее эффективны вольфраматсодержащие катализаторы.

Для фотокаталитической очистки биогаза от загрязнителей используется фотокатализатор на основе оксида титана. При таком процессе обязательное условие – химическая неизменность фотокатализатора в конце цикла превращений. В общем виде процесс превращения органических соединений на поверхности TiO_2 под действием УФ-света можно представить в виде схемы (рисунок 4). [6]

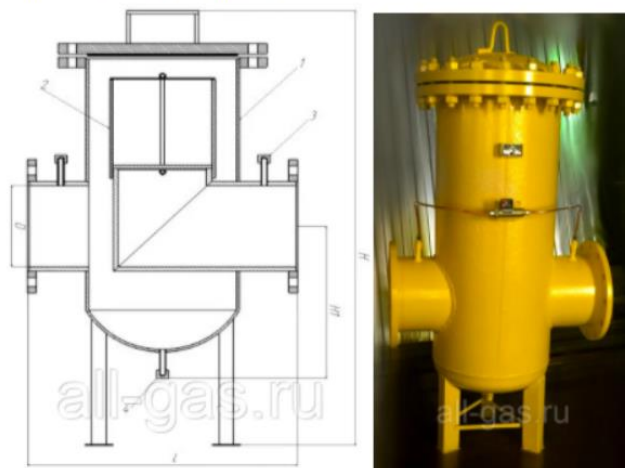


Рисунок 4 - Процесс превращения органических соединений на поверхности TiO_2 под действием УФ-света, где: ГОС – газообразные органические субстраты [6]

Фотокатализатор наносится на поверхность фильтрующего элемента газового фильтра модели 12/250 для очистки в промышленных помещениях.

Конструкция фильтра представляет собой вертикальный цилиндрический ёмкостный аппарат с верхней крышкой (люком) для монтажа и периодической очистки фильтрующих элементов (картриджей). **Фильтрующий элемент газового фильтра ФГ-12/250** состоит из фланцев и металлической сетки. При прохождении газа через фильтр одна часть механических примесей осажается на фильтрующем элементе, другая вместе с частью конденсата накапливается в донной части корпуса. Степень загрязнения фильтра определяется по перепаду давления на фильтрующем элементе, измеряемому прибором, подсоединённым к штуцерам. Схема и модель фильтра очистки, с поверхностью, обработанной оксидом титана представлена на рисунке 5.

Устройство и габаритные размеры:



D - 250 мм; L - 950 мм; H - 1500 мм; H1 - 650 мм; 280 кг.

1. - Корпус фильтра; 2. - Фильтрующий элемент; 3. - штуцер/патрубок для подключения манометра или ИПД (ДПД); 4. - кран для слива конденсата.

Рисунок 5 – Фильтр газа модели 12/250 [5]

Максимальная пропускная способность фильтров ФГ (Q_{max}) при $P \neq 1,2$ МПа и $\Delta P \neq 2500$ Па (на чистом фильтре) определяется следующим образом:

$$Q_{max} = Q * \sqrt{\frac{\Delta P_n}{2500} * \frac{(P_n + 0,1)}{1,3}} \quad (1)$$

Был проведён сравнительный анализ процесса очистки биогаза с помощью фильтра с покрытием оксида титана под максимальным расчётным давлением в 1,6 МПа биогаза до нанесения нанопокртия на основе оксида титана и после обработки фильтрующего элемента. В таблице 2 представлены значения параметров, влияющих на пропускную способность фильтра.

Таблица 2 – Основные технические параметры фильтра газа 12/250

Наименование фильтра	Материал фильтрующего элемента	Максимальная пропускная способность при P_{Nmax} 1,2 МПа $nm^3/ч$,	Условный проход (DN), мм	Перепад давления на загрязнённом фильтре (ΔP), кПа:	Пропускная способность после перепада давления, $nm^3/ч$
ФГ 12/250	12X18H10T	10000	12	5	16260

По результатам исследования при повышении перепада давления повысилась пропускная способность фильтра, что повлияло на увеличение концентрации чистого метана. Результаты полученных значений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Компонентный химический состав биогаза до и после очистки фильтрами с применением TiO_2 и без применения TiO_2

Наименование компонента	Концентрация биогаза до очистки, %	Концентрация биогаза после очистки без с TiO_2 , %	Концентрация биогаза после очистки с TiO_2 , %
-------------------------	------------------------------------	--	--

Углекислый газ	33,8410	14,228	6,6646
Метан	66,1420	85,744	93,3354
Этилен	0,0007	0,0000	0,0000
Бутан	0,0120	0,0000	0,0000
Гексены	0,0019	0,0000	0,0000
Гексаны	0,0014	0,0000	0,0000
Бензол	0,0019	0,0000	0,0000
Сероводород	0,0048	0,0028	0,0000

Как показал эксперимент, концентрация метана в биогазе после очистки с применением катализатора на основе оксида титана значительно изменилась с 83 до 93 %. Это сопровождается снижением концентрации углекислого газа с 14 до 6% и остальных загрязняющих веществ до 0 % что позволяет получить метан концентрацией от 93%. Таким образом, для очистки биогаза от вредных примесей было рекомендовано использование фильтров с нанесением оксидом титана на фильтрующий элемент из природного цеолита.

В данной работе для получения фотокаталитического покрытия $TiZnO_3$ и каталитического покрытия $LaMnO_3$ на стальной решетке фильтрующего элемента предложено использовать экстракционно-пиролитический метод. Данный растворный малозатратный метод позволяет наносить сложноокисные на большие и сложные поверхности в отличие от вакуумных методов магнетронного или ионно-лучевого или лазерного напыления. Метод заключается в получении экстрактов ионов металлов – компонентов сложного оксида, дальнейшего смешения растворов экстрактов с уточненной концентрацией металлов. Полученные прекурсоры наносятся на металлическую сетку методом погружения в раствор. Благодаря низкому поверхностному натяжению металлоорганических растворов происходит равномерное смачивание подготовленных подложек тонким слоем. Далее проводится пиролиз в открытой печи с удалением органической фазы и формированием гомогенного оксидного слоя. Для достижения определенной толщины покрытия операции нанесения раствора и пиролиза чередуются несколько раз.

Научный руководитель — д.т.н., проф. Т.Н. Патрушева

Библиографический список

1. Использование фильтров для очистки биогаза. – URL: <https://russian.rt.com/science/article/806135-uchyonve-chistvi-metan?ysclid=m78qq3dffa829921862> (дата обращения: 17.02.2025)
2. Черяпкин Д.Ю. Электронные библиотеки: Анализ существующих способов и систем очистки разделения метаносодержащих газовых смесей//Оренбургский государственный университет, 2016. – 2 с.
3. Методы очистки метана – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/gazopodgotovka/539522-ochistka-prirodnogo-gaza-ot-sernistykh-soedineniy/> (дата обращения 17.02.2025)
4. Фильтры газовые – URL: <https://tdsapcon.ru/produkcija/setchatye/filtry-gazovye/> (дата обращения: 17.02.2025)
5. Michael Schulthof, Martin Kaltschmitt, Christoph Balzer, Karsten Wilbrand and Michael Pomrehn. European road transport policy assessment: a case study for Germany//Environmental Sciences Europe. 2022.V.34. P. 55-56
6. Друзьянова В.П., Семенова О.П. Технология очистки биогаза до качества моторного топлива//Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2018. – 7 с.
7. Omojola Awogbem Ayotunde Adigun Ojo Samson Adedayo Adeleye. Advancements in the application of metal oxide nanocatalysts for sustainable biodiesel production//Discover Applied Sciences. 2024. V.26. P. 3-5
8. Meiqiu Feng, Jia Lin, Jinghua Li, Xiaohua Chen, Ying Zheng. Magnesium-enhanced redox property and surface acidity-basicity of $LaMnO_3$ perovskites for efficient methane purification//Separation and Purification technology. 2024 V.330. P. 40-50.

УДК: 620.172, 620.192

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РАСЧЕТА РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

Д.Е. Артеменко., Р.С. Богомолов, И.А. Соболев, Д.А. Азанов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Аннотация

Были проведены разрушающие испытания на одноосное растяжение металлических образцов, во время которых регистрировались сигналы акустической эмиссии. Далее, на основе полученных данных и многоуровневой модели параметров акустической эмиссии, была рассчитана разрушающая нагрузка для некоторых образцов.

Ключевые слова: разрушающие испытания, одноосное растяжение, акустическая эмиссия, многоуровневая модель параметров акустической эмиссии.

Введение

Акустическая эмиссия (АЭ) – явление излучения упругих волн в материале при перестройке внутренней структуры и разрывах связей между мельчайшими элементами материала, которые имеют место при разрушении материалов. Ещё во второй половине 20 века были выдвинуты идеи об использовании АЭ для контроля и дефектоскопии технических объектов. Однако до сегодняшнего дня существует проблема, связанная с обработкой сигналов акустической эмиссии. В руководящих документах по акустико-эмиссионному контролю приводятся критерии оценки технического состояния объектов по амплитуде, количеству импульсов, интенсивности АЭ и т.д. Однако применение этих критериев необоснованно и неэффективно при решении задач промышленной безопасности и экономической эффективности дальнейшего использования объекта. Возможным решением является использование многоуровневой модели параметров АЭ.

1. Многоуровневая модель параметров АЭ

Многоуровневая модель параметров АЭ основана на термофлуктуационной концепции прочности [4], в которой материал рассматривается как совокупность структурных элементов с различной прочностной характеристикой. Разрушение же материала представляет собой поэтапный временной процесс разрушения связей между элементами, скорость которого зависит от приложенной нагрузки (напряжений). В ходе исследований академика С.Н. Журкова было обнаружено, что при разрушении 1...10 % всех структурных элементов, дальнейшие разорванные связи начинают влиять друг на друга, что приводит к лавинообразному разрушению, с последующей фрагментацией образца, а также выведена формула среднестатистического времени ожидания разрушения одной структурной связи:

$$\theta_{\text{ср}} = \tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT} \right),$$

где $\tau_0 = 10^{-12} \dots 10^{-14}$ с – период атомных колебаний, U_0 – энергия сублимации (энергия отрыва атома из кристаллической решетки), γ – структурно-чувствительный параметр, учитывающий влияние перегрузок на отдельные элементы, k – постоянная Больцмана.

В работах [2,3,5] предлагается основное уравнение многоуровневой модели АЭ, которое связывает процессы разрушения материала и излучения упругих волн:

$$\xi(t) = k_{\text{АЭ}} * C(t),$$

где $\xi(t)$ – информативный параметр АЭ (амплитуда, кол-во импульсов) t – текущее время, $k_{\text{АЭ}}$ – акустико-эмиссионный коэффициент, который представляет собой долю сигналов АЭ, регистрируемых из общего потока импульсов, прошедших временную, частотную и амплитудную фильтрации, $C(t)$ – концентрация разрушенных структурных элементов на момент t .

Приведённая зависимость для информативных параметров АЭ достаточно сложна, однако возможно упрощение зависимости посредством некоторых математических операций и соблюдением определённых условий, таких как:

- Обеспечение стабильности контролируемого объёма диагностируемого объекта;
- Обеспечение стабильности коэффициента усиления и порогов дискриминации измерительной системы АЭ;
- стабильности характеристик энергетического или амплитудного распределения сигналов АЭ;
- подобия диагностического и рабочего нагружения диагностируемого объекта;
- постоянной скорости диагностического нагружения.

Сущность метода заключается в выполнении вышеперечисленных условий во время АЭ-диагностики и в последующем нахождении показателей прочности $X_{\text{АЭ}}$ и $Y_{\text{АЭ}}$, которые могут быть определены по данным регистрации сигналов во время упругого нагружения, которое не представляет угрозы для объекта.

Если построить график зависимости логарифма числа импульсов $\ln(N)$ (или другого информативного параметра) от времени t , то необходимый участок упругого нагружения примет вид прямой, как показано на рисунке 1.

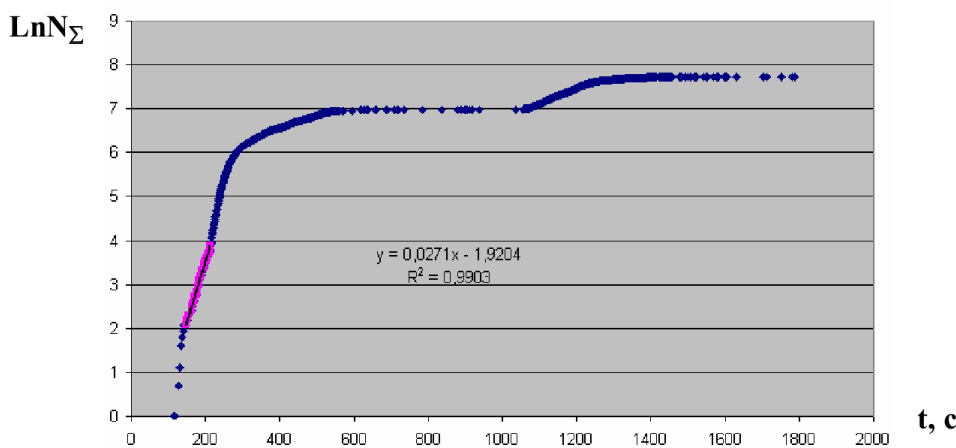


Рисунок 13 – Зависимость логарифма числа импульсов от времени при нагружении образца

Если взять производную по времени, то показатель X_{AE} как раз будет равен этой производной (углу наклона):

$$\frac{d(\ln(\xi))}{dt} = \frac{\gamma \dot{\sigma}}{kT} = X_{AE},$$

где $\dot{\sigma}$ – скорость роста напряжений.

Этот показатель является концентрационно-кинетическим показателем прочности, отражающим степень опасности дефекта и связанным со временем до разрушения, пределом прочности σ^* , разрушающей нагрузкой F_p и ресурсом.

Ещё одним показателем является Y_{AE} , который определяется как производная от логарифма информативного параметра по напряжениям:

$$Y_{AE} = \frac{d(\ln(\xi))}{d\sigma} = \frac{d(\ln(\xi))}{d(\dot{\sigma} \cdot t)} = \frac{dX_{AE}}{d\dot{\sigma}} = \frac{\gamma}{kT},$$

Этот диагностический параметр позволяет найти структурно-чувствительный коэффициент, значение которого отражает реальное структурное состояние объекта и который в большой степени влияет на его прочность, но который невозможно определить другими способами. Соответственно, после его нахождения с помощью многоуровневой модели параметров АЭ, появляется возможность для расчёта разрушающих нагрузок для конкретного образца или его предела прочности, а также для прогноза его дальнейшего разрушения и остаточного ресурса.

Разрушающая нагрузка определяется по следующей формуле:

$$F_{p\Pi} = \frac{\left(\frac{U_0}{RT} - \ln\left(\frac{C_0}{C^*}\right) + \ln(\tau_0 F_p' k Y_{AE}) \right)}{k Y_{AE}},$$

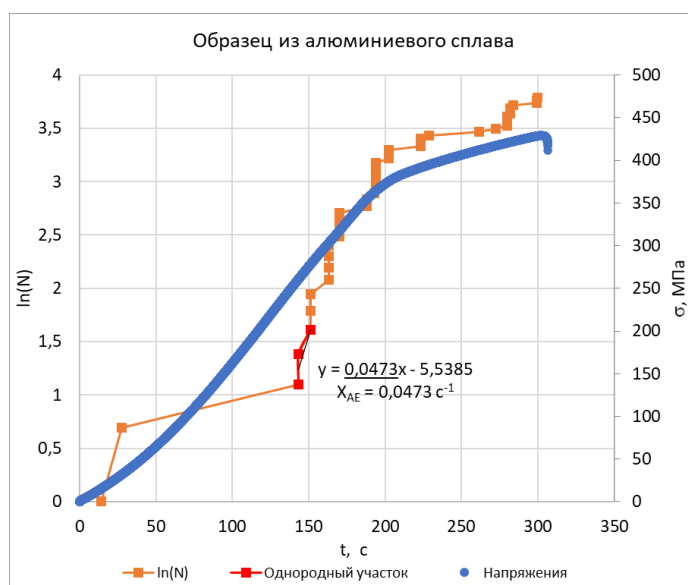
где R – универсальная газовая постоянная, F_p' – скорость роста нагрузки в разрушающем эксперименте, Н/с; $k = \frac{\sigma}{F}$ – коэффициент пропорциональности между нагрузкой и номинальными напряжениями в образце (или $k Y_{AE} = \frac{Y_{AE}}{A}$).

Данный подход был применён для расчёта предельно возможной нагрузки цилиндрических образцов при их растяжении. Часть образцов была изготовлена из стали, а другая – из алюминиевого сплава. Первый эксперимент проводился только на алюминиевых образцах с различными дефектами, второй – на обоих видах образцов без дефектов. Во время испытаний проводилась регистрация сигналов АЭ (их амплитуды, кол-ва), а затем проводилась обработка полученных данных.

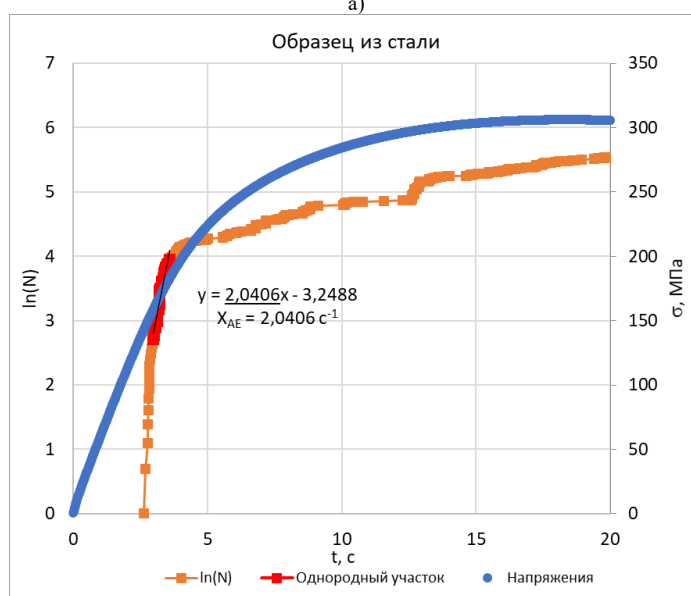
2. Результаты экспериментов и их обработка

В ходе эксперимента достаточное кол-во информации было получено только для двух образцов – стального и алюминиевого (рис 2 и табл. 1-2). Вероятно, это связано с необходимостью более тонкой настройки АЭ-аппаратуры или недостаточно хорошим контактом между пьезодатчиком и образцом. Далее были рассчитаны кинетические показатели прочности X_{AE} и Y_{AE} . Большие их значения соответствуют меньшей прочности (кол-ву оставшихся неразрушенных структурных связей) и, следовательно, большей опасности данного объекта.

С использованием этих показателей была рассчитана предельная нагрузка, которую сможет выдержать образец (табл. 3).



а)



б)

- Рисунок 14 – Совмещённые графики зависимостей логарифма числа импульсов и напряжений от времени. Красным отмечен интересный однородный участок. а) алюминиевый образец, б) стальной образец

- Таблица 7 – Результаты первого эксперимента

Образец	Вид дефекта	Максимальная нагрузка, кН	Кол-во импульсов N_{Σ}	Суммарная амплитуда импульсов A_{Σ} , дБ	Средняя амплитуда $A_{ср}$, дБ
1	Бездефектный (алюминиевый Ø10 мм)	41,8	10	481,5	48,1
2	Пропил глубиной 1 мм	31,9	55	4687	44,9
3	Пропил глубиной 2 мм	27,98	49	2570,6	52,5
4	Глухое отверстие глубиной 3 мм и Ø 3 мм	30,05	18	1097,1	60,9
5	Глухое отверстие глубиной 3 мм и Ø 5 мм	24,7	24	1264,9	52,7
6	Пропил 1 мм, отверстие Ø 5 мм	20,14	61	3142,2	51,5
7	Пропил 2 мм, отверстие Ø 3 мм	28,51	36	2057,4	57,1
	Козф. корреляции c	-	-0,608	-0,356	-0,297

	макс. нагрузкой				
--	-----------------	--	--	--	--

• Таблица 8 – Результаты второго эксперимента

Образец		Максимальная нагрузка, кН	Кол-во импульсов АЭ N_{Σ}	Суммарная амплитуда импульсов A_{Σ} , дБ	Средняя амплитуда импульсов $A_{ср}$, дБ
Алюминиевые, Ø8 мм	1	20,85	16	729,3	45,6
	2	21,61	38	1780	46,8
	3	20,3	46	1881,7	40,9
	4	20,06	49	1543,8	25,3
Стальные, Ø8 мм	1	15,34	85	3955,6	46,5
	2	15,43	372	16669,1	44,3
	3	15,18	88	3707,7	42,1
Коэф. корреляции с макс. нагрузкой		-	-0,61	-0,612	-0,201

В таблицах приведена корреляция часто используемых в АЭ-диагностике параметров – суммарного числа импульсов, суммарной амплитуды и средней амплитуды сигналов. Видно, что они не имеют достаточной связи для возможности достоверной оценки состояния объекта по этим величинам.

• Таблица 9 – Сравнение реальной и расчётной предельных нагрузок

Образец		Разрушающая нагрузка F_p , кН	Показатель X_{AE} , c^{-1}	Показатель Y_{AE} , MPa^{-1}	Рассчитанная разрушающая нагрузка $F_{расч}$, кН	Относительная погрешность, %
Первый эксперимент	№2	31,9	0,0473	0,020932	33,54	4,83
Второй эксперимент	Стальной №2	15,43	2,0406	0,050842	15,89	2,91

Полученные расчётные значения имеют очень хорошую сходимость, однако такое бывает не всегда при использовании данного подхода. В более сложных случаях нагружения и при более трудных условиях проведения испытаний, относительная погрешность может достигать больших величин. Однако уточнение значений разрушающей нагрузки возможно при добавлении в анализ амплитудного и временного распределений сигналов во время диагностики [5].

Заключение

В ходе испытаний на растяжение цилиндрических образцов были зарегистрированы сигналы акустической эмиссии. Далее, с использованием многоуровневой модели параметров АЭ были рассчитаны предельные нагрузки для двух образцов, т.к. достаточное кол-во информации было получено только для них. Однако, несмотря на это, результаты эксперимента можно считать положительными, т.к. расчётные значения разрушающей нагрузки оказались достаточно близки к реальным, и были сделаны выводы о необходимых условиях проведения подобных испытаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (НИР «Исследование и прогнозирование градиентных полей прочности и пластических характеристик металлов в процессах холодной обработки давлением при сложном нагружении», FZWF-2024-0006).

Научный руководитель – к.т.н., доцент Е.Ю. Ремшев

Библиографический список

- ГОСТ Р 53006-2008. Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. - Москва : Стандартинформ, 2009. - IV, 10 с
- Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: учеб. пособие / Изд-во политехн. ун-та, 2011. – 242 с.
- Носов В.В., Потапов А.И. Физические основы акустического контроля: Учебно-методический комплекс/ Санкт-Петербургский горный университет. Сост. Потапов А.И., Носов В.В. - СПб, 2016. 151 с.
- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Будущее науки: Междунар. ежегодник. Знание, М., 1983, с. 100–111.
- Микромеханическая модель акустической эмиссии как методическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений / В. В. Носов, Г. Х. Самигуллин, А. Р. Ямилова, Н. А. Зеленский // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14, № 1. – С. 244-253.

ОЦЕНКА РИСКА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ГОДА

Я.Л. Заидова, И.П. Панина

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Зима – это время года, когда природные условия становятся особенно суровыми, в результате чего повышается уровень травматизма. Снижение температур, гололед, снегопады и ограниченная видимость создают дополнительные риски и затруднения не только в повседневной жизни, но и на производстве. Переход на зимний режим работы требует особого внимания со стороны руководства и работников предприятий, чтобы минимизировать вероятность несчастных случаев, связанных с неблагоприятными погодными условиями.

Оценка риска – это процесс оценивания рисков, вызванных воздействием опасностей на работе, для определения их влияния на безопасность и сохранение здоровья работников [1].

Чаще всего это термин, используемый для описания общего процесса или методов, в ходе которого определяются опасности и факторы риска, которые потенциально могут причинить вред, иначе говоря идентификация опасности.

Опасность – это фактор среды и трудового процесса, который может быть причиной травмы, острого заболевания или внезапного резкого ухудшения здоровья. В зависимости от количественной характеристики и продолжительности действия отдельных факторов рабочей среды они могут стать опасными [1].

Опасности на производстве в зимний период могут иметь различные формы: травмы при падении на скользкой поверхности, переохлаждение и обморожение, дорожно-транспортные происшествия при передвижении по территории предприятия и многое другое. Упущение этих аспектов в процессе планирования работы может привести к несчастным случаям, что, в свою очередь, вызывает физический ущерб отдельным работникам предприятия, но и значительные экономические потери для предприятия.

Одной из главных причин несчастных случаев зимой является недостаток подготовки осведомленности сотрудников к работе в условиях, когда опасности становятся более актуальными, и в том числе при передвижении по территории. Многие работники не осознают важности соблюдения мер безопасности в зимний период, а также недостаточно информированы о правилах поведения в сложных климатических условиях. Поэтому актуальными становятся вопросы повышения уровня безопасности на производстве в зимнее время, а также организации обучающих мероприятий для работников.

Цель данного исследования – анализ оценка риска и причин несчастных случаев на производстве в зимний период, и разработка примерных рекомендаций по улучшению условий труда и повышения уровня безопасности, что позволит не только снизить количество несчастных случаев, но и создать более безопасную рабочую атмосферу, гарантирующую здоровье и безопасность каждого работника при передвижении по территории предприятия, а также за территорией предприятия.

В данной статье рассматривается оценка рисков в зимний период, связанные с травматизмом при поскользывании на неровной поверхности в зимний период года на открытой территории предприятия в г. Санкт-Петербург.

Источники опасности

В зимний период частой причиной получения травмы часто служит гололед, раннее наступление темноты, особенности погоды и скользкая обувь.

Скользкая корка из льда и плотный утрамбованный или укатанный снег на пешеходных дорожках и проезжей части является причиной несчастных случаев и способствует росту числа пострадавших от травм, среди которых наиболее часто отмечаются черепно-мозговая травма, переломы костей конечностей, повреждения связочного аппарата голеностопного и коленного суставов, сочетанная травма.

Снегопады и резкие перепады температуры атмосферного воздуха могут вызвать образование наледи на крышах зданий и сход снега и наледи с крыш. Как правило, такая масса неоднородна по своему составу и содержит как рыхлые массы подтаявшего снега, так и куски слежавшегося льда, зачастую значительного объема и массы [2].

При наступлении зимы, с выпадением снега частота обращений за помощью в медицинские учреждения связи с травмами увеличивается в 2-3 раза.

Наиболее частые повреждения при этом: черепно-мозговая травма, переломы костей конечностей, сочетанная травма. Согласно статистическим данным на зимний травматизм приходится до 15% заболеваемости с временной утратой трудоспособности.

В зимний период преобладают ушибы и переломы костей около 15%, вывихи около 10%. Пострадавшие преимущественно находятся в трудоспособном возрасте около 80%. Зимой случается около 36% всех травм, происходящих в течение года. Для сравнения: летом травматизм составляет 23%, весной – 22%, осенью – 19% [3].

Оценка рисков, связанных с опасностями спотыкания, скольжения и падения

Опасность поскользывания. Поскользывания происходят от недостаточного трения между обувью и поверхностью. Вероятность поскользывания определяется:

- метеорологические условия: низкие температуры, снегопады, гололед и обледенение;
- неубранные поверхности: пешеходные дорожки, тротуары, подъездные пути и территории вокруг зданий не убираются должным образом;
- тип обуви и состояние ее подошвы: неподходящая обувь, не обладающая хорошим сцеплением с поверхностью, значительно увеличивает риск падения;
- физические факторы, такие как, например, достаточность освещения: плохо освещенные участки становятся особенно опасными в темное время суток, поскольку уменьшается возможность увидеть потенциальные ловушки;
- физическое состояние человека, который может поскользнуться: неправильное поведение людей на скользких поверхностях (спешка, бег, резкие движения) приводят к увеличению вероятности падения, в том числе самочувствие человека.

Опасность спотыкания. Опасность спотыкания связана с потерей равновесия при контакте ноги с тем или иным объектом при движении. Источниками опасности спотыкания являются:

- погодные условия, в результате внезапное изменение качества поверхности, внезапный перепад высот на поверхности;
- увеличение толщины снега: снег может скрывать неровности и препятствия, что делает их незаметными для пешехода;
- тип обуви и состояние ее подошвы (особенно опасна при спотыкании обувь на высоком каблуке);
- физические факторы, такие как, например, достаточность освещения;
- физическое состояние человека, который может запнуться.

Тяжесть последствий, связанных с опасностью спотыкания, будет возрастать в зависимости от окружающей обстановки. Если человек споткнулся и потерял равновесие, он может получить травму при попытке предотвратить падение, держась за предметы окружающей обстановки, что приводит к травмам в виде ушибов, переломов, вывихов.

Опасность падения. Падения обычно являются результатом потери равновесия вследствие поскользывания или спотыкания, а также другим причинам, в том числе из-за неправильного использования лестниц. Существует два основных типа падений: падения на поверхности одного уровня и падения с высоты.

Однако, к причинам зимнего травматизма нужно отнести в том числе «человеческий фактор», когда люди спешат, либо при усталости и невнимательности, но через усилие заставляют себя идти. Многие не замечают льда, припорошенного снегом, в результате чего происходит падение и получение различных травм.

Как предотвратить опасности поскользнуться, споткнуться и упасть

Выявление проблемных зон – это первый шаг. Обеспечивается регулярным проведением осмотров с учетом состояния поверхности (качеству поверхности или загрязнениям) и лестниц (поверхность и перила), а также их освещения.

После установления наличия проблемных зон, определяются уровни риска, связанные с ними, и приоритетные меры по их снижению или контролю.

Меры по снижению уровней рисков рекомендуется рассматривать в соответствии с уже описанными приоритетами.

Устранение опасностей обеспечивается следующими техническими мерами:

- регулярная очистка, посыпка и обработка антигололедными материалами (песок, соль) пешеходных дорожек и других территорий;
- установка знаков и предупреждений о скользких участках дороги;
- обеспечение хорошего освещения на опасных участках.

Если и этих мер недостаточно, рекомендуется применять организационные меры контроля, например:

- разработка инструкций;
- проведение обучающих мероприятий по соблюдению безопасности в зимний период и предотвращений падений;
- проведение регулярных осмотров и оценок территории на предмет потенциальных опасностей;
- постоянное информирование о гололеде.

В качестве дополнительной меры рекомендуется выдавать средства индивидуальной защиты, например, противоскользкие накладки на обувь.

Рекомендуется осуществлять регулярный контроль применения разработанных мер управления рисками и оценивать их эффективность, основным показателем которой является снижение количества или отсутствие травм, связанных с падениями, поскользыванием и запинаниями.

Оценку рисков рекомендуется проводить в каждом случае использования новых материалов, оборудования или технологий.

В качестве меры профилактики травмирования персонала, обусловленного перечисленными опасностями, рекомендуется, чтобы работники, производящие уборку:

- были хорошо знакомы со своими рабочими местами или зонами;
- прошли обучение безопасным приемам выполнения своей работы;
- были проинформированы об опасностях, рисках и мерах по их контролю [4].

Во избежание получения травм необходимо помнить о правилах профилактики травматизма:

- в «скользкую» погоду не спешить, в спешке многие не видят скользких ступенек, не замечают опасных участков, например, льда, припорошенного снегом, в результате – падения и травмы;
- перед выходом на улицу необходимо надеть максимально удобную обувь на плоской подошве и низком широком каблуке, в сильный гололёд хорошо прикрепить на обувь специальные «тормозящие» накладки. Идеальный вариант – обувь с качественной рифленой подошвой, женщинам в период гололёда не стоит ходить на высоких, тонких каблуках;
- во время гололёда походка должна быть немного скользящей, наступать надо на всю подошву, передвигаться медленно и внимательно смотреть под ноги;
- при выходе из транспорта или спуске по лестнице надо приподнимать полы длинной одежды, держаться за перила;

Если падения неизбежно и теряется равновесие, необходимо попытаться при падении избежать тяжелых травм. Для этого:

- напрячь мышцы и сгруппироваться, чтобы уменьшить силу удара об лёд;
- помнить, что безопасней всего падать на бок, так можно избежать травм таза, позвоночника и конечностей;
- стараться не приземляться на выпрямленные руки, это может повлечь за собой тяжелые переломы [2].

Зимний период года представляет собой время, когда риск возникновения несчастных случаев значительно увеличивается из-за специфических климатических и погодных условий. Снег, лед, низкие температуры и сократившаяся световая день делают окружающую среду более опасной как для пешеходов, так и для водителей. Оценка рисков в этот период становится особенно важной, поскольку она позволяет выявить потенциальные угрозы и разработать меры по их минимизации.

Одним из ключевых факторов, способствующих выявлению опасностей вследствие чего возникают несчастные случаи зимой, является нехватка подготовки к неблагоприятным условиям. Недостаточная подготовка к зимнему периоду, недостаточная забота о пешеходных дорожках и неаккуратность в уходе за собственным здоровьем влекут за собой повышенный риск. Также стоит отметить, что в зимний период значительно возрастает вероятность травм при падениях из-за гололедицы, что приводит к обращениям за медицинской помощью и временному снижению трудоспособности.

Таким образом, оценка рисков и своевременное реагирование на них в зимний период позволяет существенно снизить количество несчастных случаев. Объединение усилий организаций и граждан, а также активное внедрение мер безопасности помогут создать более безопасную среду для всех участников. Опасность поскальзывания в зимний период представляет собой значительные риски для здоровья и безопасности людей. Понимание факторов риска и принятие мер по их минимизации позволит существенно снизить уровень травматизма и негативных последствий. Эффективная стратегия управления рисками требует как технических, так и организационных подходов, что делает сотрудничество всех заинтересованных сторон крайне важным.

Научный руководитель — д.т.н., профессор Д.А. Куклин

Библиографический список

1. ГОСТ Р 12.0.010-2009 Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков.
2. Главное управление МЧС России по г. Санкт-Петербургу.
3. Министерство здравоохранения Российской Федерации.
4. Приказ Минтруда России от 28.12.2021 N 926 «Об утверждении Рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков».

УДК 331.452

О НЕОБХОДИМОСТИ И ОСОБЕННОСТЯХ ОБУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ТРУДА

Д.Г. Шаповалова, П.А. Симонова, Н.А. Шмырова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Аннотация. Обучение сотрудников в области охраны труда имеет ключевое значение для обеспечения безопасности в организациях. Число происшествий на производстве напрямую связано с качеством подготовки по охране труда. Эффективное обучение в этой сфере способствует сокращению воздействия «человеческого фактора» во время аварий или опасных ситуаций, что является одной из главных причин производственного травматизма и ущерба здоровью работников. В статье рассмотрены основные виды программ обучения требованиям охраны труда. Приведен анализ статистических данных по основным показателям производственного травматизма по различным видам экономической деятельности. В ходе анализа были выявлены недостатки в области обучения работников требованиям охраны труда и были предложены меры по решению данной проблемы.

Ключевые слова: несчастный случай на производстве, дополнительное образование, производственный травматизм, обучение в области охраны труда, человеческий фактор.

Введение

Согласно действующему законодательству Российской Федерации (далее – РФ), все работники должны проходить обучение и проверку знаний по охране труда [1]. На сегодняшний день имеется большое количество учебных заведений, которые предлагают специализированные программы для достижения этой цели. Тем не менее, организации могут осуществлять обучение самостоятельно и контролировать уровень знаний сотрудников в области охраны труда [2]. Для успешного выполнения этой задачи необходимо создать специализированную комиссию, составленную из профессионалов – работников, прошедших соответствующее обучение и обладающих необходимыми квалификациями.

Эффективная организация обучения и оценки знаний по охране труда в рамках предприятия требует тщательного соблюдения всех установленных нормативов. В первую очередь, необходимо разработать и утвердить образовательные программы, которые будут отражать специфические черты и особенности работы компании, а также учитывать возможные риски, с которыми могут столкнуться сотрудники. Важным аспектом является создание материально-технической базы. Она должна включать в себя учебные материалы, специальное оборудование для практических занятий и средства индивидуальной защиты, необходимые для обеспечения безопасности работников. Кроме того, следует уделить внимание регулярным проверкам усвоенных знаний и навыков, чтобы гарантировать высокий уровень подготовки персонала в сфере охраны труда.

Комиссия, занимающаяся проверкой знаний в области охраны труда в организации, должна регулярно проходить курсы повышения квалификации по охране труда. Это требуется для того, чтобы быть в курсе последних изменений в законодательстве и новых методик в обучении.

Кроме того, организации, решившие проводить обучение своих сотрудников самостоятельно, обязаны вести тщательный учет всех учебных мероприятий. Это включает фиксацию дат проведения обучения, перечень тем, список присутствующих сотрудников, результаты проверки знаний и информацию о выданных удостоверениях. Подобная документация необходима для подтверждения соответствия законодательным требованиям в случае проверки со стороны надзорных органов, таких как Государственная инспекция труда. Несоблюдение установленных норм и правил может привести к административным штрафам и другим санкциям, предусмотренным законодательством РФ.

Организации, взявшие на себя ответственность за обучение персонала, сталкиваются с необходимостью строгого документирования всех образовательных мероприятий. Это не просто формальность, а обязательное требование, призванное обеспечить соответствие законодательству и подтвердить эффективность обучения. Тщательный учет всех аспектов учебного процесса — залог спокойствия и избежания неприятностей. Во-первых, строгой фиксации подлежит календарный план обучения. Необходимо детально фиксировать дату начала и окончания каждого учебного мероприятия, его продолжительность (в часах или днях), место проведения (адрес помещения, онлайн-платформа и т. д.). Важно также указывать форму обучения: лекции, семинары, практические занятия, дистанционное обучение, тренинги, а также методы контроля знаний. Все это должно быть задокументировано. Не стоит забывать о программе каждого учебного мероприятия – конкретный перечень изучаемых тем, с указанием целей и ожидаемых результатов обучения по каждой теме. Например, при обучении по охране труда должна быть четко прописана программа, охватывающая все аспекты, от правил пользования средствами индивидуальной защиты до процедур при аварийных ситуациях. Отсутствие такой детализации может стать причиной проблем при проверке. Во-вторых, необходимо вести точный список участников обучения. Для каждого сотрудника следует зафиксировать фамилию и инициалы, должность, подразделение, дату прохождения обучения и его результаты. Это позволит отследить, кто прошел обучение, а кто нет, и какие пробелы в знаниях могут существовать. В-третьих, результаты проверки знаний – это крайне важная часть документации. Независимо от метода проверки, нужно сохранять все материалы: ответы на тесты, результаты экзаменов, оценки за практические задания. Для каждого сотрудника должен быть сформирован индивидуальный протокол, подтверждающий уровень его знаний и умений по завершении обучения. Если обучение предполагает выдачу удостоверений или сертификатов, то вся информация о них, включая номер, дату выдачи, должна быть тщательно задокументирована и храниться в специальном реестре. В-четвертых, важно помнить о хранении всей документации. Документы должны быть доступны для проверки в любое время, как в бумажном, так и в электронном. Нарушение требований к ведению документации по обучению персонала может привести к серьезным последствиям. Государственная инспекция труда, проверяя соблюдение законодательства об охране труда, в первую очередь обращает внимание на наличие и качество документации по обучению. Штрафы за несоблюдение этих норм могут быть существенными и накладываются не только на организацию в

целом, но и на ответственных лиц. Поэтому, правильное и своевременное документирование всех аспектов обучения – это не просто бумажная волокита, а необходимость, обеспечивающая безопасность и законность деятельности организации.

Обучение сотрудников в сфере охраны труда является основой для безопасной работы. Оно не только снижает риск получения травм, но и способствует улучшению общей культуры безопасности в организации. Когда работники осознают возможные опасности, знают, как их избежать, и активно участвуют в создании безопасной рабочей среды, это способствует улучшению морального климата и увеличению производительности труда. Сотрудники, обладающие необходимыми знаниями и навыками в области охраны труда, чувствуют себя более уверенно и профессионально, что положительно сказывается на качестве их работы.

Программы обучения по охране труда

В настоящее время в РФ широко применяются три основные программы обучения по охране труда: А, Б и В. Выбор конкретной программы напрямую зависит от специфики работы сотрудника и занимаемой им должности. Описание каждой программы представлено в таблице 1 [2], важно отметить, что данная таблица носит общий характер. Конкретное содержание и продолжительность программ могут варьироваться в зависимости от отрасли, специфики деятельности организации и требований законодательства. Точный объем и содержание обучения должны быть определены работодателем с учетом оценки рисков на конкретном рабочем месте.

Таблица 1
Программы обучения требованиям охраны труда [2]

Тип программы	Название программы	Объем программы	Примерный перечень вопросов, рассматриваемых в программе	Кто обязан проходить обучение	Периодичность обучения
А	Общие вопросы охраны труда и функционирования системы управления охраной труда.	не менее 16 часов	Основы охраны труда в РФ. Система управления охраной труда в организации. Расследование и предупреждение несчастных случаев и профессиональных заболеваний.	Руководитель организации и его заместители, если на них возложены обязанности по охране труда. Руководители филиалов и их заместители, если на них возложены обязанности по охране труда. Руководители структурных подразделений и филиалов и их заместители. Специалисты по охране труда. Члены комитетов и комиссий по охране труда. Уполномоченные по охране труда. Члены комиссий по проверке знаний требований охраны труда.	не реже 1 раза в 3 года

Б	Безопасные методы и приёмы выполнения работ при воздействии вредных и (или) опасных производственных факторов, источников опасности, идентифицированных в рамках специальной оценки условий труда и оценки профессиональных рисков.	не менее 16 часов	Классификация опасностей. Идентификация вредных и (или) опасных производственных факторов на рабочем месте. Безопасные методы и приемы выполнения работ, указанные в правилах по охране труда. Меры защиты от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов. Действия работника в аварийной ситуации. Действия работника при несчастных случаях и микротравмах.	Руководитель организации и его заместители, если на них возложены обязанности по охране труда. Руководители филиалов и их заместители, если на них возложены обязанности по охране труда. Руководители структурных подразделений и филиалов и их заместители. Специалисты по охране труда. Члены комитетов и комиссий по охране труда. Уполномоченные по охране труда. Члены комиссий по проверке знаний требований охраны труда. Работники рабочих профессий.	не реже 1 раза в 3 года
В	Безопасные методы и приёмы выполнения работ повышенной опасности, к которым предъявляются дополнительные требования в соответствии с нормативными правовыми актами, содержащими государственные нормативные требования охраны труда.	определяется работодателем	Основные нормативные требования к работам повышенной опасности. Правила использования специального оборудования. Безопасные методы и приемы выполнения работ. Обучение безопасным методам и приемам выполнения работ повышенной опасности.	Члены комиссий по проверке знаний требований охраны труда работников, выполняющих работы повышенной опасности. Ответственные за организацию, выполнение и контроль работ повышенной опасности.	не реже 1 раза в год

Из представленной таблицы очевидно, что основные различия между программами заключаются в объеме и охвате обсуждаемых тем и группах сотрудников, которым они предназначены. Некоторые сотрудники проходят подготовку одновременно по одной-двум или даже трём программам. Когда сотрудник проходит обучение по нескольким программам обучения по охране труда, суммарная длительность такого обучения складывается воедино. Например, при наличии у сотрудника двух программ А и Б, общая продолжительность обучения должна составлять минимум 32 часа.

Если сотруднику предстоит пройти обучение по охране труда по трём разным направлениям (А, Б и В), то суммарная длительность такого обучения может сократиться ниже стандартных 48 часов, однако она обязана составлять минимум 40 часов.

Состояние производственного травматизма

По данным Федеральной службы по труду и занятости (далее – Роструд) в 2023 году в РФ было зарегистрировано 5892 несчастных случая (далее – НС), а в 2022 году 5563 НС [3]. Динамика НС за 2022–2023 годы в РФ представлен на рисунке 1.

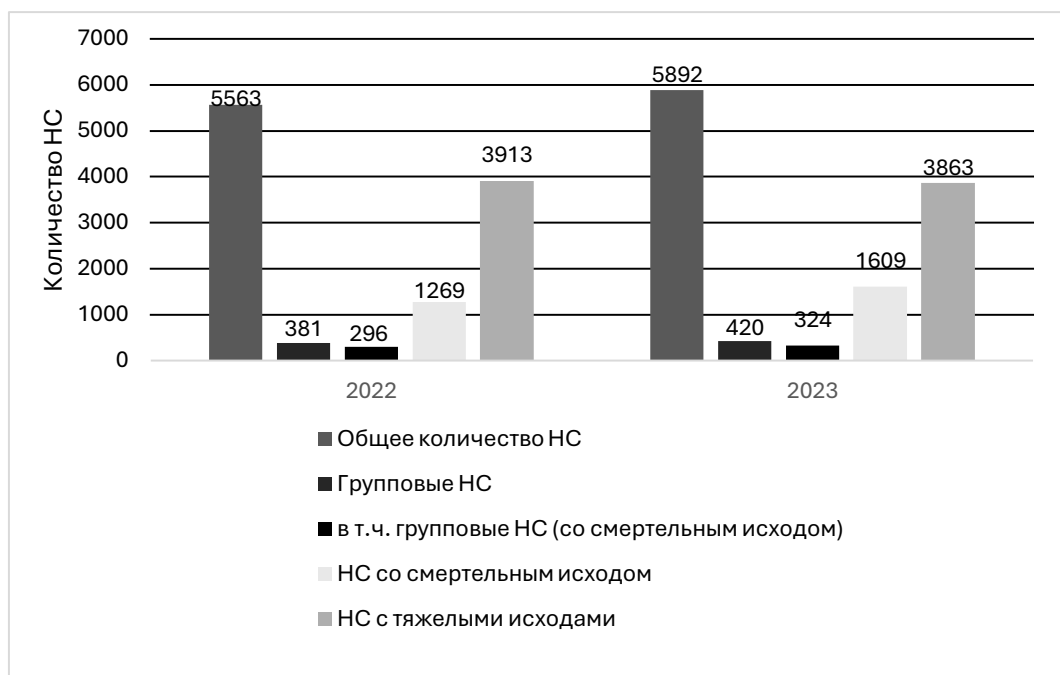


Рис. 1. Динамика НС за 2022–2023 годы в РФ [3]

Исход из рисунка 1, можно сделать вывод, что динамика 2023 года по отношению к 2022 году, имеет вид: общее количество НС увеличилось на 329 случаев или на 5,58%, групповые НС увеличились на 39 случаев или 9,28%, групповые НС со смертельным исходом увеличились на 28 случаев или на 8,64%, НС со смертельным исходом увеличились на 340 случаев или на 21,13%, НС с тяжёлыми последствиями, наоборот, сократились на 50 случаев или 1,29%. На основе анализа динамики НС за период 2022–2023 года, можно точно сказать, что количество НС только растёт.

Необходимо провести детальный анализ количества НС по отраслям, для того чтобы выявить сектор с наибольшим числом происшествий. Количество НС по видам экономической деятельности в РФ за 2023 год приставлено на рисунке 2 [3].

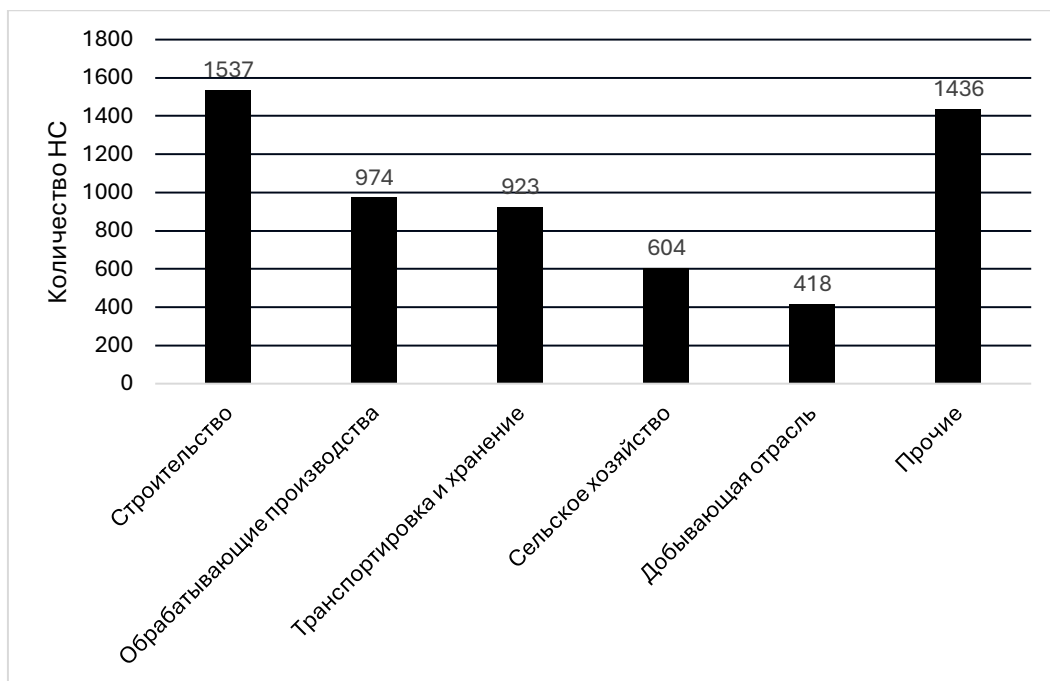


Рис. 2. Количество НС по видам экономической деятельности в РФ за 2023 год [3]

Анализ данных о НС на производстве в РФ за 2023 год выявил тревожную тенденцию: строительная отрасль лидирует по количеству зарегистрированных инцидентов. За 2023 год в этой сфере произошло 1537 НС, что составляет внушительные 26,09% от общего числа НС по всей стране. Причины столь высокого показателя НС в строительстве многогранны. К основным факторам относятся: недостаточный уровень обучения по охране труда работников, несоблюдение техники безопасности, использование неисправного оборудования, недостаточный надзор со стороны руководства.

Заключение

Обучение и проверка знаний по охране труда являются неотъемлемой частью обеспечения безопасности на производстве и соответствия требованиям законодательства Российской Федерации. Организации имеют возможность как воспользоваться услугами специализированных учебных заведений, так и самостоятельно организовать процесс обучения, создав комиссию из квалифицированных сотрудников. Однако в любом случае необходимо строго соблюдать нормативные требования, разрабатывать программы обучения, учитывающие специфику деятельности компании, и обеспечивать материально-техническую базу для проведения занятий.

Важным аспектом является документальное сопровождение всего процесса обучения, включая фиксацию дат, тем, списков участников и результатов проверки знаний. Это не только позволяет избежать штрафных санкций со стороны надзорных органов, но и способствует повышению уровня подготовки сотрудников, что напрямую влияет на снижение производственного травматизма.

Анализ данных за 2022–2023 годы показывает, что количество несчастных случаев на производстве продолжает расти, особенно в строительной отрасли, количество зарегистрированных инцидентов. За 2023 год в этой сфере произошло 1537 НС, что составляет внушительные 26,09% от общего числа НС по всей стране. Одной из причин увеличения количества НС было выявлено недостаточное обучение сотрудников по охране труда, как итог, количество смертельных случаев ежегодно увеличивается [4]. Это свидетельствует о необходимости увеличения периодичность обучения по охране труда, включая прохождение целевых инструктажей к определённым видам работ. Внедрение эффективных программ обучения, таких как программы А, Б и В, позволяет не только минимизировать риски, но и создать культуру безопасности на предприятии, что в конечном итоге способствует улучшению морального климата и повышению производительности труда.

Таким образом, обучение по охране труда — это не только обязательное требование законодательства, но и важный инструмент для обеспечения безопасности работников, снижения травматизма и создания благоприятных условий труда. Организации, которые уделяют должное внимание этому вопросу, не только избегают штрафов, но и повышают свою конкурентоспособность за счет создания безопасной и эффективной рабочей среды, следовательно, необходимо увеличить периодичность обучения по охране труда, включая прохождение целевых инструктажей к определённым видам работ.

Научный руководитель – д.т.н, доцент, профессор Д.А. Куклин

Библиографический список

1. Трудовой кодекс Российской Федерации : [федер. закон : принят Гос. Думой 21 дек. 2001 г. : по состоянию на 1 янв. 2024 г.] // КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683 (Дата обращения: 19.02.2025).
2. Постановление Правительства РФ от 24.12.2021 N 2464 (ред. от 12.06.2024) «О порядке обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда» (вместе с «Правилами обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда») // КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_405174 (Дата обращения: 20.02.2025).
3. Федеральная служба по труду и занятости (Роструд) // официальный сайт Роструда [Электронный ресурс]. URL: <https://rostrud.gov.ru/> (Дата обращения: 23.02.2025).
4. Бодня, М. С. Совершенствование системы обучения по охране труда работников строительной отрасли / М. С. Бодня, А. Н. Идрисова // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Астрахань, 25–26 апреля 2019 г. / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. — Астрахань : АГАСУ, 2019. — С. 106–107.

УДК 37.033

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ: ОНЛАЙН-КУРСЫ И СИМУЛЯТОРЫ

К.А. Вовна, У.А. Вовченко

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Актуальность. Основной целью обучения технике безопасности является снижение травматизма и заболеваемости работников, создание безопасных и безвредных условий труда на рабочих местах, проведение профилактических мероприятий по предупреждению травматизма и заболеваний на производстве. Внедрение информационных технологий является одной из приоритетных направлений получения и развития знаний о технике безопасности, процесс становится доступным и эффективным, с элементами интерактивности. Обучение может происходить с помощью следующих инструментов: онлайн курсов или симуляторов, которые позволяют приобретать практические навыки, моделировать ситуацию, определять риски [1].

Онлайн-курсы включают изучение теоретического материала, знакомство с лекциями, презентациями, текстовыми материалами. Прохождение онлайн курсов основано на выполнении заданий в дистанционном формате, дополнении интерактивными элементами. По технике безопасности в текстовом модуле представляют принципы, требования и правила поведения при различных ситуациях, используется понятийный аппарат. Для закрепления полученных знаний и совершенствования практических навыков применяются интерактивные задания, которые могут быть представлены в виде тестов, викторин, кейсов. Для демонстрации порядка действий, избегания ошибок, используются видеоматериалы, которые наглядно демонстрируют возможные риски для здоровья и жизни. По завершению прохождения онлайн курсов, участники получают сертификат, или удостоверение о повышении квалификации, подтверждающие получение теоретических знаний, применение изученной информации на практике [2]. В таблице 1 приведена сравнительная характеристика платформ по следующим критериям: стоимость, сертификация, язык обучения, целевая аудитория и т.д.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика зарубежных и российских платформ

Критерий	Зарубежные платформы	Российские платформы
Язык обучения	Преимущественно английский (Coursera, Udemy, edX).	Преимущественно русский (Нетология, Stepik, Универсариум).
Сертификация	Международные сертификаты (Coursera, edX, OSHAcademy).	Локальные сертификаты (Нетология, Skillbox, Открытое образование).
Стоимость	Платные курсы (Udemy, LinkedIn Learning), но есть бесплатные (Alison, OSHAcademy).	Платные курсы (Нетология, Skillbox), но есть бесплатные (Stepik, Универсариум).
Качество контента	Высокое качество, курсы от ведущих университетов (Coursera, edX).	Качество варьируется, но есть курсы от российских вузов (Лекториум, Открытое образование).

Целевая аудитория	Международная аудитория, корпоративные клиенты (Skillsoft, 360Training).	Локальная аудитория, корпоративные клиенты (Нетология, GetCourse).
Гибкость обучения	Гибкий график, возможность самостоятельного обучения (Coursera, Udemy).	Гибкий график, но часто с фиксированными сроками (Нетология, Skillbox).

На основе проведенной сравнительной характеристики, выделяются преимущества и недостатки платформ.

Преимущества зарубежных платформ:

- **Международные сертификаты:** признаются во всем мире.
- **Широкий выбор курсов:** Большое разнообразие тем и направлений.
- **Высокое качество контента:** Курсы от ведущих университетов и экспертов.

Преимущества российских платформ:

- **Русский язык:** удобно для русскоязычной аудитории.
- **Локальные стандарты:** Курсы адаптированы под российские требования и требования к удостоверениям по результатам прохождения.

- **Доступность:** часто более низкая стоимость курсов.

Недостатки зарубежных платформ:

- **Языковой барьер:** не все курсы доступны на русском языке.
- **Высокая стоимость:** Некоторые курсы могут быть дорогими.

Недостатки российских платформ:

- **Ограниченный выбор:** меньше разнообразия курсов.
- **Качество контента:** может варьироваться в зависимости от платформы.

Достоинства онлайн курсов заключаются в дистанционном формате, гибкости учебного графика, возможности прохождения индивидуального обучения, доступности для каждого участника, выполнении интерактивных задания для успешного прохождения обучения.

Стоит отметить, онлайн-курсы направлены на замотивированного участника, на каждом этапе прохождения курсов необходимо поддерживать активность выполнения заданий, некоторые онлайн курсы не содержат достаточного количества модулей, направленных на решение практических задач, что значительно уменьшает эффективность онлайн курсов. Выполнением данного вопроса занимаются симуляторы, которые подразумевают виртуальные тренажеры, позволяющие моделировать ситуации, находить решения.

Симулятор в охране безопасности – это обучающий комплекс, основанный на виртуальной реальности, позволяющий отрабатывать навыки в безопасных и контролируемых условиях. Появляется возможность наглядно представлять варианты опасных ситуаций, выполнять алгоритмы действий по их нейтрализации, улучшать навыки, доводить действия до автоматизма, снижая вероятность несчастных случаев [3]. При изучении различных симуляторов, отмечаются различия в стоимости, интерактивности, сравнительные критерии представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Примеры симуляторов на различных платформах

Платформа	Тип платформы	Сфера применения	Интерактивность	Стоимость	Доступность
VR Safety Training	Виртуальная реальность (VR)	Общая техника безопасности, пожарная безопасность, работа на высоте	Высокая: полное погружение в виртуальную среду	Высокая: требуется оборудование VR.	Ограничена: нужны устройства VR
SafetySim	Компьютерный симулятор	Промышленная безопасность, охрана труда	Умеренная: взаимодействие через интерфейс ПК	Средняя: подписка или лицензия	Широкая: работает на ПК
HazardSim	Веб-симулятор	Обучение распознаванию и устранению рисков	Умеренная: браузерное взаимодействие	Низкая: бесплатные и платные версии	Широкая: доступ через браузер
VirtualShip	Специализированный симулятор	Морская безопасность, судоходство	Высокая: реалистичная симуляция	Высокая: профессиональное ПО	Ограничена: специализированное ПО

			морской среды		
MineSim	Специализированный симулятор	Безопасность в горной промышленности.	Высокая: реалистичная симуляция шахт	Высокая: профессиональное ПО	Ограничена: специализированное ПО

Преимущества симуляторов:

- **Безопасность:** Обучение в виртуальной среде без риска для жизни и здоровья.
- **Практика:** Возможность отрабатывать навыки в реалистичных условиях.
- **Гибкость:** Моделирование различных сценариев и ситуаций.

Недостатки симуляторов:

- **Стоимость:** Некоторые платформы требуют дорогостоящего оборудования (например, VR).
- **Ограниченность:** Специализированные симуляторы (например, для морской или горной промышленности) могут быть недоступны для широкой аудитории.

Исходя из таблицы 3, определяются сравнительные черты онлайн курсов и симуляторов.

Таблица 3 – Сравнение онлайн-курсов и симуляторов

Критерий	Онлайн-курсы	Симуляторы
Формат обучения	Лекции, видеоуроки, тесты, задания	Интерактивные сценарии, виртуальная реальность, моделирование ситуаций
Практичность	Теоретическая база, минимум практики	Высокая практичность: отработка навыков в виртуальной среде
Стоимость	От бесплатных (Stepik, Alison) до платных (Coursera, Нетология).	От средних (HazardSim) до высоких (VR Safety Training, MineSim)
Доступность	Широкая: доступ через ПК, смартфон, планшет	Ограничена: для VR и специализированных симуляторов требуется оборудование
Целевая аудитория	Широкая: студенты, сотрудники, корпоративные клиенты	Специализированная: сотрудники, работающие в опасных условиях (шахты, суда)
Преимущества	Гибкость обучения, широкий выбор тем, доступность	Высокая практичность, реалистичные сценарии, безопасность
Недостатки	Минимум практики, теория может быть оторвана от реальных условий	Высокая стоимость, ограниченная доступность.

Исходя из вышесказанного, онлайн-курсы подходят для получения теоретических знаний, доступны широкой аудитории, имеют невысокую стоимость. Симуляторы являются лучшим выбором для практического обучения, особенно в опасных условиях, но требуют больше ресурсов (оборудование, бюджет).

- На основе изученной информации, разработаем пример заданий по предотвращению и реагированию на пожары, а также обучению пользователей основам безопасности и действиям в экстренных ситуациях. Разработка симулятора с использованием фрейм-алгоритма, позволяет представить интерактивный сценарий, где обучающийся принимает решение, используя подход «да» или «нет», обучающимся необходимо определить, какие средства тушения используются при возгорании горючих материалов. Каждое средство тушения определяется в результате прохождения фрейм-алгоритма. Обучающиеся принимают решения и видят последствия выбранных действий, что делает процесс более увлекательным, повышает заинтересованность.

Представленные средства тушения в зависимости от класса пожара:

- Средства тушения подкласса A1: вода со смачивателями, распылённая вода, пены, огнетушащие порошки типа ABCЕ.
- Средства тушения подкласса A2: вода, пена, порошки, хладоны.
- Средства тушения подкласса B1 и B2: специальные пены, устойчивые к действию полярных жидкостей, тонкораспылённая вода, аэрозольное пожаротушение, инертные разбавители N₂, CO₂.
- Средства тушения класса C: объёмное тушение и флегматизация газовыми составами, огнетушащие порошки.
- Средства тушения класса D1: порошки типа ПХК, азот, аргон.
- Средства тушения класса D2: порошки специального назначения и инертные газы.

- Средства тушения класса D3: пена, газовых составов, огнетушащие порошки всех видов.
- Средства тушения класса E: галогеносодержащие средства, диоксид углерода, порошки.
- Средства тушения класса F: огнетушители с маркировкой AF [4].

• Фрейм – рамочная, каркасная, матричная структура основной идеи учебного материала, которую можно использовать на большинство тем и разделов в схемном или графическом виде, в результате этого, фрейм несёт стереотипный и универсальных характер. Процесс понимания текста происходит с помощью разделения текстовой информации на части – опорные пункты, которые объединяясь, приводят к общему смыслу. Информация, поступающая в наш головной мозг, усваивается в свернутом виде. В связи с этим, следует представлять учебную информацию в виде таблиц, схем, графиков, фреймовых опор.

• В процессе конструирования учебного материала можно использовать различные модели фреймов.

• **фрейм-рамку** – для акцентирования внимания на воспринимаемом тексте, выделения причинно-следственных связей между определяемыми величинами; систематизации, обобщения и уплотнения информации [Синицын, 2017].

• **фрейм-логику-смысловую схему** – для определения структуры учебной информации, установления иерархии и связей ее элементов, систематизации знаний, развития аналитико-синтетических умений, акцентирования внимания в процессе освоения учебного материала на основных структурных элементах информации.

• **фрейм-сценарий** – для установления процедуры выполнения задачи или действия, формирования и развития учебных умений, освоения и систематизации знаний по дисциплине, установления закономерностей событий или процессов, развития логического, проблемного, творческого мышления обучающихся [5].

• **Цель:** повышение эффективности образовательного процесса при решении фрейм-алгоритма, способствующего повышению уровня познавательного интереса и учебной мотивации.

• **Задачи:**

- применение для интенсификации учебного процесса;
- развитие алгоритмического мышления;
- обобщение и систематизация материала;
- формирует элементы информационной культуры.

• Рассмотрим применение фрейм-алгоритма при изучении темы «Классификация пожаров по виду горючего материала». Данный алгоритм помогает классифицировать пожары в зависимости от видов горючих материалов. По мере прохождения алгоритма, обучающиеся отвечают на вопрос «да» или «нет». Кроме того, подобный алгоритм прекрасно сочетается с методологией структурированного анализа, например, «дерева отказов» (FTA) для оценки рисков, в данном примере, являющийся подводящим упражнением. На практике фрейм-алгоритм программируется с помощью Python [6].

• **Пример решения фрейм-алгоритма: горение твёрдых веществ – «да» – есть тление – «да» – подкласс A1 – средства тушения: вода со смачивателями, распылённая вода, пены, огнетушители типа ABCЕ.**

• **Горение металлов – «да» – исключение щелочных – «нет» – подкласс D2 – «нет» – горение металлов с концентрацией металлосодержащих металлов до 60% – «нет» – подкласс D3 – средства тушения: пена, огнетушащие порошки.**

На рисунке 1 представлен Фрейм-алгоритм «Классификация пожаров по виду горючего материала».

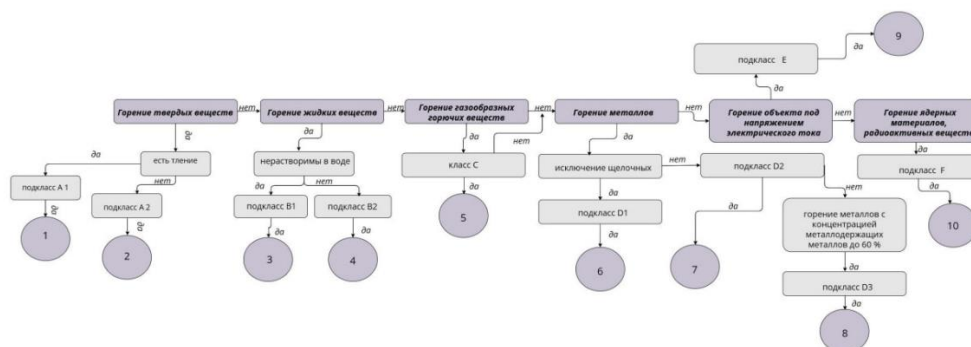


Рис. 1 Фрейм-алгоритм «Классификация пожаров по виду горючего материала»

Выводы: симуляторы позволяют обучающимся практиковать навыки в безопасной среде, появляется возможность подготовиться к опасным ситуациям, которые могут возникать в реальности, снижаются риски возникновения травм и несчастных случаев. Рассмотрена сравнительная

характеристика онлайн-курсов и симуляторов, изучены российские и зарубежные платформы. Сформировано одно из возможных заданий для работы с симулятором, основанного на работе фрейм-алгоритма, предполагается повышение мотивации и эффективности при обучении стимуляторах техники безопасности. Прохождение обучения на стимуляторах подготавливает высококвалифицированных сотрудников, что необходимо для профессий с повышенным риском.

Научный руководитель – к.т.н., доцент П.В. Матвеев

Библиографический список

1. Беляков, Г. И. Охрана труда и техника безопасности: учебник для вузов [Текст] / Г. И. Беляков – 4. – Москва: Юрайт, 2023 – 529 с.
2. Онлайн-курсы [Электронный ресурс] URL: <https://disshelp.ru/blog/ispolzovanie-onlajn-kursov-pri-obuchenii-v-vuze-cto-eto-takoe-kak-dejstvuet-rezultat-novshestva/> (дата обращения: 28.02.2025).
3. Симулятор в охране безопасности [Электронный ресурс] URL: <https://likevr.ru/razrabotka-vr/hse/> (дата обращения: 28.02.2025).
4. Беляков, Г. И. Пожарная безопасность: учебник для вузов [Текст] / Г. И. Беляков – 2 перераб. и доп. – Москва: Юрайт, 2025 – 282 с.
5. Гурина, Р.В. Фреймовые схемы-опоры как средство интенсификации учебного процесса / Р. В. Гурина // Школьные технологии. – 2004. – № 1. – С. 184–195.
6. Синицын, И.С. Обучение решения расчетных географических задач с использованием фреймовых опор / И.С. Синицын, С.Е. Купцов // Ярославский педагогический вестник. – 2017. №1. – С. 105–108.

УДК 699.88. 539.23

ЗАЩИТА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ОТ ШУМА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.В. Еришов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Трансформаторные подстанции часто расположены вблизи существующих зданий, особенно в старинной застройке. Такие объекты являются одновременно источником повышенного уровня шума и высокой интенсивности электромагнитного излучения (ЭМИ). Каждый 42 россиянин живет в условиях повышенного шума и высокой интенсивности ЭМИ. В таких условиях прибегают к средствам защиты от шума и ЭМИ, такими как применение шумозащитных экранов или внедрение проводящей сетки в стену здания. В данной работе описано негативное воздействие шума и ЭМИ на человека. Предложен метод защиты, защищающий от ЭМИ и шума вместе. Произведен проверочный расчет эффективности выбранного метода защиты на примере существующей трансформаторной подстанции. В качестве защиты от шума предлагается установка оконного блока с повышенной звукоизоляцией, а в качестве защиты от ЭМИ предлагается нанесения проводящей пленки ИТО на стекло.

Объектом исследования данной работы является шумовое и электромагнитное воздействие на человека. На человека как правило воздействует сразу несколько видов полей – это звуковое поле, магнитное и электрическое. Шум окружает человека везде. Шум на производстве возникает на рабочих местах за оборудованием в результате производственного процесса. В России в системе охраны труда принято классифицировать производственный шум как один из основных вредных производственных факторов (ОВПФ). Население России на 2024 год составляет 146 150 789 из них 74,1 млн. человек работающего населения. Экономика России делится на 3 сектора: сельское хозяйство – 4,7%, промышленность – 32,4%, сфера услуг – 62,3%. Так если посмотреть на данные статистики от Росстата, то 3,43 млн. человек трудятся в условиях повышенного шума [1].

Электромагнитное излучение в отличие от звуковых волн ощущается слабо, либо вовсе не ощущается, но оставляет не меньший негативный след на здоровье. Так, например, в Перми за 2024 год около 15 тысяч человек живет в состоянии повышенного электромагнитного воздействия. Зачастую люди подвергаются воздействию переменного электромагнитного поля промышленной частоты 50 Гц. Буквально все люди испытывают на себе воздействия этих полей, даже не задумываясь об этом. Однако у людей, живущих вблизи трансформаторных подстанций, чаще наблюдаются проблемы со здоровьем, чем у людей, живущих вдали от таких объектов. Так чем ближе находится жилая застройка к трансформаторной подстанции, тем большая интенсивность электромагнитного излучения действует на человека.

Трансформаторные подстанции являются одновременным источником повышенного уровня шума и электромагнитного излучения. Источником шума на трансформаторных подстанциях является вибрации, возникающие в активной части трансформатора. Так, например, сердечник стандартного трехфазного масляного трансформатора ТМГ 25/10(6)/0.4 вибрирует с частотой 100 Гц и создаёт уровень шума 60-75 дБА, а уровень интенсивности электромагнитного излучения может превышать фоновый уровень интенсивности на 20 дБ.

Для снабжения жилых зданий применяется двухфазная система питания электрической энергией напряжением 220 В, рядом с зданием сооружают понижающие подстанции, как правило 10кВ/220В. Такие подстанции не только являются источником повышенного электромагнитного (а иногда и механического) шума, но и являются источником повышенного электромагнитного излучения. Жилые

здания снабжаются переменным током напряжением 220В, и частотой 50 Гц. Таким образом электромагнитное излучение от трансформаторных подстанций тоже исходит с частотой 50 Гц. Такое излучение классифицируется как неионизирующее излучение промышленной частоты. Поэтому разработанные методы защиты будут одинаково полезны, как для жилых зданий, так и для производственных помещений. Неионизирующее электромагнитное излучение промышленной частоты 50 Гц измеряется в единицах измерения В/А. Высокочастотное неионизирующее излучения начинается с 3 кГц до 300 ГГц и измеряется в Вт/м².

Самое опасное электромагнитное излучение для человека является излучение с такой частотой, которая совпадает с его собственной частотой центральной нервной системы. С точки зрения физиологии электромагнитное излучение трансформаторной подстанции негативно влияет на общее здоровье организма. Из физиологии известно, что возбуждающие аксоны мотонейронов, которые иннервируют поперечнополосатые мышцы, проводят по своему стволу потенциалы действия с низкой частотой 5-10 Гц. Потенциал действия – это разность потенциалов между внешней средой и внутренней средой нейрона. Потенциал покоя нейрона составляет -70 мВ, а потенциал действия около +30 мВ. За счет работы трансмембранных белков-каналцев потенциал действия распространяется как волна по аксону мотонейрона к иннервируемой мышце. Если организм будет находиться в переменном электромагнитном поле с частотой близкой к частоте, с которой работает нервная система. То такие импульсы по мотонейронам будут искажаться. Ведь физиологическое электричество составляют разные концентрации ионов калия, натрия и кальция. Это частицы, имеющие заряд, на которые воздействует внешнее электрическое поле. У организма есть методы и механизмы защиты от такого, поэтому никакие судороги и параличи происходить не будут. Однако те области нервной системы, которые наиболее точно функционируют, например, память, внимание и концентрация чувствуют на себе негативное влияние электромагнитного излучения. В сочетании с высокочастотным повышенным шумом от трансформаторных подстанций, оба эти негативных фактора создают дискомфорт для жизни человека вблизи таких сооружений.

Удобнее всего было бы создать средство или метод защиты, который бы исключал сразу несколько негативных факторов, например защищал и от шума и электромагнитного излучения. Такой метод обладал бы большей экономической эффективностью в сравнении с отдельными способами борьбы с шумом и электромагнитным излучением. В данной работе предложены разные варианты борьбы с шумом и электромагнитным излучением. Это могут быть, например проводящие и звукопоглощающие экраны вокруг участка трансформаторной подстанции.

Чтобы снизить шум в помещении можно использовать следующие меры:

1. Снизить шум в источнике его возникновения. Самое эффективное действие для данного способа – это использовать более тихое оборудование. Устройства с более низкими уровнями шума в некоторых случаях обойдется дешевле, чем снижения шума другими средствами.

2. Снижение шума расстоянием. Пример такого снижения – это на этапе проектирования объекта посчитать на каком расстоянии будет безопасно располагать нормируемые объекты, требующие защиты.

3. Снижение шума методом звукоизоляции. Использование звукоизоляции защищаемого объекта снижает шумовое воздействие.

4. Снижение шума методом звукопоглощения. Если обделать стены, пол, потолок помещения звукопоглощающими материалами, то можно добиться существенного снижения уровня звука в помещении. Обстройка стен, пола и потолка звукопоглощающими материалами повышает общую эквивалентную площадь звукопоглощения помещения [2].

В данной работе применяется метод защиты расстоянием и метод звукоизоляции.

Системы и методы защиты от электромагнитного излучения по аналогии с системами и методами защиты от повышенного шумового воздействия делятся на:

2. Защита расстоянием. Один из наиболее эффективных методов защиты, так как по аналогии со звуком, электромагнитные поля с увеличением расстояния также рассеиваются. Но применение такого метода защиты на уже построенной территории, когда уровни электромагнитного поля превышают нормы не получиться.

3. Снижение интенсивности источника. Как и с повышенным шумом можно бороться с электромагнитным излучением в самом источнике. Например, использовать аттенюаторы – устройства для плавного, ступенчатого или фиксированного понижения интенсивности электромагнитных волн.

4. Экранирование. Наиболее эффективный и простой метод защиты от электромагнитного излучения. Экранировать можно либо сам источник, либо сам фасад защищаемого здания. Материал такого экрана выбирается по мощности источника электромагнитного излучения, частоты и технических условий.

В данной работе применяется защита расстоянием и экранирование жилого помещения путем нанесения проводящей тонкой пленки на остекление, либо нанесение такой пленки на прозрачную часть шумозащитного экрана, ограждающего трансформаторную подстанцию.

Конструкция шумозащитных экранов состоит из двух частей – нижняя часть имеет звукопоглощающий слой, а верхняя прозрачное стекло, либо прозрачный пластик.

В целях экономии предлагается совместить экранирование для защиты от повышенного шума и от электромагнитного излучения. Предлагаемым методом является применение шумозащитного остекления с нанесенной на стекло проводящей тонкой пленкой. Одной из возможных пленочных покрытий является проводящая пленка на основе оксида индия-олова. Оксид индия-олова, более известный как ИТО, представляет собой составную смесь индия, олова и кислорода, объединенных в различных пропорциях. Эффективность экранирования ЭМИ тонкими пленками зависит в первую

очередь от их удельной проводимости, в такой тонкой пленке необходимо соблюсти баланс между проводимостью и прозрачностью, проводимость можно увеличить за счет большей толщины пленки, но таким образом снизится её прозрачность. Сложность создания пленочных покрытий состоит в том, что электрическая удельная проводимость пленок зависит от шероховатости пленки. Чтобы снизить влияние шероховатости нужно увеличивать толщину пленки, что плохо скажется на прозрачности. Чтобы сохранить проводимость пленки и уменьшить шероховатость, не увеличивая толщину, нужно достичь более высокой кристалличности. Пленочные защитные покрытия являются комбинированными материалами и создают собой новое особое средство защиты от электромагнитного излучения. Они обладают одновременно хорошей электропроводимостью и прозрачностью. Эта особенность делает такие материалы очень перспективными для защиты людей и оборудования от электромагнитных излучений.

Главная сложность использования тонких проводящих пленок в качестве электромагнитных экранов заключается в необходимости их нанесения на большие поверхности. Пленка должна быть нанесена на всю поверхность подложки равномерно и иметь одинаковые проводящие свойства. В противном случае её экранирующая эффективность будет снижена.

Согласно СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона" напряженности электрического поля на жилой территории не должна превышать 1000 В/м, а внутри жилых помещений 500 В/м. Если на здание воздействует сразу несколько источников электромагнитного излучения и для них установлены одинаковые предельно-допустимые значения интенсивности, то тогда должно соблюдаться условие:

$$\sqrt{\sum E_i^2} \leq E_{\text{доп.}} \text{ или } \sum \text{ППЭ}_i \leq \text{ППЭ}_{\text{доп.}}, \quad (1)$$

Где E_i , $\text{ППЭ}_{\text{доп.}}$ - параметры электромагнитного излучения для i -того диапазона частот,

$E_{\text{доп.}}$, $\text{ППЭ}_{\text{доп.}}$ – допустимые значения электромагнитного излучения, взятые согласно таблице

1;

Если на здание воздействуют источники, для которых приняты различные предельно-допустимые значения интенсивности электромагнитного излучения, то тогда в таком случае должно выполняться условие:

$$\sum \left(\frac{E_i}{E_{\text{доп.}}} \right)^2 + \sum \left(\frac{\text{ППЭ}_i}{\text{ППЭ}_{\text{доп.}}} \right) \leq 1 \quad (2)$$

Согласно СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона" напряженности электрического поля на жилой территории не должна превышать 1000 В/м, а внутри жилых помещений 500 В/м.

Для оценки эффективности предложенного метода защиты от шума и электромагнитного излучения был сделан ориентировочный расчет воздействия негативных факторов на жилое здание. Описание объекта исследования: жилое здание, 3 этажа, по адресу шоссе революции 51 лит Б, стены здания изготовлены из кирпича. Жилой дом расположен вблизи электрической подстанции Россети Ленэнерго по адресу шоссе революции, 51 лит Б. Открытая трансформаторная подстанция на максимальное рабочее напряжение 110 кВ и мощностью 25 МВА с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла. На рисунке 1 представлена схема описываемого объекта.

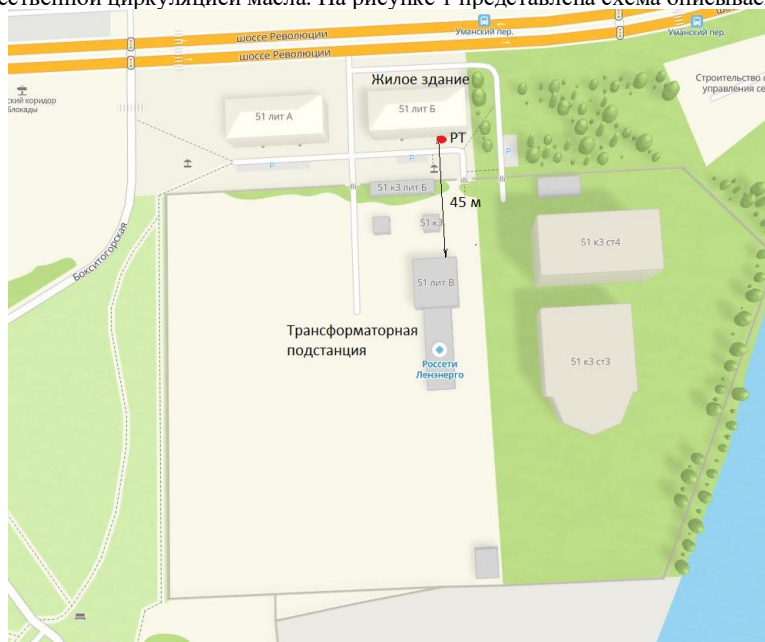


Рисунок 1 – Схема описываемого объекта

Расчеты шума проводились по ГОСТ 31295.2-2005 «Шум. Затухание звука при распространении на местности» [8] и СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий», нормы шума взяты согласно СП 51.13330.2011. Защита от шума.

Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 [9]. Шумовая характеристика трансформаторной подстанции взята из книги Снижение шума в зданиях и жилых районах 1987 (Осипов Г.Л., Юдин Е. Я., Хюбнер Г.) [3]. Трансформаторная подстанция является постоянным источником шума и работает круглосуточно. В таблице 1 представлена принятая стандартная шумовая характеристика трансформаторной подстанции.

Таблица 1 – Шумовая характеристика трансформаторной подстанции

1. Ч а с т о т а , Г ц	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
12. У з д и с т о ч н и к а , д Б	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.

Для соблюдения нормы шума в помещении по СП 51.13330.2011 был выбран оконный блок класса Е со звукоизоляцией 26 дБа. Результаты расчета шума в помещении жилого дома и результаты экранирования существующим ограждением высотой 2 м представлены в таблице 2 и 3.

Таблица 2 – Результаты расчета шума в жилом помещении

Жилое здание по адресу Шоссе Революции, 51 лит Б					
Рассматриваемая величина	Эквивалентный уровень шума днём	Максимальный уровень шума днем	Эквивалентный уровень шума ночью	Максимальный уровень шума ночью	Ед. изм.
Шумовая характеристика оборудования, $L_{шум.об.}$	75	76	75	76	дБА
Расстояние до РТ, г	45	45	45	45	м
Опорное расстояние	7,5	7,5	7,5	7,5	м
Снижение расстоянием, $L_{д\text{рас}}$	7,8	7,8	7,8	7,8	дБА
Снижение вследствие затухания звука в воздухе, $L_{авоз}$	0,23	0,23	0,23	0,23	дБА
Поправка, учитывающая влияние турбулентности воздуха и ветра, $L_{ав/т}$	0,059	0,059	0,059	0,059	дБА
Снижение экраном (застройкой), $L_{экp}$	14	14	14	14	дБА
Угол видимости дороги, θ	44	44	44	44	°
Коррекция, учитывающая отражение звука от ограждающих конструкций, $L_{отp}$	3	3	3	3	дБА
Снижение уровней звука оконным блоком, дБА	26	26	26	26	дБА

В помещении					
Эквивалентный и максимальный уровень звука в РТ,	30	31	30	31	дБА
ДУ экв и макс (СП 51.13330.2011)	40	55	30	45	дБА
Требуемое снижение УЗД	-10	-24	0	-14	дБА
Около здания					
Эквивалентный и максимальный уровень звука в РТ,	56	57	56	57	дБА

Как видно из расчетной таблицы норма шума в жилом помещении соблюдается при применении оконного блока класса Е со звукоизоляцией 26 дБА и дополнительно возведения шумозащитного экрана вокруг трансформаторной подстанции. Схема расположение шумозащитного экрана представлена на рисунке 2.

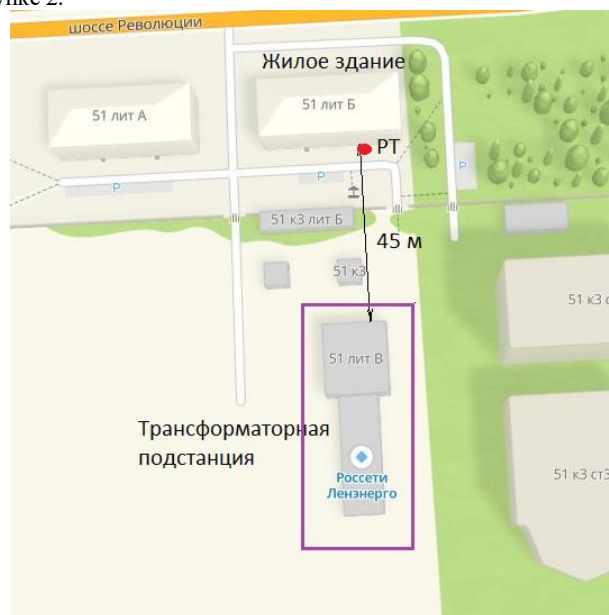


Рисунок 2 – Схема расположение шумозащитного экрана

Акустический расчет был выполнен для замкнутого экрана вокруг подстанции высотой 2 м [7]. Акустический расчет шумозащитного экрана представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета экранирования существующими ограждениями

Снижение уровней звука экранированием		
Рассматриваемая величина	Значение	Ед. изм.
Расстояние от ИШ до экрана-стенки, S1	5,00	м
Расстояние от экрана-стенки до РТ, S2	40,00	м
Высота экрана-стенки, hэкp	2,00	м
Высота ИШ, hиш	1,00	м
Высота РТ, hрт	1,50	м
a	5,10	м
b	40,00	м
c	45,00	м
Разность хода, δ	0,10	м
Снижение экраном, LAэкp	14,11	дБА

Таким образом уровни шума на фасаде здания составляют 56/56 дБА для эквивалентного уровня шума (день/ночь) и 57/57 дБА для максимального уровня (день/ночь). Требуемое снижение шума для

Для защиты от ЭМИ трансформаторной подстанции предлагается установка тонкой защитной пленки ИТО. Такая пленка будет экранировать часть ЭМИ, таким образом напряженность поля в местах пребывания человека точно не будет превышать 5 кВ/м. Частично ЭМИ экранируют железобетонные конструкции в стенах здания. Поэтому для большей защиты предлагается устанавливать проводящую тонкую пленку на шумозащитное остекление. Трансформаторная подстанция на максимальное рабочее напряжение 110 кВ и мощностью 25 МВА с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла. Исходные данные для расчета ЭМИ трансформаторной подстанции представлены в таблице 4.

Таблица 1. Показатели качества работы ОМНГ трансформаторной подстанции							
23. Напряжение, кВ	24. Мощность, МВА	25. Расстояние			26. Высота		27. Максимальная нагрузка, кВА
		28. Длина, км	29. Максимальная нагрузка, МВА	30. Максимальная нагрузка, МВА	31. Максимальная нагрузка, МВА	32. Максимальная нагрузка, МВА	33. Максимальная нагрузка, МВА
34. 110	35. 25	36. 14	37. 2,5	38. 1	39. 6	40. 11	41. АС-70

$$E = 3 * \frac{q_{l1}}{2 * \pi * \varepsilon_0} * \frac{1}{((h - h_f)^2 + r_0^2)}, \quad (1)$$

219

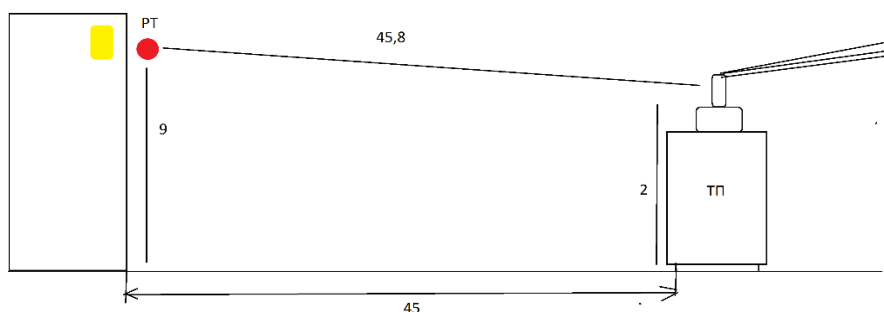


Рисунок 3 – Расчетная схема

q_{l1} найдем по формуле емкости между подстанцией и фасадом здания, $\cos\varphi$ показывает, что не вся мощность подстанции расходуется на полезную энергию:

$$q_{l1} = \varepsilon_0 * \varepsilon * \frac{h * 33}{(h - h_t)^2 + r_0^2 * \cos\varphi} * U_{l1}, \quad (2)$$

Таким образом напряженность поля в РТ находится по формуле:

$$E = 3 * \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon * \frac{h * 33}{(h - h_t)^2 + r_0^2}}{2 * \pi * \varepsilon_0} * \frac{1}{(h - h_t)^2 + r_0^2 * \cos\varphi} * U_{l1} * 5 = \varepsilon * \frac{h * 99}{2 * \pi * ((h - h_t)^2 + r_0^2)^2 * \cos\varphi} * U_{l1} * 5 = \frac{h * 99}{2 * \pi * ((h - h_t)^2 + r_0^2)^2 * \cos\varphi} * U_{l1} * 5 = \frac{9 * 99}{2 * \pi * ((9 - 2)^2 + 45^2)^2 * 0,91} * 110 * 5 = 0,02 \text{ кВ/м}$$

Эффективность экранирования тонкой пленкой ИТО оценим по формуле:

$$\mathcal{E}_{ITO} = \mathcal{E}_{отр} * \mathcal{E}_{погл} \quad (3)$$

Ослабление энергии падающей волны за счет отражения на границе сред оценим по формуле:

$$\mathcal{E}_{отр} = 151 - 10 \lg(f * \mu * p) \quad (4)$$

Ослабление энергии в результате поглощения экраном оценим по формуле:

$$\mathcal{E}_{погл} = 290 * d * \sqrt{\frac{\mu}{\lambda * p}}$$

Магнитная проницаемость μ тонкой пленки ИТО составляет 1,01 Гн/м, толщина пленки d составляет 100 нм, удельное сопротивление тонкой пленки p составляет $5,21 \cdot 10^{-4} \text{ Ом*см}$. Длина волны ЭМИ на промышленной частоте $f = 50 \text{ Гц}$ составляет $\lambda = 60000 \text{ м}$, таким образом эффективность экранирования тонкой пленкой ИТО составляет 166 дБ.

Установка шумозащитного остекления с нанесенной на него пленкой ИТО позволяет обеспечить защиту от шума и ЭМИ [4-6]. Таким образом можно сделать вывод, что данный способ защиты можно использовать в ситуациях, когда в условиях уже сложившейся застройки трансформаторная подстанция находится вплотную к жилым домам. Такой способ защиты позволит дополнительно обезопасить человека от ЭМИ и шума.

Незначительно повышенный шум в сочетании с электромагнитным излучением способен вызывать неврозы и нарушение сна. В данной работе предложено совмещение защиты от шума и ЭМИ. Нанесение тонких проводящих пленок ИТО позволяет обеспечить защиту от ЭМИ, а оконный блок с повышенной звукоизоляцией защиту от шума. Данный способ позволит обеспечить комплексную зданий, расположенных вблизи трансформаторных подстанций. В работе сделан упрощенный расчет шума трансформаторной подстанции и расчет ЭМИ. За исходные данные была принята существующая трансформаторная подстанция Ленэнерго по адресу шоссе революции 51 лит. Б. В результате расчетов получен результат, что для защиты жилого здания от шума и ЭМИ нужен оконный блок со звукоизоляцией 26 дБА, а нанесенная на него проводящая пленка ИТО обеспечит экранирование от ЭМИ промышленной частоты 50 Гц эффективностью 166 дБ. Толщина слоя нанесенного покрытия на остекления составляет 100 нм с коэффициентом пропускания света 0,85.

Научный руководитель – профессора Н.И. Иванов, Т.Н. Патрушева

Библиографический список

1. П.В. Малков и др. 5.37. Удельный вес численности мужчин и женщин, занятых в организациях на работах с вредными и (или) опасными условиями труда // Российский статистический ежегодник. — Москва: Росстат, 2020. — С. 141. — 705 с. — ISBN 978-5-89476-497-9. Архивировано 11 мая 2023 года.
2. СП 254.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от производственного шума.
3. Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика. Осипов Г.Л., Коробков В.Е., Климухин А.А., Прохода А.С., Карагодина И.Л., Зотов Б.С. 1993.
4. Александров, Г.Н. Передача электрической энергии / Г.Н. Александров. — 2-е изд. — СПб.: Издво Политехн. ун-та, 2009. — 412 с.
5. Александров, Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды / Г.Н. Александров. — Л.: Энергоатомиздат, 1989. — 357 с.

7. ГОСТ 33329-2015 «Экраны акустические для железнодорожного транспорта. Технические требования.»
8. ГОСТ 31295.2-2005 «Шум. Затухание звука при распространении на местности»
9. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.
10. Belinsky S.A., Kuznetsov K.B. [Estimation of Parameters of 50 Hz Electromagnetic Fields in RU-3.3 kV Traction Substations]. Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti [Life safety. App.]. Moscow, Publishing House of the New Technology, 2012, no. 7, pp. 12–17. (in Russ.)

УДК 629.786

МАРШРУТНАЯ СЪЕМКА КАК ИНСТРУМЕНТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РАЙОНОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С БОРТА РС МКС

В.В. Коротких

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

Практика получения изображений поверхности Земли из космоса насчитывает более полувека. Первый полет в космос, выполненный 12 апреля 1961 года космонавтом Гагариным Ю.А., позволил убедиться в возможности наблюдения различных объектов на земной поверхности с борта пилотируемого космического корабля. А уже в августе 1961 года с борта космического корабля «Восток» космонавт Г.С. Титов впервые выполнил фотографирование Земли из космоса. С этого времени космический мониторинг земной поверхности с борта пилотируемого космического аппарата (ПКА) стал частью системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) нашей страны. Начало пилотируемого освоения космоса позволило выполнять ДЗЗ на новом уровне: у человека появилась возможность смотреть на объекты наблюдения поднявшись на высоту несколько сотен километров.

За более чем полувековую историю проведения ДЗЗ с борта ПКА область применения данных из космоса значительно расширилась. Выросло количество и разнообразие систем дистанционного зондирования, устанавливаемых на космических аппаратах.

В настоящее время на борту РС МКС проводят различные КЭ по наблюдению Земли из космоса:

- КЭ «Ураган» проводится с целью наблюдения и регистрации развития катастрофических явлений с борта РС МКС и разработки критериев классификации и дешифрирования признаков катастрофических явлений.
- КЭ «Экон-М» проводится с целью экологического обследования различных объектов на территории Российской Федерации и зарубежных государств посредством ведения ВПН с борта РС МКС.
- КЭ «Дубрава» проводится с целью отработки методов инвентаризации лесов, определения воздействий на лесной покров природных и техногенных факторов с использованием визуально-инструментального и спектрометрического мониторинга, на последующих этапах эксперимента с использованием гиперспектральной и инфракрасной аппаратуры.
- КЭ «Сценарий» проводится с целью отработки методов оценки развития катастрофических и потенциально опасных явлений по результатам их наблюдения с борта МКС аппаратурой дистанционного зондирования Земли.

ДЗЗ в значительной степени может использоваться как средство изучения всех компонентов окружающей среды, в том числе антропогенного влияния на атмосферу, подстилающую поверхность и водные объекты, антропогенно преобразованные ландшафты и источники загрязнения. Разные виды ДЗЗ позволяют исследовать в динамике изменения, которые происходят в атмосфере, гидросфере и почвах, отследить источники выбросов и сбросов загрязняющих веществ и направление их распространения и т.д. Такая информация способствует быстрому реагированию на возникновение неблагоприятных ситуаций и немедленному применению мер по их предупреждению [2].

Выполнение задач ДЗЗ с борта РС МКС позволяет выделить следующие преимущества, которые обеспечиваются наличием экипажа на борту:

- обзорность (радиус зоны эффективного обнаружения малоразмерных объектов равен высоте полета ПКА);
- оперативность (в режиме свободного поиска);
- возможность поиска и фотосъемки подвижных объектов и объектов с неизвестными координатами;
- возможность наблюдения с помощью оптических средств, имеющих переменную кратность увеличения;
- возможность наблюдения объекта на пролете под различными ракурсами;
- возможность выбора типа фотокамеры и сменного объектива в широком диапазоне изменения фокусного расстояния (от широкоугольного до сверхдлиннофокусного);
- возможность сопровождения и непрерывного наблюдения объекта на участке пролета;
- гибкость в выборе средств, способа наблюдения и параметров фотосъемки;
- возможность выбора в сюжете съемки информативной зоны, содержащей дешифровочные признаки объекта и наведения на него центра кадра;

- возможность фотосъемки в разрыв облаков с выбором наиболее благоприятного момента съемки;
- возможность выявления изменений в ранее наблюдаемом объекте и принятие решения на их фотосъемку;
- возможности зрительного анализатора космонавта, позволяющие получать информацию, которую трудно зафиксировать инструментально;
- устойчивость к изменению внешних факторов и помехам;
- возможность ручного управления фокусировкой и другими параметрами фотокамеры, когда ее автоматизированные подсистемы работают с ошибками;
- возможность использования априорной информации и косвенных признаков для обнаружения и распознавания объекта;
- оперативность первичной обработки и селекции полезной информации для передачи по каналам связи потребителю.

Для проведения ДЗЗ используется штатная аппаратура РС МКС, технические возможности которой позволяют проводить ДЗЗ, земной поверхности в видимом диапазоне спектра, оперативно передавая полученные результаты по каналам связи на Землю для проведения дальнейшего анализа. На рисунке 1 А.В. Федяев выполняет ДЗЗ рамках КЭ «Экон-М».

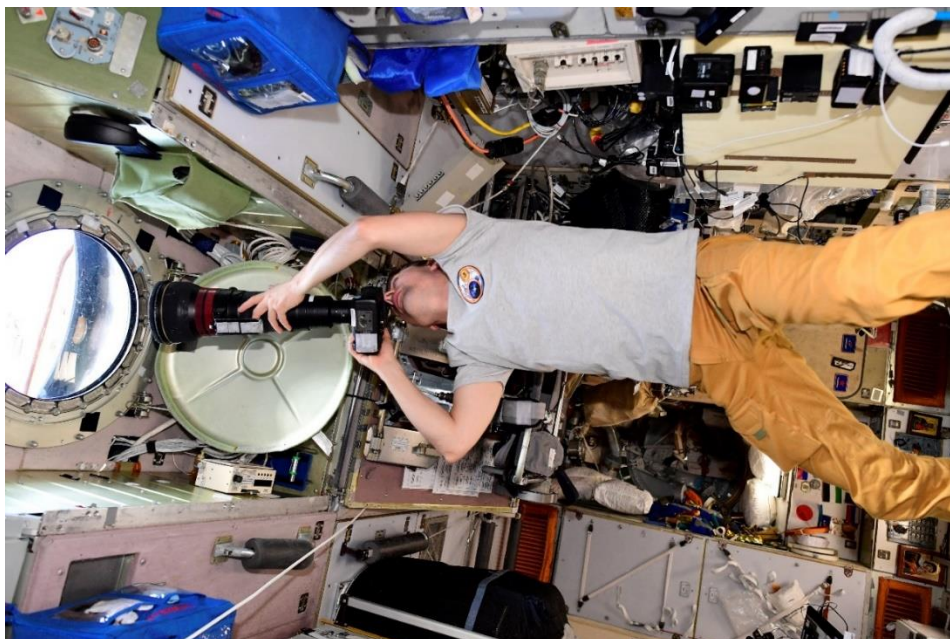


Рисунок 1. Космонавт А.В. Федяев выполняет фотосъемку с борта РС МКС

• В настоящее время на борту РС МКС используются фотокамеры *Nikon D5*, *Nikon D850* и *Nikon Z9* с фотообъективами *AF-S Nikkor 600 mm f/4* и *AF-S Nikkor 800 mm f/5.6*, *Sigma DG APO 300-800 mm f/ 5.6 EXHSM* и телеконвертерами *Nikon TC-20E* и *Nikon TC800-1,25E*, *Nikon TC-14E*, *Nikon TC-17E*. Использование объективов с различным фокусным расстоянием позволяет выполнять как крупномасштабную, так и детальную съемку наземных объектов. Размещение фотоаппаратуры в интерьере РС МКС представлено на рисунке 2.



Рисунок 2. Расположение фототехники и иллюминаторов в РС МКС.

КЭ «Экон-М», постановщиком которого является Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, выполняется на борту РС МКС с 2012. Его основной целью является экологический мониторинг состояния земной поверхности в районах деятельности различных объектов.

За годы проведения КЭ «Экон-М» отработаны методика выполнения визуально-приборных наблюдений с борта РС МКС и процесс подготовки космонавтов к проведению ДЗЗ из космоса. Использование возможностей космонавта при выполнении ДЗЗ позволяет выполнять интеллектуальную фотосъемку. Космонавт осуществляет поиск и опознавание объектов наблюдения, настройку фотоаппаратуры, определение времени и параметров фотосъемки, контроль за изменением условий и обстановки при выполнении фотосъемки заданных объектов, а также непрерывный анализ, приём и обработку новой информации.

В качестве преимуществ космической съемки с борта РС МКС необходимо отметить детальность космических снимков, большую обзорность регистрируемой территории, возможность повторного получения данных через определенные промежутки времени, оперативность получения информации, а также возможность применения комплексного анализа и оценки динамики развития на основе оперативного картографирования.

При выполнении съемки космонавт делает как одиночные снимки, так проводит маршрутную съемку объектов большой площади. Маршрутная съемка подразумевает фотосъемку с перекрытием порядка 60% последующих кадров. Такая съемка позволяет в процессе обработки фотоснимков специалистами на Земле создавать фотомозаику.

Фотомозаика – это фоторепродукция серии космических фотоснимков, составленная таким образом, что детали одной фотографии соответствуют деталям всех соседних фотографий. Фотомозаика представляет собой бесшовное изображение из нескольких снимков с цветокоррекцией или без в случае, если существует необходимость быстрой обработки изображений, которое получается в результате объединения отдельных космических снимков.

Космонавты достаточно давно выполняют серийную съемку площадных объектов, однако выполнение маршрутной фотосъемки с перекрытием с возможностью последующего монтажа фотомозаики началось относительно недавно.

Фотомозаики по сравнению с одиночными фотоснимками имеет следующие преимущества:

1. Фотомозаика используется как самостоятельный измерительный продукт, когда нужны материалы космической съемки и аэросъемки на большую площадь земной поверхности, не покрываемую одним кадром, вследствие чего необходимо использовать нескольких космических снимков или аэрофотоснимков.
2. Фотомозаика позволяет проводить анализ больших площадей различных территорий, вычленять и детализировать для анализа конкретные объекты.

Одним из недостатков одиночных снимков является малая информативность в связи с малой площадью охвата.

Фотомозаики собираются путем отбора из огромного массива фотографий необходимых серий снимков. Далее эти снимки проходят цветокоррекцию, после чего фотографии загружаются в специальное ПО и в автоматическом режиме склеиваются. Так как перекрытие составляет 60% автоматика прекрасно справляется. В случае расхождений есть возможность сопоставить снимки вручную.

Процесс создания фотомозаики нельзя назвать быстрым. Так как отбор и обработка большого массива фотоснимков требуют значительных временных затрат. Помимо этого, для ускорения процесса требуется производительные графические станции, так как обработка графических изображений требует мощных вычислительных ресурсов.

Для оперативности, фотомозаики можно собирать без предварительной цветокоррекции. Так как необходимо в максимально короткие сроки представить материал для изучения.

Информация, полученная в ходе выполнения КЭ «Экон-М» позволяет не только определить координаты, но и оценить масштаб катастрофических процессов, а также сделать прогноз их развития и возможного ущерба, позволяет значительно ускорить реагирование на возникновение негативных экологических процессов и ликвидацию их последствий.

Обработав информацию, полученную от российских космонавтов экипажа экспедиции МКС-71 в рамках КЭ «Экон-М», было сформировано 8 фотомозаик.

В качестве примера приведем фотомозаики наводнения на реке Урал.

Наводнение – это значительное затопление территории в результате подъема уровня воды в реке, озере, водохранилище, наносящее материальный ущерб.

Обильное таяние льдов Ириклинского водохранилища (рисунок 3) привело к резкому подъему воды, что и стало причиной прорыва защитной дамбы г. Орск. На слайде представлен фотоснимок реки Урал в районе г. Орск 11.04.2024 года 05 апреля 2024 произошел прорыв участка защитной дамбы города Орск.



Рисунок 3. Фотомозаика ледового затора на Ириклинском водохранилище

По данным МЧС, в Орске было подтоплено более 6132 жилых домов и 9643 приусадебных участка. Эвакуированы 4402 человека. С 4 апреля в Оренбургской области действовал режим ЧС регионального уровня.

В след за городом Орском рекой Урал был подтоплен Оренбург.

По целеуказаниям с Земли экипаж провел фотосъемку района подтопления его для экологического обследования (тематического дешифрирования). В соответствии с радиограммой производилась маршрутная (серийная) площадная фотосъемка данных районов, экипажем МКС-71 было получено 284 снимка, что позволило провести анализ экологический больших территорий Оренбургской области.

Результаты проведения КЭ «Экон-М» были оперативно переданы в МЧС.

Обработка специалистами серии снимков районов подтопления г. Орск и г. Оренбург позволила получить фотомозаику (рисунок 4) района наводнения имеющую высокое разрешение. Благодаря которому появилась возможность детально рассмотреть территории затопления и спрогнозировать нанесенный ущерб.

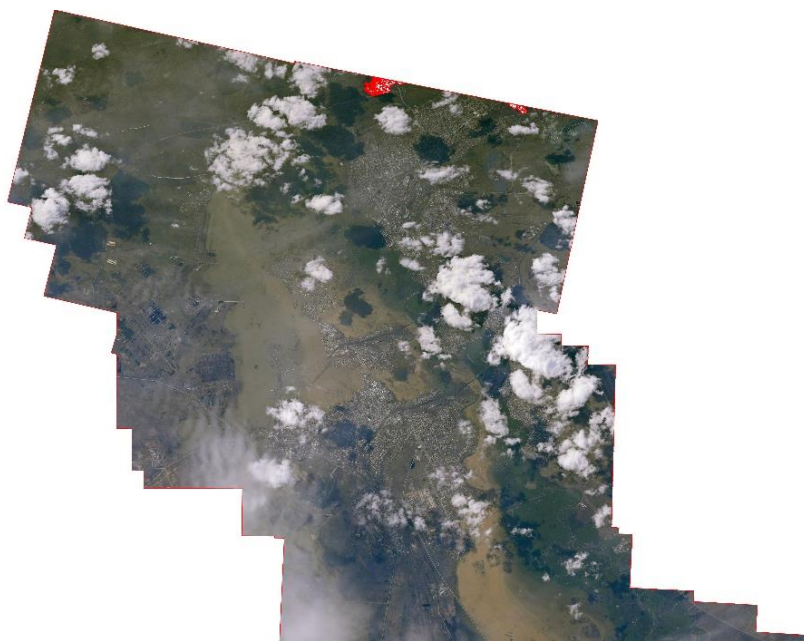


Рисунок 4. Фотомозаика зоны затопления г. Орск

Фотомозаика представленная на рисунке 4 (Орск) получена из 32 космических фотоснимков, имеет площадь около 190 км^2 (20 км на 9,5 км), что позволяет оценить площадь подтопления города Орск и прилегающих к нему территорий. Так же на снимках можно обнаружить зоны прорыва дамбы. Также на фотомозаике представленной на рисунке 5 получена из 51 космических фотоснимков, имеет площадь около 414 км^2 (23 км на 18 км), что также позволяет оценить площадь подтопления города Оренбург и прилегающих к нему территорий.



Рисунок 5. Фотомозаика зоны затопления г. Оренбург

Отчётливо дешифрируется русло реки (тёмный фон) и подтопленные территории (более светлый фон). Разлив р. Урал в самом широком месте составил порядка 5 км.

Многолетний опыт выполнения КЭ «Экон-М» с борта РС МКС подтверждает необходимость и целесообразность проводимых исследований. Получение информации о функционировании объектов на земной поверхности способствует разработке новых технологий и инновационных решений при выполнении ДЗЗ с борта РС МКС для проведения комплексного анализа природных и природно-техногенных систем как на территории нашей страны, так и на территории зарубежных государств.

Библиографический список

1. Кошенко А.В., Прокопенко Ю.П. Основные аспекты подготовки космонавтов к проведению экологического мониторинга с борта РС МКС – материалы юбилейных I международных общественно-научных чтений, посвященных памяти Ю. А. Гагарина, 9-12 марта 2023 г.

2. Корзун В.Г., Шкаплеров А.Н., Темарцев Д.А., Кошенко А.В., Прокопенко Ю.П. Участие ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» в работах по экологическому обследованию земли из космоса – материалы XLVIII Академических чтений по космонавтике «Королевские чтения», 23-26 января 2024 г.
3. Шекоян С.В. Дистанционное зондирование Земли как способ оценки качества окружающей среды урбанизированных территорий. – Здоровье населения и среда обитания – ЗНисО, №4 2020 г., с. 5-12.
4. 6. Корягина Н.В., Поршакова А.Н.. Экологический мониторинг урбанизированных территорий – Пенза: ПГУАС, 2014. – 128 с.
5. Исследование Земли и космоса. Эксперимент «Экон-М» URL: <https://www.energia.ru/ru/iss/researches/study/10.html> (дата обращения 03.03.2025)

УДК 331.45

ОЦЕНКА РИСКОВ НА ГАЗОПРОВОДЕ-ОТВОДЕ И ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Д.М. Олейник

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Газификация регионов России – наиболее обширная и значимая часть деятельности ПАО «Газпром» в пределах Российской Федерации. Данное направление работы обеспечивает активное развитие регионов РФ. В рамках программы помимо ПАО «Газпром», ООО «Газпром межрегионгаз», газораспределительных, а также газотранспортных организаций принимают активное участие правительственные структуры субъектов – участников программы газификации.

ПАО «Газпром» активно работает над газоснабжением и газификацией регионов на основании 5-ти летних программ. В них включена информация о конкретных объектах, сроках, сумме и источниках финансирования.

В период 2021-2025 годы планируется построить более 24000 километров газопроводов для обеспечения подачи газа в 3,6 тысячи населенных пунктов на территории 72 регионов РФ.

По сравнению с предыдущим 5-ти летним периодом наблюдается увеличение количества единиц инфраструктуры обеспечивающей газификацию в 2,5 раза. В свою очередь инвестиции запланированные на текущую программу сопоставимы с суммой инвестиций за предыдущие 15 лет.[1]

Газовая промышленность является одним из базовых сегментов российской экономики. Однако работа в отрасли сопряжена с рисками в области промышленной безопасности. В связи с этим актуально выявление, анализ и изучение рисков в газотранспортной и газораспределительной системах.

В рамках статьи рассматриваются результаты исследования наиболее опасных и наиболее вероятных сценариев аварии на ГО и ГРС (объект находится на стадии проектирования).

Протяжённость ГО – 248 км, производительность ГРС – 30000 м³/ч.

При подробном анализе сформированы группы сценариев:

Группа сценариев Стр1 «Пожар в котловане» («Пожар колонного типа»): Разрыв газопровода в основном на плотных и твердых грунтах приводит к образованию воронки в земле. Вследствие резкого выхода сжатого газа формируется первичная ударная воздушная волна. Разлетаются фрагменты разрушенной трубы и выброшенные частицы грунта. Из образовавшегося углубления газ выходит вверх, формируя плотный вертикальный шлейф. При возгорании газового потока образуется пламя в виде цилиндрического столба. Дополнительно возникает вторичная ударная волна, обладающая относительно слабым разрушительным воздействием. В зоне термического излучения от пожара могут оказаться люди, инженерные сооружения, техника, транспортные средства и растительность. Это приводит к риску получения ожогов разной степени тяжести, травм, вызванных ударной волной и разлетающимися обломками. Помимо этого, возможны разрушения или повреждения объектов инфраструктуры, нарушение природного баланса и загрязнение атмосферы продуктами горения.[2]

Группа сценариев Стр2 «Струевые пламена»: Разрыв газопровода приводит к выбросу фрагментов разрушенной трубы на поверхность, особенно в условиях слабонесущего грунта. Вследствие этого формируется первичная воздушно-ударная волна (ВУВ), сопровождающаяся разлетом обломков трубы и частиц грунта. Из поврежденного участка трубопровода под высоким давлением выходят две мощные струи газа, которые, воспламеняясь, образуют два пламени, направленных горизонтально или под углом вверх. При этом возникает вторичная ВУВ, обладающая относительно малой разрушительной силой. В зоне термического воздействия пожара могут оказаться люди, инженерные сооружения, транспортные средства и растительность, что приводит к получению ожогов различной степени тяжести, травм от воздействия ударной волны и разлетающихся обломков. Кроме того, происходит разрушение или повреждение объектов инфраструктуры, элементов природной среды, а также загрязнение атмосферы продуктами горения.[2]

Группа сценариев Стр3 «Рассеивание низкоскоростного шлейфа газа»: Разрыв газопровода в твердых и плотных грунтах приводит к образованию углубления в земле. В результате выброса сжатого газа возникает воздушно-ударная волна (ВУВ), сопровождающаяся разлетом обломков трубы и грунта. Газ из поврежденного участка выходит в виде колоннообразного шлейфа с низкой скоростью. Происходит его постепенное рассеивание в окружающей среде без воспламенения. В зону барического воздействия или газового облака могут попасть люди, сооружения, оборудование, транспорт. Это может привести к травмам, повреждению инфраструктуры и техники из-за воздействия ударной волны

и разлетевшихся фрагментов. Кроме того, при вдыхании газового облака существует риск удушья, а утечка природного газа приводит к загрязнению атмосферы.[2]

Группа сценариев Сгр4 «Рассеивание двух струй газа»: Разрыв газопровода в слабонесущих грунтах приводит к выбросу поврежденных участков трубы на поверхность. Вследствие этого формируется первичная воздушно-ударная волна (ВУВ), сопровождающаяся разлетом фрагментов трубы и грунта. Из поврежденного участка под высоким давлением вырываются две отдельные струи газа с высокой скоростью, которые затем рассеиваются в окружающей среде без воспламенения. В зону барического воздействия или газового облака могут попасть люди, сооружения, техника и оборудование. Это может привести к травмам, разрушениям и повреждениям объектов под воздействием ударной волны, напора струй или разлетевшихся обломков. Кроме того, существует угроза удушья при вдыхании газового облака, а также загрязнение атмосферы природным газом.[2]

Группа сценариев Сгр5 «Пожар колонного типа в загроможденном пространстве»: Разрыв надземного технологического газопровода вблизи препятствий, таких как оборудование, здания или сооружения, сопровождается образованием воздушно-ударной волны (ВУВ). В момент разрушения происходит разлет обломков трубы, а из разорванных концов газопровода устремляются струи газа. Их распространение ограничивается окружающими объектами, что влияет на динамику движения газового потока. В результате формируется газозвушная смесь, которая воспламеняется, вызывая пожар колоннообразной формы в условиях загроможденного пространства. Высокая температура огня оказывает воздействие на технологические установки, постройки и персонал предприятия. Это может привести к повреждению или разрушению оборудования, зданий и сооружений, а также имущества третьих лиц и элементов природной среды за пределами объекта. Люди, включая работников предприятия и, возможно, население, могут получить ожоги разной степени тяжести, а также травмы в результате воздействия ударной волны или разлетевшихся обломков.[2]

Группа сценариев Сгр6 «Рассеивание низкоскоростного шлейфа газа» при разрыве надземного газопровода: Разрыв надземного газопровода в непосредственной близости от преград, таких как здания, сооружения или оборудование, приводит к образованию воздушно-ударной волны (ВУВ) в момент аварии. Разрушение сопровождается разлетом фрагментов трубы и осколков. Из поврежденных концов газопровода выходят струи газа, распространение которых ограничивается окружающими объектами. Впоследствии газ рассеивается в атмосфере без возгорания. В результате персонал предприятия, здания, инженерные конструкции и технологическое оборудование оказываются в зоне воздействия барических процессов, разлетевшихся обломков или скопившегося газового облака. Это может привести к травмированию сотрудников, повреждению строений и оборудования, а также вызвать вторичную разгерметизацию находящихся под давлением систем. При попадании в зону высокой концентрации газа существует риск асфиксии, а выброс природного газа в окружающую среду приводит к загрязнению атмосферы.[2]

Группа сценариев Сгр7 «Пожар пролива горючей жидкости»: Повреждение резервуара с горючей жидкостью приводит к ее разливу по подстилающей поверхности. В результате испарения образуется облако паровоздушной смеси (ПВС). При контакте с источником воспламенения смесь загорается, переходя в пожар пролива. Горение распространяется по поверхности разлитой жидкости, оказывая непосредственное термическое воздействие на окружающую среду. В процессе горения выделяется тепловое излучение, способное оказывать разрушительное влияние на близлежащие объекты.[2]

Группа сценариев Сгр8 «Взрыв ТВС»: Частичное или полное разрушение резервуара с горючей жидкостью (ГЖ) приводит к ее разливу по подстилающей поверхности. В результате испарения формируется облако паровоздушной смеси (ПВС). При достижении критических условий смесь воспламеняется в детонационном режиме, создавая мощное барическое воздействие. В зоне поражения оказываются сотрудники предприятия, здания, сооружения и технологическое оборудование, что может привести к травмам персонала, а также повреждению конструкций, инженерных систем и оборудования.[2]

Группа сценариев Сгр9 «Рассеивание паров одоранта»: Нарушение целостности или разгерметизация резервуара, предназначенного для хранения одоранта, приводит к его утечке за пределы блок-бокса и емкостей. В результате образуется облако аварийно-химически опасного вещества, которое распространяется по направлению ветра. Это создает риск токсического воздействия на персонал предприятия, а также потенциальную угрозу здоровью населения в прилегающих районах.[2]

Наиболее опасные сценарии:

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод, что наибольшую угрозу для первой части декларируемого объекта, а также для всего объекта в целом, представляет повреждение газопровода за пределами защитного кожуха в зоне железнодорожного полотна - перегон "КБ - ЧН" на ПК24+20-ПК27+50 газопровода-отвода с последующим развитием пожара в виде колонного типа и попаданием поезда с пассажирами под воздействие поражающих факторов аварии. Оценки, выполненные в соответствии с подходами, изложенными в нормативно-правовых актах РФ, показали, что наибольшее число пострадавших при развитии пожара «колонного» типа может составить до 30 - 40 человек в случае попадания в зону поражения поездов. Из этого количества до 15 человек могут погибнуть. Следует отметить, что вероятность этого события ничтожно мала (практически не значима). Учитывая, что поезд пересекает опасную зону не более чем за 10 сек. и то, что вагоны поезда обеспечивают частичную защиту находящихся в них людей от воздействия поражающего фактора, вероятность гибели людей ничтожно мала. Индивидуальный риск разового пересечения газопровода людьми на поезде оценивается на уровне 10-13 1/год.

Произведенные расчеты показали, что наиболее опасным для второй составляющей декларируемого объекта (площадка ГРС) является разрушение входного газопровода ГРС с последующим развитием пожара «колонного» типа (Сгр1). Расчеты показали, что максимальное количество пострадавших оценивается на уровне 2–3 человек (обслуживающий персонал в период плановых осмотров и ремонтов ГРС), при неблагоприятных условиях все они могут погибнуть.

Наиболее вероятные сценарии:

Наиболее вероятными на газопроводе-отводе к ГРС являются разрушение четвертой (км 37,36 – км 67,29) секции, а наиболее ожидаемыми сценариями аварии на объекте являются распространения низкоскоростного шлейфа газа без воспламенения. Частота этих сценариев может быть оценена на уровне $1,046 \times 10^{-3}$ 1/год. Наиболее вероятное число пострадавших при таких авариях составит до одного человека.

На площадке ГРС наиболее вероятным сценарием аварии будет разрыв надземного газопровода Ду 200 с давлением 1,2 МПа с дальнейшим развитием пожара колонного типа в загроможденном пространстве. Вероятность реализации этого сценария оценивается величиной $5,904 \times 10^{-6}$ 1/год. Наиболее вероятное число пострадавших при такой аварии составит до одного человека (при неблагоприятных условиях он может погибнуть).

При оценке уровня безопасности использовались следующие показатели риска:

- Технический риск;
- Потенциальный территориальный риск;
- Индивидуальный риск;
- Коллективный риск;
- Социальный риск;
- Ожидаемый ущерб.

Рассматриваемые участки газопровода состоят из отдельных секций, разделенных линейными кранами, что существенно снижает потенциальный уровень опасности за счет ограничения зоны воздействия поражающих факторов в случае аварийных ситуаций. Даже при наиболее неблагоприятном развитии аварии населенные пункты не окажутся в зоне воздействия поражающих факторов, так как находятся на значительном удалении, превышающем границы возможного распространения последствий.

Ближайший населенный пункт (г. КК), расположен от площадки ГРС на удалении около 0,5 км.

Проведенные расчеты зон действия поражающих факторов от возможных аварий на трубопроводах и оборудовании расположенных на площадке ГРС показали, что в зону действия поражающих факторов населенные пункты не попадают.

Произведенный расчет индивидуального риска производственного персонала, обслуживающего линейную часть проектируемого объекта, показал, что максимальный индивидуальный риск специалиста не превышает величины $3,28 \times 10^{-7}$ 1/год. Такими специалистами являются линейные обходчики. У других специалистов производственного персонала ЛПУМГ, периодически выезжающих в районы расположения крановых узлов, площадок КП ТМ, СКЗ (специалисты служб ЛЭС, связи автоматики, ЭХЗ) для их обслуживания индивидуальный риск от эксплуатации проектируемого газопровода значительно ниже.

Форма обслуживания ГРС – надомная. Основную часть времени персонал находится в доме оператора, а пребывание его на наиболее опасных участках (на открытой площадке ГРС) составляет до одного часа в сутки. Произведенные расчеты показали, что индивидуальный риск оператора не превышает величину $2,08 \times 10^{-7}$ 1/год. Индивидуальный риск персонала ЛПУМГ, осуществляющего периодическое техническое обслуживание и ремонт оборудования на площадке ГРС, от возможных аварий на оборудовании и трубопроводах рассматриваемого объекта, значительно ниже, чем у оператора ГРС и оценивается на уровне 10^{-9} – 10^{-8} 1/год.

Выводы:

Произведенный расчет индивидуального риска производственного персонала, обслуживающего линейную часть проектируемого объекта, показал, что максимальный индивидуальный риск специалиста не превышает величины $3,28 \times 10^{-7}$ 1/год. Такими специалистами являются линейные обходчики. Произведенные расчеты показали, что индивидуальный риск оператора ГРС не превышает величину $2,08 \times 10^{-7}$ 1/год. Таким образом, в нашем случае индивидуальные риски для персонала могут быть признаны, безусловно, допустимыми.

Из выполненных расчетов видно, что в зону действия поражающих факторов при возможных авариях на проектируемом газопроводе, развивающихся даже по самому неблагоприятному сценарию, населенные пункты не попадают. Индивидуальный риск разового пересечения газопровода людьми на транспорте (автомобили и поезда) оценивается на уровне 10^{-13} 1/год.

Таким образом, проведенные расчеты индивидуальных рисков для персонала и населения подтверждают их соответствие установленным нормативным предельным значениям индивидуального пожарного риска, обусловленного воздействием опасных факторов пожара на производственном объекте. Эти значения, регламентированные статьей 93 Федерального закона от 22.07.2008 № 123–ФЗ, не превышают пределов, признаваемых допустимыми как в отечественной, так и в мировой практике.

Определены частоты возникновения событий – попадание автомобилей в зону действия поражающих факторов от возможных аварий на проектируемом газопроводе. Они составляют величины от $1,92 \times 10^{-7}$ 1/год до $7,65 \times 10^{-6}$ 1/год. Рассчитанные частоты оцениваются как редкие события.

Определена частота возникновения событий – попадание поездов в зону действия поражающих факторов от возможных аварий на проектируемом газопроводе. Она составляет величину от $2,96 \times 10^{-9}$ 1/год до $3,55 \times 10^{-8}$ 1/год. Рассчитанные частоты оцениваются как практически невероятные события.

Попадание автомобиля или пассажирского поезда в зону действия поражающих факторов от возможных аварий на газопроводе угрожает жизни людей (водителям и пассажирам транспортных средств). Поэтому тяжесть последствия события оценена как критическое событие.

Произведенные расчеты показали, что для проектируемого объекта уровень риска пересечения газопровода со всеми автодорогами ниже допустимого, предусмотрены дополнительные меры безопасности, которые приведены в составе проектной документации на проектирование и строительство объекта.

Уровень риска пересечения газопровода с железными дорогами ниже допустимого при осуществлении контроля принятых мер безопасности.

Принятые проектные решения обеспечивают достаточную степень безопасности объекта в случаях возникновения ЧС. На основании полученных расчетных данных можно заключить, что эксплуатационный риск проектируемого промышленного объекта для персонала и населения остается в пределах, признанных допустимыми как в отечественной, так и в мировой практике.[3]

Научный руководитель – к.т.н., доцент С.К. Петров

Библиографический список

1. Газпром. Газификация // Gazprom.ru: сайт. URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/gas-infrastructure-expansion>
2. Приказ Ростехнадзора от 22.12.2022 N 454 "Об утверждении Руководства по безопасности "Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа" // Garant.ru: сайт. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72043198/>
3. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром» / СТО Газпром 2-2.3-351-2009. – М.: ОАО «Газпром», разработка ООО «Газпром ВНИИГАЗ», оформление ООО «Газпром экспо», 2009.

УДК 544.08

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ ПИПЕРАЗИНА И МОРФОЛИНА

Д.В. Степанова, А.Н. Лапушкина, Р.В. Якушин, Д.А. Александрова

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

Портативный ионно-дрейфовый детектор (ИДД) «Кербер» (ГК «Южполиметалл-Холдинг», г. Москва) работает по принципу спектрометрии ионной подвижности (СИП) и предназначен для обнаружения следовых количеств малолетучих и летучих органических веществ, в том числе токсичных, аварийно химически опасных (АХОВ), взрывчатых и наркотических в воздухе контролируемых объектов, на поверхности различных предметов, на пальцах и одежде людей в целях обеспечения безопасности [1].

Метод спектрометрии ионной подвижности (СИП) основан на ионизации молекул исследуемого вещества и на последующем разделении образовавшихся ионов по их подвижности в дрейфовой камере под действием электрического поля. Ионы окружающего воздуха (реактант-ионы) генерируются импульсным коронным разрядом в разрядной камере спектрометра, и при введении в прибор молекул аналита в газово-воздушной смеси реактант-ионы передают им заряд по механизму химической ионизации при атмосферном давлении. Прибор регистрирует время дрейфа частиц от момента образования до момента обнаружения их на ионном коллекторе.

В данной работе продемонстрированы детектирующие возможности ИДД «Кербер» по определению следовых количеств пиперазина и морфолина. Эти насыщенные азотсодержащие гетероциклы применяются при синтезе биологически активных веществ и могут присутствовать в воздухе рабочей зоны. Пиперазин и морфолин являются веществами, вызывающими химические ожоги кожи и дыхательных путей, повреждение глаз, отёк лёгких и поражение нервной системы.

Спектры ионной подвижности были получены при атмосферном давлении, в качестве дрейфового газа использовали окружающий воздух, и в целях регистрации образующихся ионов и их возможных превращений по мере их прохождения по дрейфовой камере осуществлялась ежесекундная регистрация изменений в сигналах с момента ввода пробы до их исчезновения. Далее были проведены построение и обработка спектров, с вычитанием фонового сигнала. Спектры были получены как при измерении газо-воздушных смесей, так и с пробоотборной салфетки.

Характеристические сигналы пиперазина и морфолина

Перед исследованиями зависимости спектров ионной подвижности от концентрации реагентов были получены характеристические сигналы морфолина и пиперазина двумя способами детектирования веществ в области положительной ионизации (рис. 1-4). Установлено, что для морфолина значение коэффициента ионной подвижности (КПИП) основного сигнала составляет $1,896 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а для пиперазина – $1,907 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, и данные значения не зависят от способа отбора пробы.

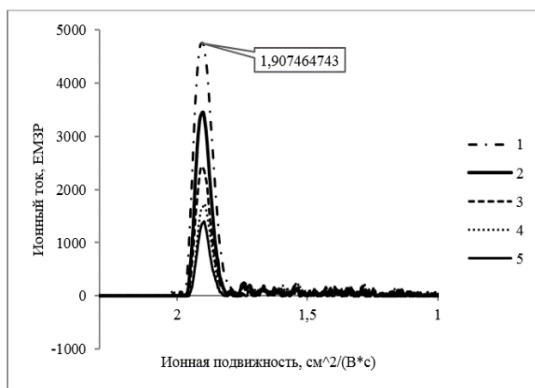


Рис. 1. Посекундное изменение спектра ионной подвижности пиперазина, нанесенного на пробоотборную салфетку.

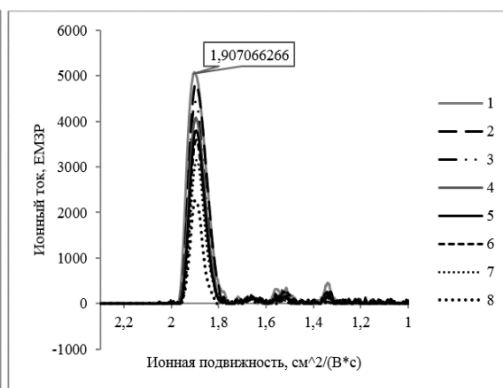


Рис. 2. Посекундное изменение спектра ионной подвижности газо-воздушной смеси пиперазина.

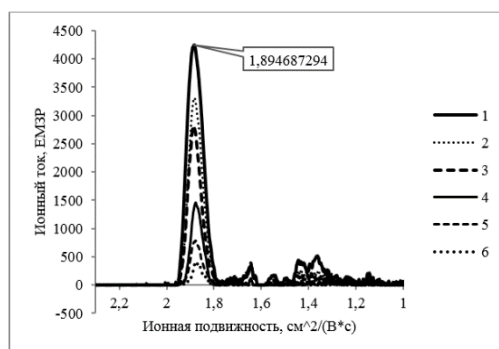


Рис. 3. Посекундное изменение спектра ионной подвижности морфолина, нанесенного на пробоотборную салфетку.

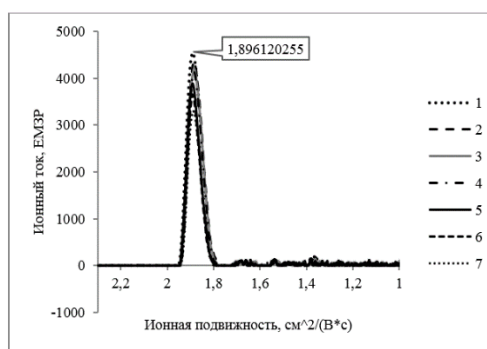


Рис. 4. Посекундное изменение спектра ионной подвижности газо-воздушной смеси морфолина.

Результаты детектирования газо-воздушных смесей морфолина при различных концентрациях.

Далее приведены спектры при разных концентрациях морфолина в газо-воздушных смесях (рис. 5). В области положительной ионизации обнаружены три сигнала с $KПИП_1=1,897 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $KПИП_2=1,565 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $KПИП_3=1,353 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Один из них мы относим к иону мономера, остальные сигналы могут быть представителями димерной и тримерной формы, поскольку наблюдаются только при высоких концентрациях. В области отрицательной ионизации сигналы морфолина отсутствуют, что объясняется тем, что морфолин ионизируется с образованием положительно заряженных ионов.

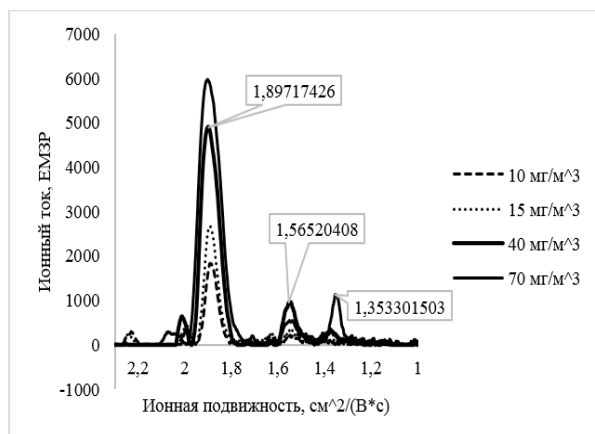


Рис. 5. Спектры газо-воздушных смесей морфолина

С целью исследования характера соотношений интенсивностей сигналов предполагаемых мономерной и димерной протонированных частиц были получены спектры ионной подвижности морфолина, нанесённого на пробоотборную салфетку в последовательно увеличивающемся количестве. Как видно на рисунке 6, в диапазоне концентраций 1,15 нмоль – 57,50 нмоль преимущественно возникает сигнал протонированного мономера (КПИП=1,897 см²/В·с), интенсивность которого возрастает с увеличением количества морфолина. На повышенных концентрациях 0,34 мкмоль и 0,40 мкмоль вначале образуется димерная форма (КПИП=1,564 см²/В·с), которая позже частично переходит в мономерную (рис. 7).

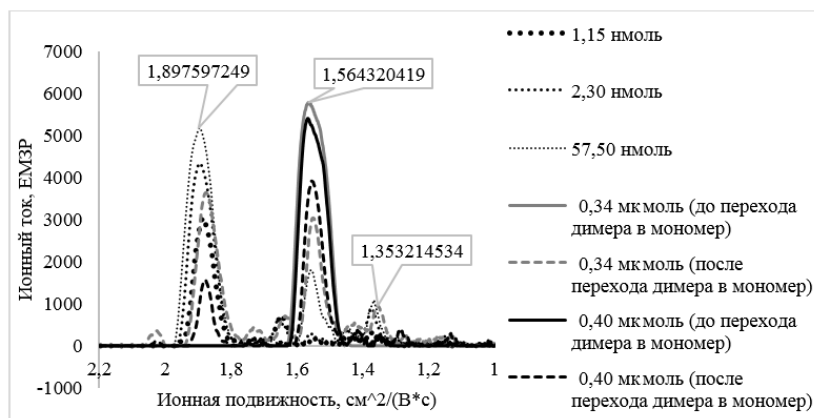


Рис. 6. Спектры морфолина, нанесённого на пробоотборную салфетку при различных концентрациях образцов.

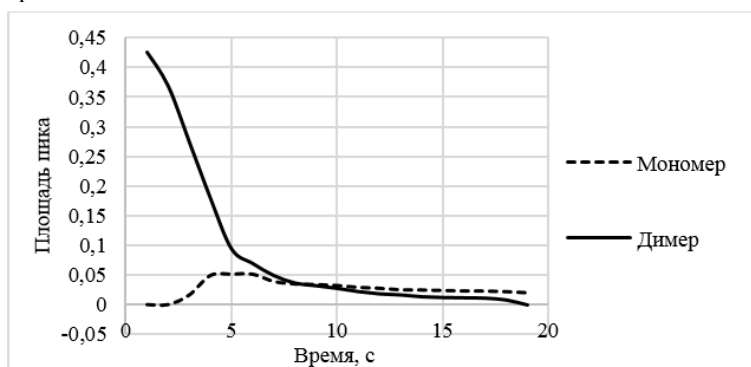


Рис. 7. Изменение площадей пиков протонированных мономера и димера морфолина с течением времени для концентрации 0,34 мкмоль.

Следующие спектры получены при разных концентрациях пиперазина в газо-воздушных смесях (рис. 8). В области положительной ионизации обнаружены три сигнала с КПИП₁=1,907 см²/(В·с), КПИП₂=1,558 см²/(В·с) и КПИП₃=1,335 см²/(В·с). Один из них мы относим к иону мономера, остальные сигналы могут быть представителями димерной и тримерной формы, поскольку наблюдаются только при высоких концентрациях. В области отрицательной ионизации сигналы пиперазина отсутствуют, что объясняется тем, что пиперазин ионизируется с образованием положительно заряженных ионов.

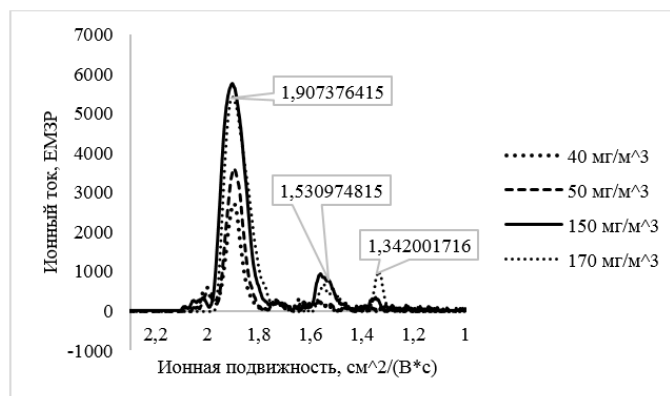


Рис. 8. Спектры газо-воздушных смесей пиперазина.

С целью исследования характера соотношений интенсивностей сигналов предполагаемых мономерной и димерной протонированных частиц были получены спектры ионной подвижности пиперазина, нанесённого на пробоотборную салфетку в последовательно увеличивающемся количестве

(рис. 9). Определено, что сигналы с КПП=1,538 см²/(В·с), КПП=1,424 см²/(В·с) и КПП=1,342 см²/(В·с) возникают при больших концентрациях вещества в пробе.

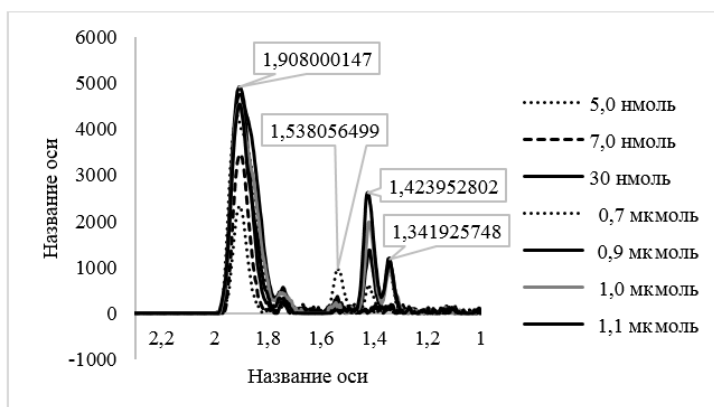


Рис. 9. Спектры пиперазина, нанесённого на пробоотборную салфетку при различных концентрациях образцов.

Детектирование рассматриваемых азотсодержащих гетероциклов осуществляется в области положительной ионизации, в соответствии с двумя возможными реакциями между реагент-ионами воздуха и молекулами образца: с одновременными протонированием по атому азота и ассоциацией протонированного иона с молекулой воды (с образованием кластерного иона), и с распадом кластерного иона на продукт-ион и молекулу воды по предложенному методу [2]. Данные ион-молекулярные реакции на примере пиперазина представлены ниже:

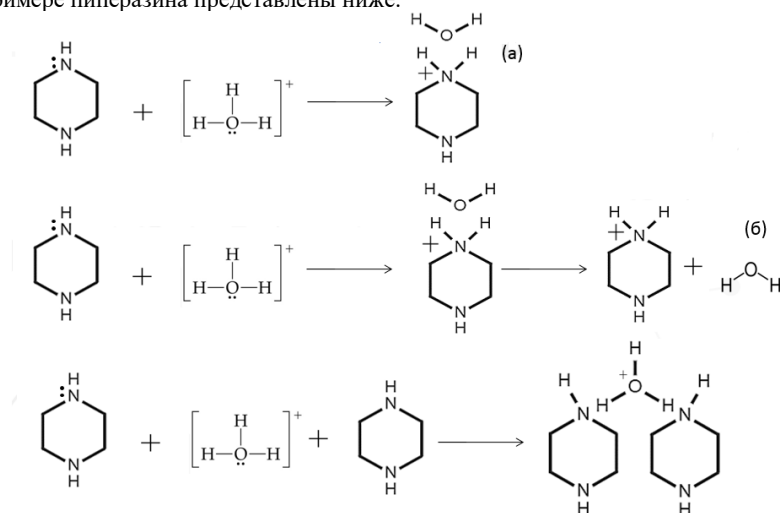


Таблица 1. Результаты расчётов в квантово-химическом пакете Orca

Вещество	Mr, Да	протонированный атом	РА, кДж/моль	Реакция а)		Реакция б)	
				ΔrH, кДж/моль	ΔrG, кДж/моль	ΔrH, кДж/моль	ΔrG, кДж/моль
Пиперазин	86,14	=N-H	969,792	-261,505	-212,826	-291,746	-285,482
Морфолин	87,12	=N-H	884,112	-231,89	-183,978	-206,067	-204,789
		-O-	785,038	-210,494	-162,536	-106,992	-110,209

С помощью квантово-химического программного пакета ORCA версии 5.0.4 гибридным методом B3LYP с набором базисных функций def2-SVPD были вычислены термодинамические характеристики данных реакций: энтальпия (ΔHr, кДж/моль), энергия Гиббса (ΔGr, кДж/моль), сродство к протону (РА, кДж/моль) [3].

В ходе сравнения значений энтальпий ион-молекулярных реакций определено, что для пиперазина и морфолина возможно протекание всех представленных реакций, однако морфолин с большей степенью вероятности протонируется по атому азота с ассоциацией молекулы воды, в то время как пиперазин – с распадом кластерного иона.

Данный механизм реакций можно подтвердить экспериментально, проведя дополнительную ионизацию пиперазина и морфолина с помощью озонатора (источника импульсного барьерного разряда, ИБР) и внешнего источника импульсного коронного разряда (ИКР) (рис. 10-13).

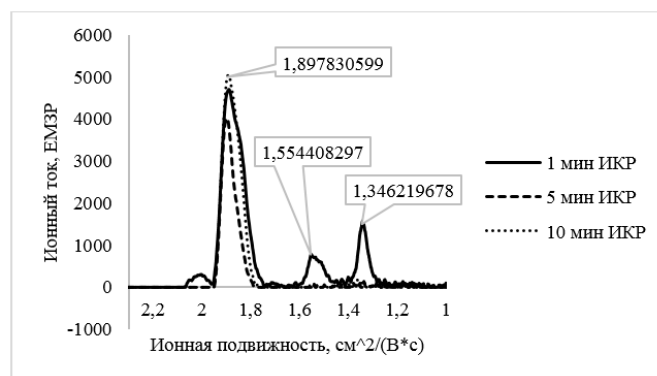


Рис. 10. Спектры морфолина спустя определённые периоды ионизации источником импульсного коронного разряда.

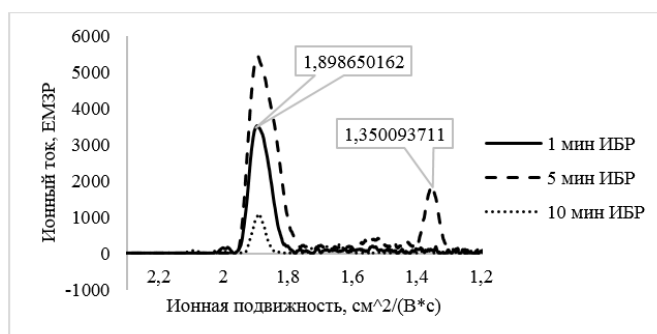


Рис. 11. Спектры морфолина спустя определённые периоды ионизации внешним источником импульсного барьерного разряда.

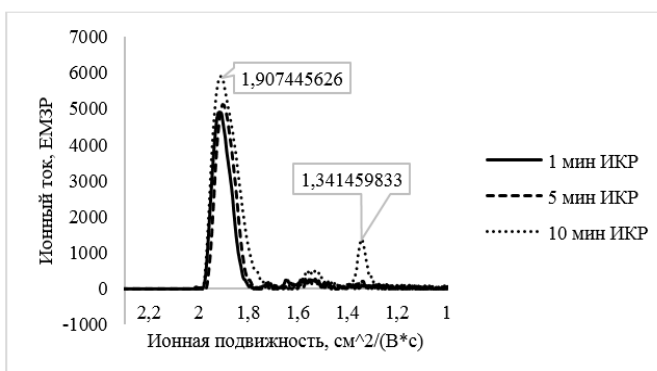


Рис. 12. Спектры пиперазина спустя определённые периоды ионизации источником импульсного коронного разряда.

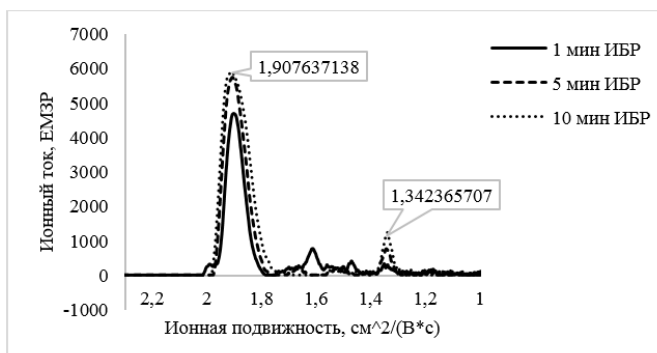


Рис. 13. Спектры пиперазина спустя определённые периоды ионизации внешним источником импульсного барьерного разряда.

Как показано на спектрах ионной подвижности, дополнительная ионизация не влияет на сигналы исследуемых веществ и, следовательно, не способствует протеканию новых ион-молекулярных реакций. Поэтому можно сделать вывод, что пиперазин и морфолин действительно ионизируются исключительно по механизму химической ионизации при атмосферном давлении, без непосредственного воздействия импульсного коронного разряда. Также установлено, что, несмотря на

схожие молекулярные массы (87 г/моль и 86 г/моль соответственно), спектры ионной подвижности этих веществ различны, что демонстрирует высокую селективность спектрометрии ионной подвижности.

Научный руководитель – к.х.н., доцент Е.П. Баберкина

Библиографический список

1. В. И. Ушаков. Технические средства обеспечения транспортной безопасности. Детекторы паров и следов взрывчатых и наркотических веществ. – М.: Издательские решения, 2017. – 89 с.
2. G. A. Eiceman, Z. Karpas. H. N. Hill. Ion Mobility Spectrometry // Applied Spectroscopy Reviews. – 2006. – Vol. 406(11). – P. 2493-2494.
3. С. А. Безносюк, О. А. Маслова, А. В. Рябых. Квантовая химия молекул: расчеты в программном комплексе ORCA: учеб. пособие/ Алтайский государственный университет. – Барнаул: – М.: Алтайского ун-та. – 2022. — 92 с.

УДК 004.82

SPARC: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ПРЕДСКАЗАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

А.А. Белов, М.А. Будяков

СПБ ГБ ПОУ «Колледж электроники и приборостроения»

Актуальность. Современная технологическая инфраструктура — спутниковая связь, навигационные системы, энергосети — уязвима перед космической погодой. Вспышки на Солнце, корональные выбросы массы (СМЕ) и геомагнитные бури могут вызывать сбои в работе спутников, нарушать радиосвязь и даже приводить к масштабным отключениям электричества. Несмотря на существующие методы прогнозирования, многие из них остаются недостаточно точными и оперативными [3].

Проект **SPARC (Solar Predictive Analytics & Risk Control)** предлагает интеллектуальную платформу, которая объединяет данные спутниковых и наземных наблюдений, использует машинное обучение и автоматизированный анализ для предсказания космической погоды и ее воздействия на критически важную инфраструктуру.

Цель работы: SPARC создан для повышения точности и оперативности прогнозирования космической погоды.

Платформа решает следующие задачи:

- Объединяет данные со спутников NASA (SDO, SOHO, DSCOVR, ACE) и наземных обсерваторий.
- Использует машинное обучение для предсказания солнечных вспышек и магнитных бурь.
- Оценивает влияние космической погоды на спутники, энергосети и связь.
- Обеспечивает визуализацию прогнозов и отправку автоматических предупреждений.

Архитектура системы. SPARC построена по модульному принципу, что позволяет гибко адаптировать систему к новым источникам данных, методам анализа и прогнозирования. Такой подход упрощает масштабирование и интеграцию дополнительных алгоритмов, обеспечивая высокую точность предсказаний и оперативное обновление информации [2]. На рисунке 1 представлена архитектура системы SPARC.

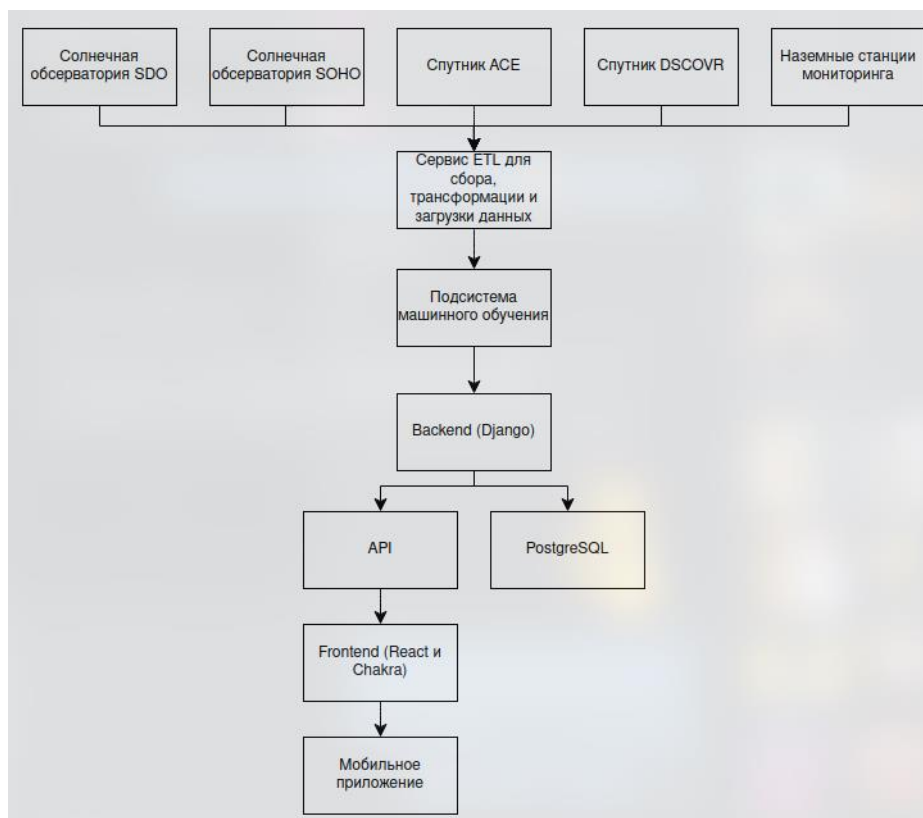


Рис. 1. Архитектура системы SPARC

Модуль сбора данных отвечает за получение информации с орбитальных спутников, таких как SDO, SOHO, DSCOVR и ACE, а также с наземных обсерваторий. Он интегрируется с внешними API для доступа к актуальным данным о солнечной активности и параметрах космической среды. Автоматизированные процессы обеспечивают регулярное обновление данных для поддержания точности прогнозов.

На этапе предобработки данных выполняется очистка информации от шумов и выбросов, приведение разнородных данных к единому формату и нормализация временных рядов. Анализируются ключевые признаки, такие как интенсивность солнечных пятен, структура магнитного поля и скорость корональных выбросов массы (CME).

Прогнозирование осуществляется с помощью алгоритмов машинного обучения, включая градиентный бустинг и нейросетевые модели. Эти методы позволяют классифицировать солнечные вспышки и предсказывать параметры CME и геомагнитных бурь. Такие модели повышают точность расчетов, обучаясь на исторических данных и учитывая влияние прошлых событий.

Модуль оценки рисков анализирует потенциальное влияние космической погоды на критически важные системы. Для спутников рассчитывается вероятность выхода из строя, возможные отклонения в ориентации и риски повреждения солнечных панелей. В энергетическом секторе оцениваются индуцированные токи, вероятность повреждения трансформаторов и возможные отключения электроснабжения. В сфере связи и навигации анализируются ухудшение качества сигналов и вероятность кратковременных потерь связи. На основе этих данных формируются рекомендации для операторов инфраструктуры.

Модуль визуализации и API предоставляет удобный доступ к прогнозам через веб-интерфейс, отображая данные в виде интерактивных графиков, карт и дашбордов. Система автоматически генерирует уведомления и предупреждения о потенциальных угрозах, обеспечивая пользователей актуальной информацией в режиме реального времени.

Архитектура SPARC построена с учетом взаимодействия всех модулей, обеспечивая эффективный анализ и прогнозирование космической погоды. Визуальная схема системы отражает потоки данных, ключевые компоненты и их связи, демонстрируя принципы работы платформы [1].

Модели машинного обучения в системе SPARC. В системе SPARC используются три основные модели машинного обучения для прогнозирования различных аспектов космической погоды: солнечных вспышек, корональных выбросов массы (CME) и геомагнитных бурь.

1. Модель прогнозирования солнечных вспышек представлена на рисунке 2.

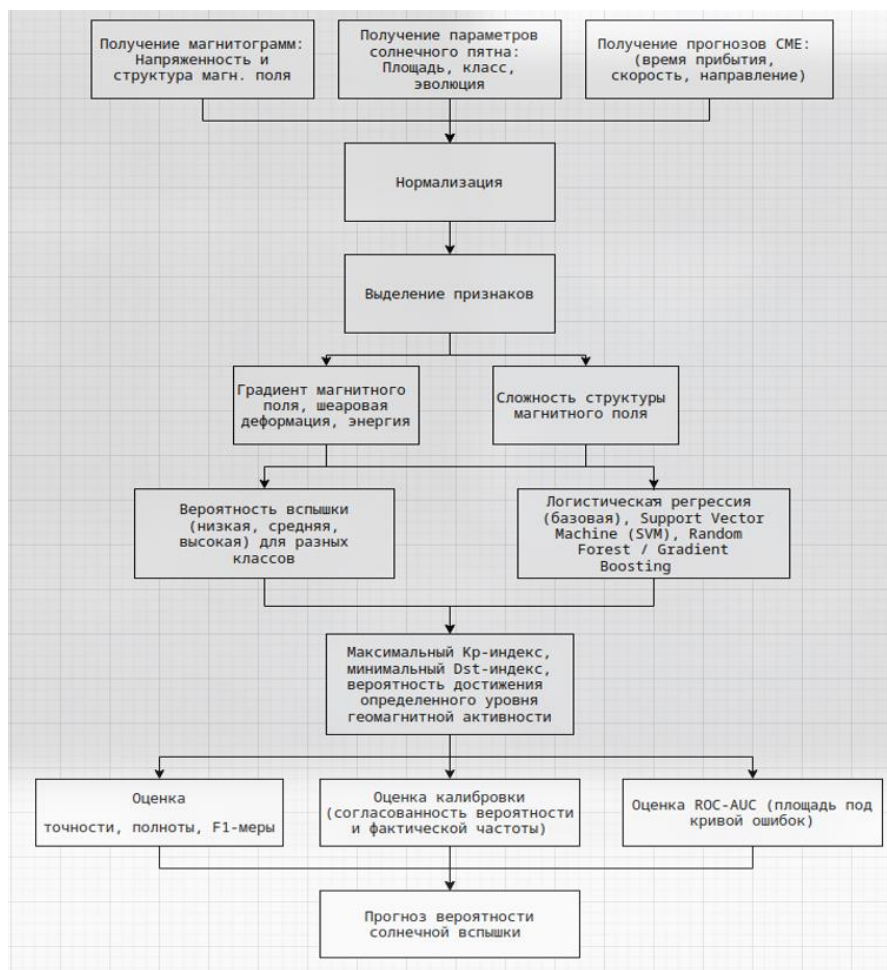


Рис. 2. Модель прогнозирования солнечных вспышек

Прогнозирование вспышек основано на анализе магнитных полей активных областей Солнца и их эволюции. Входными данными служат магнитограммы (SDO/HMI), изображения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах (SDO/AIA, GOES/XRS), а также параметры солнечных пятен.

На этапе предобработки данные нормализуются, выделяются признаки, такие как градиент магнитного поля, сложность структуры и деформация магнитного поля.

Модель машинного обучения выполняет классификацию вероятности вспышки (низкая, средняя, высокая) для классов C, M, X. Используются методы: логистическая регрессия, SVM, Random Forest, градиентный бустинг (см. рис. 3).

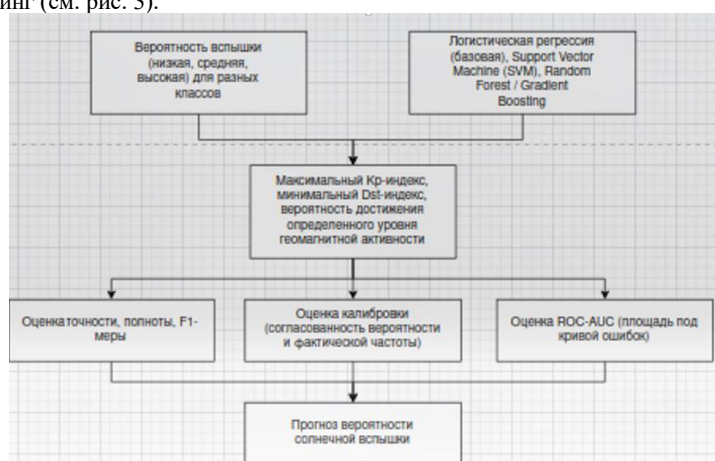


Рис. 3. Моделирование вероятности солнечной вспышки

Модель машинного обучения выполняет классификацию вероятности вспышки. Оценка точности модели производится с использованием метрик Precision, Recall, F1-score и ROC-AUC. В результате формируется прогноз вероятности вспышки в течение 24-48 часов.

2. Модель определения траектории и скорости CME представлена на рисунке 4.

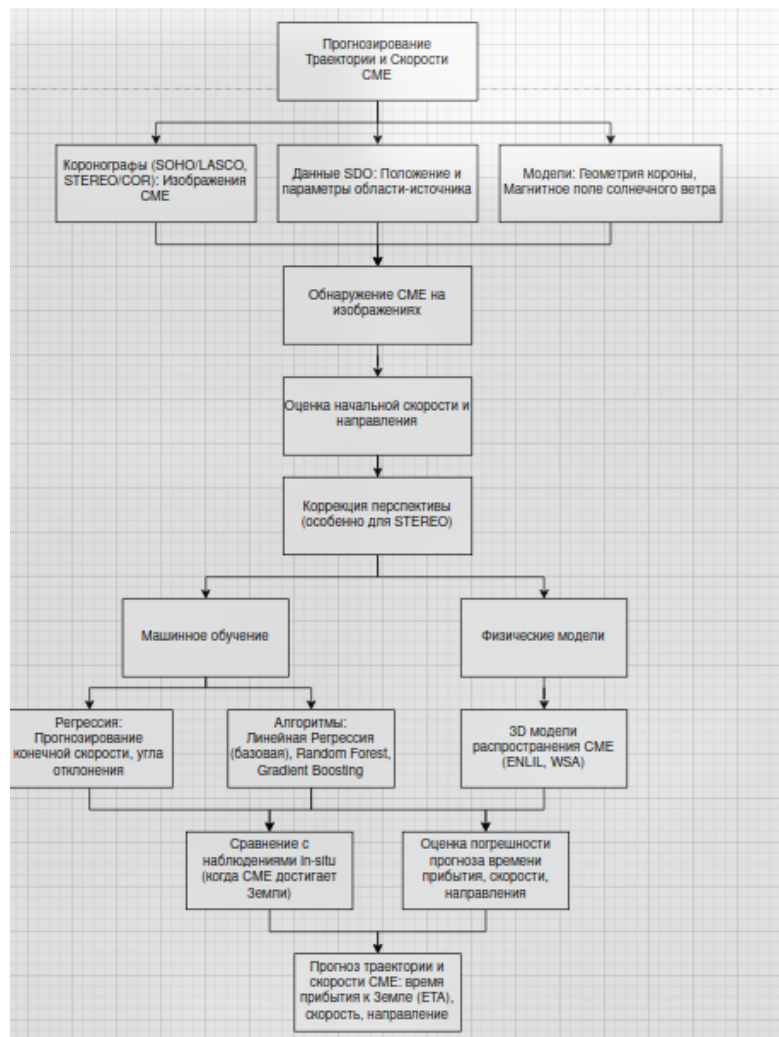


Рис. 4. Модель определения траектории и скорости CME

Для прогнозирования выбросов корональной массы анализируются изображения коронографов (SOHO/LASCO, STEREO/COR), параметры области-источника по данным SDO и модели магнитного поля солнечного ветра.

Предобработка включает обнаружение CME на изображениях, определение начальной скорости и направления, а также коррекцию перспективы.

Прогноз выполняется с использованием алгоритмов линейной регрессии, Random Forest, градиентного бустинга, а также рекуррентных нейронных сетей (LSTM) для обработки последовательностей изображений. В дополнение применяются физические модели распространения CME (ENLIL, WSA).

Для оценки точности сравниваются прогнозируемые данные с фактическими измерениями солнечного ветра (in-situ). В результате формируется прогноз времени прибытия CME к Земле, его скорости и направления.

3. Модель прогнозирования геомагнитных бурь представлена на рисунке 5.

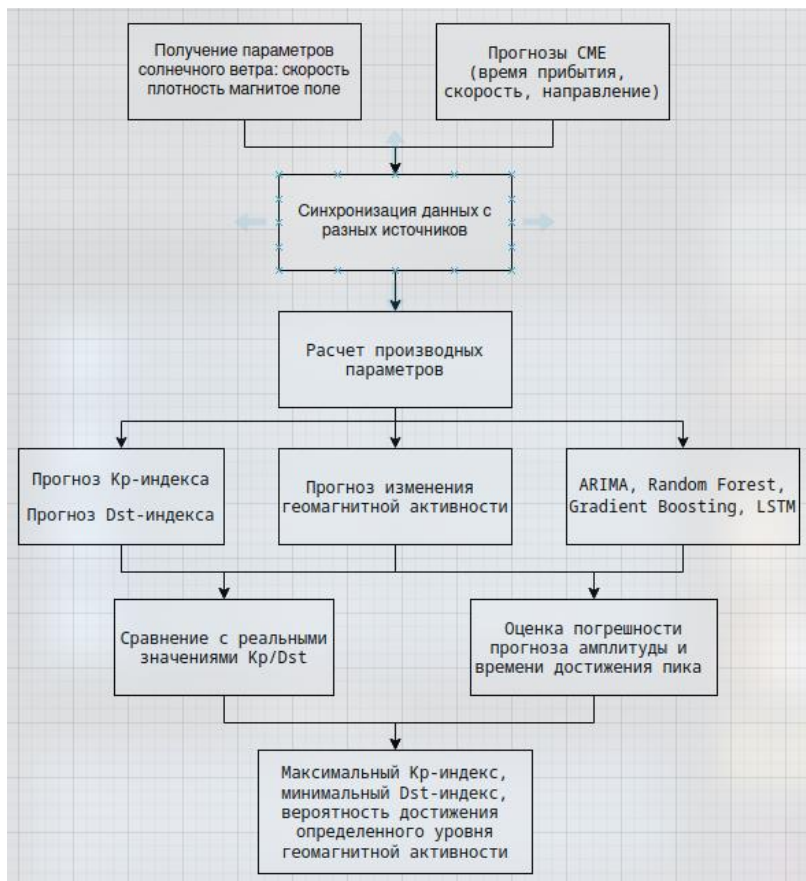


Рис. 5. Модель прогнозирования геомагнитных бурь

Прогнозирование геомагнитных бурь основывается на анализе параметров солнечного ветра (скорость, плотность, межпланетное магнитное поле B_z), а также предсказанных характеристик CME.

Предобработка включает заполнение пропусков в данных, синхронизацию с разных источников и расчет производных параметров, таких как индекс Dst.

Модель машинного обучения выполняет прогнозирование изменений Kp-индекса и Dst-индекса. Применяются методы временных рядов (ARIMA), Random Forest, градиентный бустинг и рекуррентные нейросети (LSTM).

Оценка модели производится путем сравнения с фактическими значениями геомагнитных индексов. В результате формируется прогноз амплитуды и времени пика геомагнитной бури, а также вероятность достижения определенного уровня магнитной активности.

Технологический стек SPARC включает в себя несколько ключевых компонентов, каждый из которых играет важную роль в обеспечении функциональности системы:

1. Для хранения и управления данными, для работы с временными рядами данных о космической погоде используется PostgreSQL, что позволяет эффективно обрабатывать большие объемы данных.

2. В части анализа и обработки данных используются библиотеки Pandas и NumPy, которые позволяют эффективно обрабатывать и анализировать данные, а OpenCV используется для анализа изображений Солнца.

3. Для машинного обучения используются различные инструменты. Для анализа временных рядов и прогнозирования геомагнитных бурь применяется Scikit-learn и XGBoost. Для предсказания солнечных вспышек задействованы нейросетевые модели на базе TensorFlow и PyTorch, а специализированная библиотека SunPy помогает в обработке данных о солнечной активности.

4. Для создания веб-интерфейса и API используется Django, который предоставляет эффективный и масштабируемый инструмент для разработки REST API. Для визуализации данных в реальном времени применяется React, а JavaScript используется для создания дашбордов с прогнозами и другими важными метриками, что позволяет операторам быстро реагировать на изменения космической погоды.

Таким образом, стек технологий, выбранный для SPARC, позволяет эффективно интегрировать данные, обрабатывать их, применять алгоритмы машинного обучения и предоставлять результаты пользователям через удобный и наглядный интерфейс.

Практическая ценность платформы SPARC заключается в сочетании передовых методов машинного обучения и потоковой обработки данных, что обеспечивает оперативность и высокую точность прогнозов. Автоматизированный анализ поступающих данных позволяет обновлять прогнозы в режиме реального времени, обеспечивая ученых, инженеров и операторов спутников актуальной информацией. Система доступна на различных платформах через веб-интерфейс, API и мобильные уведомления, а её модульная архитектура позволяет адаптировать алгоритмы под специфические отраслевые задачи, такие как авиация, энергетика и связь.

Визуализация прогнозов представлена в виде динамических графиков и тепловых карт, что облегчает анализ трендов и выявление потенциальных угроз. Модель прогнозирования охватывает как краткосрочные периоды (часы и дни), так и долгосрочные тенденции солнечной активности, что особенно важно для планирования космических миссий. Кроме того, система использует методы самообучения, что позволяет ей адаптироваться к новым данным и повышать точность прогнозов со временем.

Выводы. Таким образом, SPARC представляет собой платформу нового поколения для предсказания космической погоды. Использование методов машинного обучения позволяет значительно повысить точность прогнозов солнечных вспышек и магнитных бурь, а анализ их последствий помогает защитить спутниковые системы, энергосети и глобальную связь. Интерактивная визуализация и автоматизированные уведомления делают систему удобной для операторов критически важной инфраструктуры. Внедрение SPARC способствует развитию технологий прогнозирования космической погоды, делая их более точными, доступными и полезными для различных сфер деятельности.

Научный руководитель – преподаватель А.В. Складорова

Библиографический список

1. Андронников В.В. Методика использования информации с метеорологических космических аппаратов для синоптического прогнозирования / СВ.В. Андронников, П.Д. Савченко, Н.А. Кириллов, В.В. Коротеев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. №12. 472-474.
2. Мандрикова О.В. Интеллектуальные методы анализа природных данных: приложение к космической погоде / О.В. Мандрикова // Компьютерная оптика. 2024. №48(1). 139-148.
3. Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы / В.А. Пилипенко // Солнечно-земная физика. 2021. №. 3. С. 72-110.

УДК 004.82

ЕСОACTIVITY: СОЗДАНИЕ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА, УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

М.А. Будяков, А.А. Белов

СПБ ГБ ПОУ «Колледж электроники и приборостроения»

Актуальность темы. Современные вызовы человечества – изменение климата, истощение природных ресурсов и глобальное загрязнение – ставят перед нами задачу быстрого перехода к устойчивому управлению планетарными экосистемами. Для достижения этого необходимы передовые технологии, обеспечивающие мониторинг и анализ экологической обстановки в режиме реального времени.

Платформа «EcoActivity» - это универсальное решение для трансформации подходов к охране окружающей среды на глобальном уровне. Она предоставляет уникальные инструменты сбора, управления и прогнозирования экологических данных, что позволяет принимать стратегические решения, предотвращать экологические катастрофы и ускорять переход к устойчивому развитию. Современные системы экологического мониторинга зачастую фрагментированы, ограничены в функционале и не обеспечивают комплексного анализа данных. Отсутствие интеграции между источниками данных и недостаточная точность прогнозов затрудняют принятие своевременных решений для предотвращения неблагоприятных экологических ситуаций [2].

Цель работы: создание универсальной платформы «EcoActivity», способной объединять экологические данные из множества источников, прогнозировать экологические риски, формируя экологическую ответственность на индивидуальном и глобальном уровнях.

Задачи:

1. Разработка платформы, объединяющей данные из различных экологических источников.
2. Реализация алгоритмов машинного обучения для анализа и прогнозирования экологических рисков.
3. Создание интуитивно понятного интерфейса для визуализации сложных экологических данных.
4. Формирование рекомендаций по улучшению качества пребывания в меняющихся состояниях окружающей среды на основе собранных и проанализированных данных. Заключение

Платформа «EcoActivity» представляет собой мощное средство для мониторинга, управления и прогнозирования экологической ситуации. Используя технологии машинного обучения и большой объем данных, она позволяет своевременно реагировать на экологические угрозы, обеспечивая пользователей ценными инструментами для предотвращения катастроф и улучшения устойчивости природных систем. В будущем проект может быть расширен за счет новых функций, таких как мониторинг биоразнообразия и управление природными ресурсами. Описание архитектуры приложения [1].

Для эффективного решения задач мониторинга, анализа и прогнозирования экологических данных была разработана модульная архитектура приложения (рис. 1).

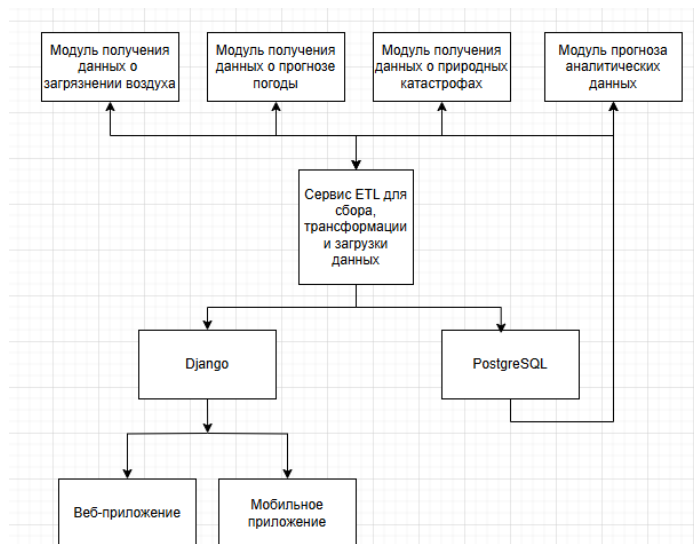


Рис. 1. Архитектура приложения

Архитектура включает следующие ключевые компоненты:

1. Модуль получения данных: отвечает за сбор данных из различных источников, включая сенсоры, метеостанции и API. Это позволяет агрегировать данные о качестве воздуха, температуре, уровне загрязнений и других экологических показателях.

2. Сервис ETL: реализует этапы извлечения, трансформации и загрузки данных в базу данных. На этапе трансформации данные очищаются, нормализуются и подготавливаются для аналитической обработки.

3. Модуль прогнозной аналитики: использует алгоритмы машинного обучения для прогнозирования экологических рисков, таких как загрязнение воздуха или изменения уровня влажности.

4. База данных: в качестве основного хранилища данных используется PostgreSQL. Эта реляционная база данных обеспечивает высокую производительность, надёжность и возможность обработки сложных запросов.

5. Веб-приложение: предоставляет доступ к данным и прогнозам через удобный интерфейс. Реализовано на основе Django и обеспечивает взаимодействие с пользователями, обработку запросов и представление данных в визуальной форме.

6. Мобильное web-view приложение: адаптированная версия веб-приложения, доступная для мобильных устройств, обеспечивает доступность данных для широкого круга пользователей.

Выбор технологического стека. Для реализации архитектуры был выбран технологический стек, который сочетает гибкость, производительность и удобство разработки:

1. Python был выбран для разработки серверной части благодаря его универсальности и большому количеству библиотек для работы с данными и машинного обучения.

2. Django как высокоуровневый веб-фреймворк использован для упрощения работы с серверной частью, обеспечения безопасности и ускорения разработки.

3. PostgreSQL выбрана для хранения данных благодаря её масштабируемости, поддержке транзакций и сложных аналитических запросов.

4. JavaScript и библиотека jQuery используются для создания динамического интерфейса, обеспечивая удобство работы с данными.

Прогнозная аналитика. Модуль прогнозной аналитики является центральным элементом системы, обеспечивающим пользователям доступ к предсказаниям экологических рисков. Основные этапы его работы:

1. Сбор и подготовка данных:

- Данные поступают из внешних источников через API или непосредственно с сенсоров.
- На этапе ETL проводится нормализация данных, устранение пробелов и удаление аномалий.

2. Алгоритмы прогнозирования:

• Для анализа временных рядов используются алгоритмы ARIMA и LSTM, что позволяет предсказывать значения экологических параметров с высокой точностью.

• Алгоритмы классификации, такие как Random Forest, используются для оценки вероятности возникновения экологических рисков.

3. Визуализация результатов

Результаты представлены в виде интерактивных графиков и тепловых карт. Прогнозы сопровождаются пояснением возможных последствий и рекомендациями для предотвращения негативных эффектов.

Например, пользователи могут увидеть прогноз изменения уровня загрязнения воздуха на неделю вперёд и получить рекомендации по минимизации воздействия.

Реализация интерфейса системы. Интерфейс был спроектирован таким образом, чтобы быть удобным и понятным для различных категорий пользователей: от учёных до представителей общественных организаций. Для его реализации использовались:

1. HTML для структуры страниц.
2. CSS для стилизации, включая адаптацию интерфейса для мобильных устройств.
3. JavaScript и библиотека jQuery для создания интерактивных элементов, таких как динамическая фильтрация данных и обновляемые графики.

Основные страницы интерфейса:

1. Главная страница системы представлена на рисунке 2.

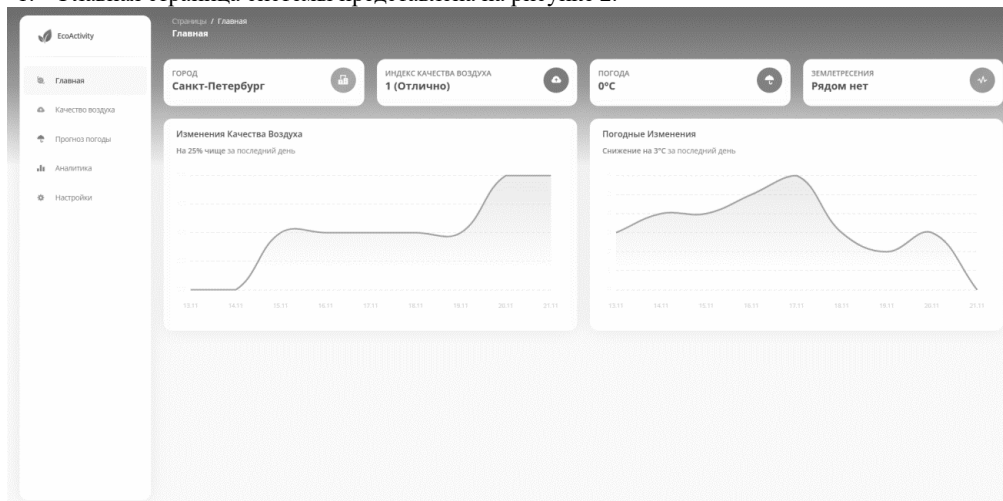


Рис. 2. Главная страница платформы

Страница включает в себя сводную информация о текущем состоянии окружающей среды, включая ключевые показатели: температуру, уровень загрязнений, прогнозы, динамическую цветовую индикация риска.

2. Страница «Качество воздуха» (рис. 3):
 - Карта, отображающая уровень загрязнения в различных регионах.
 - Графики с историческими и прогнозируемыми данными, что позволяет отслеживать динамику изменений.
 - Рекомендации, такие как ограничение нахождения на улице при высоком уровне загрязнений.

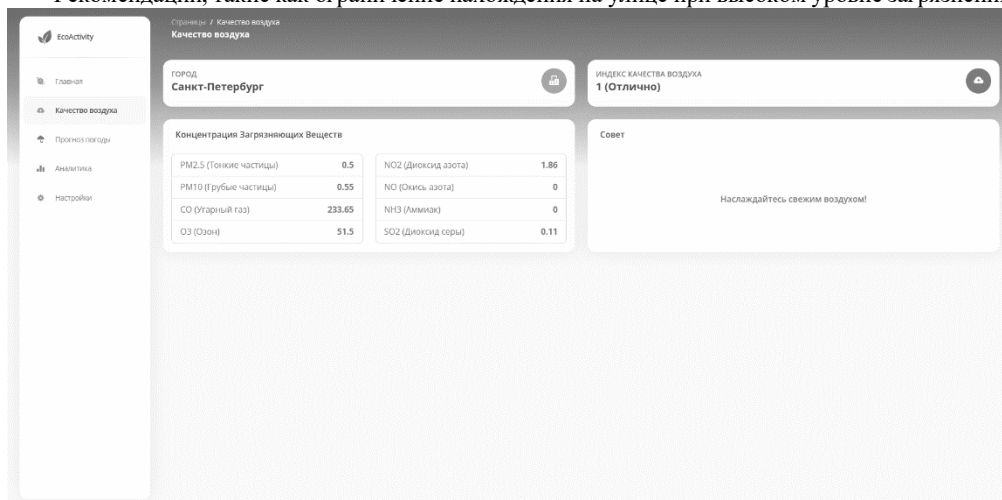


Рис. 3. Страница «Качество воздуха»

3. Страница «Настройки»:
 - Персонализация: выбор регионов, интересующих показателей, настройка уведомлений.
 - Возможность выбора временного периода для анализа данных.

Также разработана мобильная версия платформы (рис. 4):

- Адаптирована для быстрого доступа к основным функциям, включая графики и карты.
- Реализована поддержка push-уведомлений об изменении состояния окружающей среды.

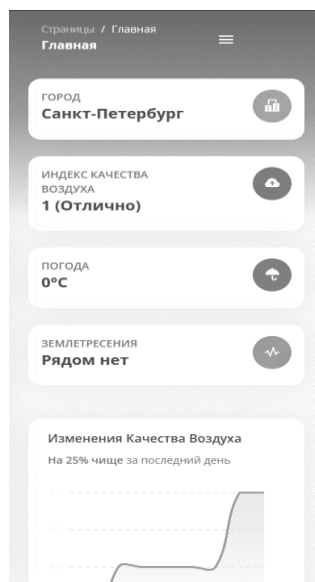


Рис. 4. Мобильная версия «EcoActivity»

Реализованная платформа позволяет собирать и анализировать экологические данные в режиме реального времени, предоставляя точные прогнозы и понятные рекомендации. Это делает её важным инструментом для предотвращения экологических происшествий, повышения осведомлённости населения и обеспечения устойчивого развития [3].

Выводы. Платформа «EcoActivity» представляет собой решение, направленное на мониторинг, управление и прогнозирование экологических данных. Реализованная архитектура на основе модульного подхода обеспечивает гибкость, масштабируемость и высокую производительность. Использование современных технологий, таких как Python, Django, PostgreSQL, и интеграция алгоритмов машинного обучения позволили создать инструмент для обработки больших массивов данных и формирования точных прогнозов экологических рисков.

Удобный и интуитивно понятный интерфейс, доступный как в веб-версии, так и в мобильной версии, делает платформу универсальной для пользователей различного уровня подготовки. Разработанные функциональные модули, включая визуализацию данных и персонализацию, обеспечивают эффективное взаимодействие с системой.

Платформа «EcoActivity» обладает высокой практической значимостью: она позволяет принимать стратегические решения на основе объективных данных, предотвращать экологические катастрофы и способствовать устойчивому развитию. В дальнейшем проект может быть расширен за счёт добавления новых функций, таких как управление ресурсами и мониторинг биоразнообразия, что усилит его ценность как инструмента экологической ответственности.

Научный руководитель – преподаватель А.В. Складорова

Библиографический список

1. Ахрамчук П.П. Использование информационных ресурсов и веб-приложений для повышения вовлечённости в тему экологии и экологичного образа жизни на примере веб-приложения «Ве Есо» / П.П. Ахрамчук // Научная конференция учащихся колледжа: материалы 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 17–21 апреля 2023. – С. 12–15.
2. Бочарова А.М. Применение программного обеспечения и информационных технологий для исследования вопросов экологии / А.М. Бочарова // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. - №8. – С.104-106.
3. Райлян В.А. Влияние современных мобильных приложений на улучшение экологической ситуации и борьбу с отходами в России / В.А. Райлян, И.К. Орлова, С.А. Чурилова // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2020. - №107(66). – С.138-142.

УДК 628.517.2

СНИЖЕНИЕ УРОВНЕЙ ШУМА НА ПРЕДПРИЯТИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ КАРТОНА В ЦЕЛЯХ УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ ТРУДА

И.П. Панина

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Работа на предприятиях или в цехах часто сопровождается высоким уровнем шума, который может негативно влиять на производительность, здоровье и общее самочувствие сотрудников. Снижение шума на рабочем месте стало важной задачей для многих организаций, стремящихся создать более

комфортные и эффективные условия труда. Избыточный шум не только отвлекает, но и может вызывать стресс, усталость и даже заболевания. В связи с этим, исследование методов и технологий, направленных на уменьшение звуковых воздействий, становится актуальным как для руководителей, так и для работников.

Объектом исследования является промышленное предприятие Ленинградской области по производству упаковки из гофрокартона.

Согласно техническому заданию необходимо:

- провести натурные измерения на рабочих местах (РМ);
- замеры от основных источников шума;
- иные замеры уровней шума (фоновые и т.д.);
- сделать анализ шумовой нагрузки на рассматриваемых РМ;
- при необходимости разработать мероприятия по снижению негативного воздействия и достижения нормативных значений.

Нормативная оценка произведена в соответствии со следующими документами:

- СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная версия с изм. №1-№4;
- СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Для оценки акустической ситуации, уровней шума на рабочих местах и выявления основных источников шума необходимого снижения были выполнены следующие замеры (в настоящей статье рассматривается только одно рабочее место, как показательное). [1] В дипломной работе будет произведена оценка по всем рабочим местам, указанным в техническом задании:

1. Замеры шума на рабочих местах представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ Т.И	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									УЗ, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	80,1	80,5	79,5	84,4	101	96	90,8	81,2	92,8	102,4
ПДУ	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
Превышение норм	-27	-15	-8	2	23	21	18	10	24	22

Карта-схема с расположением точки измерения представлена на рисунке 1.



Рисунок 1- Карта-схема с расположением точки измерения на рабочем месте

Согласно СП 51.13330.2011. Свод правил. Защита от шума. Актуализирован с изм. №1-№4, выявлены значительные превышения на рабочем месте (до 22дБА по уровню звука). [2]

Для анализа шумовой нагрузки и выявления зон с наибольшими шумовыми показателями, а также для дальнейшего акустического моделирования в программе АРМ Акустика версия 3.3.4 модуль “Внутренний шум” были проведены замеры в различных местах от рассматриваемой производственной линии, возле рассматриваемых рабочих мест.

2. Замеры зон шумового воздействия около рассматриваемой производственной линии представлены в таблице 2.

Таблица 2

№ Т.И	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									УЗ, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	

1	80,1	80,5	79,5	84,4	101	96	90,8	91,2	92,8	102,4
2	81,1	78,5	76,8	81,1	100,2	89,9	85,4	86,8	90,7	100,1
3	81,2	79,5	79,7	84,3	101,1	89,5	84,9	86,7	91,5	100,7
4	83	79,9	81,1	84,5	100,1	91,6	89,6	91,7	92,9	100,9

Карта с расположением точек измерения представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 - Карта-схема с расположением точек измерения

Из проведенных фоновых замеров шума в производственном помещении было выяснено, что основными источниками шума на производстве являются:

- двигатели,
- насосы,
- компрессоры,
- пневматические инструменты,
- станки,
- конвейеры,
- производственные линии и др.

Наибольший вклад в образование шума вносят производственные линии, в состав которых входит:

- резательный станок,
- фальцевальный станок,
- друкованный станок,
- упаковочная машина,
- складочный станок и др.

Также, для полноценного анализа шума необходимо было произвести на исследуемых РМ вклад от другого оборудования в цеху: соседние производственные линии, вентиляционное оборудование, работа погрузчиков и т.д. Поэтому остановили производственную линию и замерили сторонний шум в цеху (фоновый уровень шума).

3. Замеры шума от других источников шума без работы производственной линии, где размещаются рабочие места представлены в таблице 3.

Таблица 3

№ Т.И	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									УЗ, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	84	81,6	83,7	82,5	77,3	74,8	74	76,1	80	83,9
2	84,5	80,7	79,5	80,0	78,1	74,8	72,3	72,5	75,4	81,6

Из проведенных в таблице 3 замеров шума в производственном помещении, в отсутствие работающей производственной линии, видно, что значения эквивалентного уровня звука ниже, но также дают вклад в процессы шумообразования на рабочие места и существуют превышения согласно СП 51.13330.2011.

Но учитывая, тот факт, что превышения от работы производственной линии более чем на 15дБА выше, чем от других источников шума, в первую очередь разрабатываются мероприятия для значительного снижения шума от производственной линии

Ввиду того, что производственная линия имеет мало пространства для установки местных кожухов, облицовок, шумоглушителей и т.д. а также может нарушить последовательность производственного процесса, принято решение разработать проект индивидуального кожуха на основную (самую шумную) часть производственной линии, при этом оставляя все возможности работы и контроля сотрудниками на ней.

Имеется положительный опыт проектирования и установки такого кожуха на производственную линию сопоставимых габаритов.

На рисунке 3 ниже показан внешний вид установленного кожуха



Рисунок 3. Примерный вид кожуха, который предлагается к установке

Благодаря данному мероприятию удалось снизить уровни шума практически до нормативных значений. Проведенные замеры уровней шума до и после его установки показали следующую эффективность см. таблицу 4 ниже.

Таблица 4

	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									УЗ, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Эффективность ШЗМ	5	1	4	2	15	13	10	3	12	13

Полученная эффективность показывает хорошее снижение шумовой нагрузки, что позволяет рассматривать данное мероприятие по шумозащите, как основное.

При этом стоит отметить, что данная эффективность была получена опытным путем без проведения предварительных расчетов и моделирования шумовой карты цеха.

В настоящее время производится именно предварительное акустическое проектирование всего цеха, в последующем будет задан шумозащитный кожух требуемых размеров с учетом необходимых вентиляционных и иных технологических отверстий. Просчитана его эффективность, составлена точная смета, оценена необходимость в дополнительных мероприятиях.

Библиографический список

1. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
2. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная версия с изм. №1-№4

УДК 331.45

ПУТИ СНИЖЕНИЯ РИСКА ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

А.И. Розалев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

В условиях глобализации промышленного производства ОПО представляют собой, сложные техногенные системы. Функционирование техногенных систем, связано с высоким уровнем риска аварий и инцидента. Техногенные аварии на ОПО несут глобальные последствия [1]:

- человеческие жертвы
- экономический ущерб
- экологический ущерб
- Данная работа посвящена, исследованию способов снижения рисков техногенных аварий на ОПО «Сеть газопотребления». Объект предназначен для обеспечения снабжения оборудования и установок предприятия природным газом. Транспортировка природного газа осуществляется по газопроводу среднего давлений, который проложен по территории предприятия. Актуальность темы обусловлена высоким риском опасности при работе с газовым оборудованием.
- Научная новизна работы заключается в разработке новой методики количественной оценки риска с учетом неопределенности входных данных для ОПО «Сеть газопотребления». Практическая значимость результатов исследования состоит в разработке плана мероприятий локализации и ликвидации аварий (ПМЛЛА), включающий оценку риска техногенных аварий различными методами, а также снижение затрат на ликвидацию последствий аварий и создания более безопасных условий труда для персонала.

1. Общие сведения по авариям на опасном производственном объекте

1.1. Возможные сценарии возникновения и развития аварий на объекте, а также источники (места) возникновения аварий

Источники (места) возникновения аварий на ОПО «Сеть газопотребления»:

- газопроводы;
- запорная арматура;
- газопотребляющее оборудование;
- Под сценарием аварии понимается последовательность отдельных логически связанных событий, обусловленных конкретным инициирующим событием, приводящих к аварии с опасными последствиями.
- На ОПО «Сеть газопотребления» возможны следующие сценарии аварий:
- загазованность помещения или территории;
- «пожар-вспышка» газовой смеси;
- взрыв ГВС на открытой площадке;
- взрыв ГВС в помещении;
- факельное горение.
- Схемы развития приведенных сценариев аварий представлены в таблице 1[3].

Таблица 1 – Схемы развития сценариев аварий

№ сценария	Описание сценария
1	2
Загазованность помещения или промплощадки	Полная разгерметизация оборудования или трубопровода (катастрофическое разрушение)/нарушение правил эксплуатации → выброс газа и его распространение в атмосфере/превышение рабочих параметров → загазованность площадки / помещения.
«Пожар-вспышка» газовой смеси (ГВС)	Разгерметизация наружного газопровода → выброс газа → образование облака ГВС → вспышка и сгорание смеси при наличии источника инициирования → поражение персонала высокотемпературными продуктами сгорания.
Взрыв газовой смеси (ГВС) на открытой площадке	Разгерметизация газопровода или газового оборудования → выброс газа → образование взрывоопасной ГВС → взрыв ГВС при наличии источника инициирования → поражение оборудования и персонала ударной волной.
Взрыв газовой смеси (ГВС) в помещении	Разгерметизация внутреннего газопровода или газового оборудования с взрывоопасным веществом → выброс газа, загазованность помещения → образование взрывоопасной газовой смеси → взрыв газовой смеси при наличии источника инициирования → поражение оборудования и персонала ударной волной.
Факельное горение	Разгерметизация наружного газопровода → инициирование источника зажигания → возгорание струи газа → поражение оборудования и персонала тепловым излучением.

1.2. Организация взаимодействия сил и средств

Целью взаимодействия при возникновении аварии является обеспечение максимальной защиты персонала предприятия и третьих лиц, территории и материальных средств от последствий аварии.

Успешное выполнение задач и мероприятий при ведении аварийно-спасательных и других неотложных работ в значительной степени определяется быстротой выполнения мероприятий по

локализации и ликвидации аварии, четко организованным взаимодействием привлекаемых для этого сил и средств[2].

Взаимодействие сил и средств, привлекаемых для проведения работ, связанных с локализацией и ликвидацией последствий аварий, осуществляется по следующим вопросам:

- сбор и обмен информацией об аварии;
- оповещение об угрозе или возникновении аварии;
- направление и использование сил и средств для локализации и ликвидации аварии;
- определение места и времени сбора сил и средств;
- распределение сил и средств по объектам (направлениям) работ;
- постановка задач, определение порядка, очередности и сроков выполнения работ;
- перераспределение сил и средств по мере выполнения задач или при изменениях обстановки;
- согласование порядка проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ;
- определение порядка доклада о выполнении задач;
- осуществление информирования руководства предприятия об обстановке, ходе работ и возникающих дополнительных потребностях в материально-технических ресурсах, силах и средствах;
- обеспечение безопасности персонала.

1.3. Организация управления, связи и оповещения при аварии на объекте

При возникновении аварий на ОПО «Сеть газопотребления» с целью оповещения и взаимодействия используются все виды связи, которыми располагает предприятие:

- телефонная связь;
- система оповещения на объекте (пожарные извещатели, аварийная сигнализация, уличные громкоговорители);
- мобильная связь;

Во время проведения операций по локализации и ликвидации последствий аварий устанавливается связь между руководством предприятия и взаимодействующими организациями.

Весь персонал предприятия в случае аварии должен строго соблюдать правила пользования средствами связи, которые заключаются в следующем[3]:

- вызовы, оповещения и переговоры должны быть как можно более краткими, но без искажения смысла;
- вызовы, оповещения и переговоры следует прерывать только тогда, когда это жизненно необходимо для ликвидации аварий на другом участке;

1.4. Первоочередные действия при получении сигнала об аварии на объекте

Первоочередные действия при получении сигнала об аварии на объекте заключаются в следующем:

- Сообщить об аварии (выбросе опасных веществ, пожаре) ответственному должностному лицу;
- Принять неотложные меры по спасению людей;
- Предупредить людей, находящихся в зоне аварии, об опасности;
- На месте аварии, а также в опасной зоне прекратить все работы;
- Произвести оцепление района аварии выставлением постов и предупредительных знаков на путях к опасной зоне;
- Принять первоочередные меры по локализации аварии (перекрыть подачу опасных веществ, остановить аварийное оборудование; до прибытия СПЧ тушение пожара производить первичными средствами пожаротушения).

2. Этапы проведения анализа риска аварий

При анализе опасностей рекомендуется оценивать риск аварий определением качественных признаков угроз аварий и количественных параметров случайной величины ущерба от аварий. В качестве основных и дополнительных показателей риска рекомендуется использовать числовые характеристики случайной величины ущерба от аварий, например, ожидаемый ущерб как математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии за определенный период времени.

Перечень оцениваемых основных и дополнительных показателей риска определяется задачами анализа опасностей и оценки риска аварий на ОПО. Показатели риска рекомендуется представлять в виде значений, рассчитанных для отдельных составляющих, участков, единиц оборудования ОПО, а также значений для всего анализируемого объекта[4].

Для оценки риска аварий рекомендуется использовать следующие показатели риска:

- индивидуальный риск $R_{инд}$ - ожидаемая частота (частота) поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых поражающих факторов аварии;
- потенциальный риск (или потенциальный территориальный риск) $R_{пот}$ - частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке на площадке ОПО и прилегающей территории;
- коллективный риск (или ожидаемые людские потери) $R_{колл}$ - ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенный период времени;

2.1 Формулы для расчетов и оценки риска аварий

2.1.1. Величину потенциального риска гибели людей $R_{пот}(x, y)$ (год⁻¹) в точке (x, y) для реципиентов с одинаковыми коэффициентами уязвимости $v_{уяз, l}^{ijkp}(x, y)$ рекомендуется определять по формуле:

$$R_{\text{пот}}(x, y) = \sum_{j=1}^I Q_i \cdot \min(1; 1 - \prod_{j=1}^I (1 - v^{ij}(x, y) \cdot P^{ij}(x, y))) \quad (1)$$

где:

I - число сценариев развития аварий;

Q_i - частота реализации в течение года i-го сценария развития аварии, год⁻¹;

$v_{\text{уяз}}^{ijk}(x, y)$ - коэффициент уязвимости для i-го сценария и j-ого опасного фактора, который принимает значения $v_{\text{уяз}, l}^{ikp}(x, y)$.

2.1.2. Индивидуальный риск рекомендуется оценивать частотой гибели определенного человека (человека из подгруппы людей) в результате аварий в течение года. Величину индивидуального риска $R_{\text{инд}}^{kp}$, год⁻¹ для человека k-ой подгруппы p-ой группы рекомендуется определять по формуле:

$$R_{\text{инд}}^{kp} = \sum_{g=1}^G q^{kp}(g) \cdot R_{\text{пот}}(g) \quad (2)$$

где:

G - число различных областей территории и состояний коэффициентов защищенности при условии, что величину потенциального риска на всей площади, каждой из таких областей можно принять одинаковой;

$q^{kp}(g)$ - вероятность присутствия индивида из k-ой подгруппы, p-ой группы в g-ой области территории и состояний коэффициентов защищенности с учетом продолжительности действия поражающего фактора[4].

Величину максимального индивидуального риска гибели в p-ой группе лиц рекомендуется определять по формуле:

$$R_{\text{инд}}^p = \max(R_{\text{инд}}^{1p}, R_{\text{инд}}^{2p}, \dots, R_{\text{инд}}^{kp}) \quad (3)$$

2.1.3. Величину коллективного риска по пострадавшим/погибшим людям в k-ой подгруппе p-ой группы лиц рекомендуется определять по формуле:

$$R_{\text{колл.постр/гиб}}^{kp} = \sum_{i=1}^I N_{\text{ср.постр/ср.гиб}}^{ikp} \cdot Q_i \quad (4)$$

где:

$N_{\text{ср.постр/ср.гиб}}^{ikp}$ - среднее количество пострадавших/погибших в k-ой подгруппе p-ой группы лиц в i-ом сценарии аварии[4].

Величину коллективного риска для p-ой группы лиц рекомендуется определять по формуле:

$$R_{\text{колл.постр/гиб}}^p = \sum_{k=1}^K R_{\text{колл.постр/гиб}}^{kp} \quad (5)$$

Общий коллективный риск $R_{\text{колл.постр/гиб}}$ определяется суммированием $R_{\text{колл.постр/гиб}}^p$ по всем группам p:

$$R_{\text{колл.постр/гиб}} = \sum_{p=1}^P R_{\text{колл.постр/гиб}}^p \quad (6)$$

В заключение следует отметить, что расчет общего коллективного риска, представляет собой важный инструмент оценки безопасности сети газопотребления в мегаполисе. Полученные в дальнейшем результаты помогут количественно оценить масштаб потенциальных последствий техногенных аварий и определить приоритетные направления для снижения риска. Однако, важно подчеркнуть, что точность оценки напрямую зависит от достоверности исходных данных и адекватности принятой модели расчета. Дальнейшие исследования должны быть направлены на усовершенствование методологии оценки риска, включая учет неопределенностей и факторов, не учтенных в данной работе. Дальнейшие работы должны быть направлены на мониторинг эффективности внедренных мер и адаптацию стратегии снижения риска с учетом изменяющихся условий

Научный руководитель – к.т.н, доцент С.К. Петров

Библиографический список

1. Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025). – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.-Текст: электронный.
2. Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 N 528 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасного ведения газоопасных, огневых и ремонтных работ» (Зарегистрировано в Минюсте России 28.12.2020 N 61847). – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.-Текст: электронный.
3. Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 N 531 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности сетей газораспределения и газопотребления» (Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 N 61962). – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.-Текст: электронный.
4. Приказ Ростехнадзора от 03.11.2022 N 387 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.-Текст: электронный.

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА НА ПРЕДПРИЯТИИ: ПУТЬ К УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ И ОТВЕТСТВЕННОМУ ОТНОШЕНИЮ К ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Н.А. Шмырова, П.А. Симонова, Д.Г. Шаповалова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Аннотация. Современный мир сталкивается с острыми экологическими проблемами, требующими немедленного и комплексного решения. Предприятия, как значимые источники антропогенного воздействия на окружающую среду, несут особую ответственность за минимизацию своего негативного влияния. Внедрение системы экологического менеджмента (СЭМ) – это стратегический шаг к устойчивому развитию и ответственному отношению к природе, способствующий не только снижению экологических рисков, но и повышению конкурентоспособности бизнеса.

Ключевые слова: система экологического менеджмента, стандартизация, защита окружающей среды, ISO 14001, промышленные предприятия.

Введение

В условиях глобальных экологических вызовов, роста общественного внимания к вопросам устойчивого развития, а также ужесточения требований природоохранного законодательства, внедрение системы экологического менеджмента (СЭМ) становится важной частью стратегического управления на крупных промышленных предприятиях. Внедрение СЭМ в бизнес-процессы позволяет предприятиям не только снижать уровень негативного воздействия на окружающую среду, но и обеспечивать устойчивый экономический рост.

Целью данного исследования является анализ принципов и методов экологического менеджмента, его влияния на устойчивое развитие бизнеса. В рамках работы будут рассмотрены ключевые аспекты экологического управления, включая его роль в повышении конкурентоспособности предприятий и минимизации их экологического следа. Задачи исследования включают изучение теоретических основ экологического менеджмента и выявление положительных аспектов внедрения систем экологического менеджмента.

Основы экологического менеджмента: принципы и подходы

Экологический менеджмент представляет собой системный подход к управлению воздействием предприятия на окружающую среду. Его основная цель заключается в минимизации негативного влияния на экологическую систему при сохранении экономической эффективности и конкурентоспособности бизнеса. В рамках экологического менеджмента разрабатываются и внедряются стратегии, направленные на рациональное использование природных ресурсов, сокращение выбросов вредных веществ и отходов, а также на улучшение экологических показателей деятельности предприятия.

Применение стандартов, таких как ISO 14001, может быть универсальным решением для предприятий, стремящихся к улучшению своих экологических показателей и управлению рисками, связанными с экологическими воздействиями. ISO 14001 – это международный стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации, устанавливающий требования к системе экологического менеджмента (СЭМ). Он не содержит никаких жестких требований к воздействию предприятий на окружающую среду, за исключением того, что предприятие в специальном документе должно объявить о своем стремлении соответствовать национальным экологическим стандартам. Национальным экологическим стандартом в Российской Федерации является ГОСТ Р ИСО 14001-2016 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению».

Идея, заложенная в стандарты серии ИСО 14000, заключается в поддержании такой системы управления предприятием, при которой гарантируется минимизация влияния производственных процессов на окружающую среду и обеспечивается предупреждение, а не выявление проблем [1].

На каждом предприятии в зависимости от характера, масштаба и сложности его деятельности, выпускаемой продукции и предоставляемых услуг система экологического менеджмента будет иметь свои особенности.

Порядок внедрения СЭМ, согласно ГОСТ Р ИСО 14004-2017, может осуществляться в пять этапов:

1. предварительный этап, на котором происходит принятие решения со стороны руководства о необходимости внедрения СЭМ на предприятии;
2. этап планирования СЭМ, включающий в себя идентификацию экологических аспектов, разработку экологической политики, определение принятых обязательств, рисков и возможностей;
3. этап создания и внедрения СЭМ, на котором экологическая политика доводится до заинтересованных сторон, устанавливаются цели, распределяется ответственность и полномочия;
4. этап управления деятельностью, который заключается в управлении операциями и оценки возможностей возникновения аварийных ситуаций, на данном этапе разрабатывается, внедряется и поддерживается в рабочем состоянии основная документация СЭМ;

5. этап оценки результатов деятельности, включая проведение экологических аудитов, и улучшения СЭМ. Производственный экологический контроль играет ключевую роль как в процессе внедрения СЭМ, так и в оценке ее результативности.

На этапе внедрения СЭМ производственный экологический контроль позволяет оценить уровень загрязнения окружающей среды до начала реализации СЭМ, выявив критические точки и области, требующие особого внимания. В процессе внедрения СЭМ производственный контроль отслеживает эффективность реализуемых мер по снижению негативного воздействия на окружающую среду. Регулярный контроль гарантирует, что все этапы внедрения СЭМ соответствуют требованиям природоохранного законодательства, минимизируя риски юридических санкций [2].

Анализ результативности СЭМ с помощью данных производственного экологического контроля позволяет:

- оценить эффективность СЭМ: Сравнение показателей загрязнения до и после внедрения СЭМ дает объективную оценку ее эффективности, выявляя как положительные результаты, так и области, требующие дополнительной работы;
- выявить слабые места системы: Данные контроля могут указывать на слабые места в системе, позволяя своевременно внести коррективы и повысить ее эффективность;
- обосновать необходимость совершенствования СЭМ: Анализ данных контроля может служить основанием для принятия решений о модернизации СЭМ, внедрении новых технологий и методов экологического менеджмента.

Преимущества для предприятий от внедрения систем экологического менеджмента по ISO 14000

Преимущества международно-признанных стандартов достаточно очевидны. Внедрение системы экологического менеджмента, соответствующей стандартам серии ISO 14000, предприятие получает следующие преимущества [3]:

1. Успешное участие в международных тендерах.
2. Возможность получения международного сертификата экологического соответствия, что является необходимым условием для выхода продукции на мировой рынок.
3. Повышение репутации предприятия благодаря соблюдению экологических норм и законодательства.
4. Экономия энергии и ресурсов, в том числе направляемых на природоохранные мероприятия, за счет более эффективного управления ими.
5. Повышение рыночной стоимости основных фондов предприятия.
6. Улучшение системы управления предприятием.
7. Снижение юридических рисков, связанных с нарушениями природоохранного законодательства. Эффективная система экологического менеджмента минимизирует вероятность административной, гражданской или уголовной ответственности, а также негативных последствий в виде публичной критики, судебных исков, задержек в получении разрешений и лицензий, и усиленного контроля со стороны надзорных органов. В целом, предотвращение экологических инцидентов значительно снижает финансовые и репутационные потери.
8. Финансовая защищенность предприятия. Эффективная система экологического менеджмента укрепляет финансовую стабильность предприятия. Она снижает страховые риски, поскольку страховые компании требуют подробную информацию об экологической безопасности. Кроме того, для банков наличие такой системы уменьшает кредитные риски, связанные с потенциальным экологическим ущербом. Хорошая система экологического менеджмента предотвращает аварии и инциденты, что снижает страховые взносы.
9. Мотивация сотрудников. Повышение вовлеченности сотрудников, создание корпоративной культуры ответственного отношения к окружающей среде.
10. Увеличение конкурентоспособности.

Экологический менеджмент как фактор конкурентоспособности

Экологический менеджмент (ЭМ) становится важным аспектом бизнеса в современном мире, определяя конкурентоспособность предприятий. В условиях глобальных вызовов, таких как изменение климата, истощение ресурсов и растущее внимание потребителей к вопросам охраны окружающей среды, предприятия, активно внедряющие экологические практики, могут получить значительные преимущества. Рассмотрим, как экологический менеджмент влияет на конкурентоспособность:

1. Увеличение лояльности клиентов.
Экологический менеджмент представляет собой стратегический подход к управлению ресурсами предприятия, направленный на минимизацию воздействия на окружающую среду. Конкурентоспособность в свою очередь определяется способностью привлекать клиентов, инвесторов и партнёров. Внедрение экологического менеджмента способствует созданию положительного имиджа, что позволяет предприятию выделяться в глазах потребителей и укреплять свои позиции на рынке.
2. Оптимизация ресурсов и снижение затрат.
Эффективное управление ресурсами, такими как энергия, вода и сырьё, позволяет предприятиям сокращать производственные затраты. Инвестиции в технологии, позволяющие снижать экологический след, в долгосрочной перспективе могут привести к значительной экономии средств и укреплению позиций на рынке.
3. Развитие инноваций

Внедрение экологического менеджмента часто ожидает от предприятий поиска и реализации инновационных решений. Экологически чистые технологии и продукты могут стать источником роста и конкурентного преимущества. Примером может служить разработка продукции с минимальным воздействием на окружающую среду или внедрение экологически чистых процессов.

4. Соответствие нормативным требованиям.

С учетом ужесточения экологических норм и требований, предприятия, внедряющие ЭМ, могут более эффективно адаптироваться к изменениям в законодательной среде. Это минимизирует риски, связанные с возможными штрафными санкциями.

5. Привлечение инвестиций и финансирования.

Инвесторы все чаще обращают внимание на экологические и социальные аспекты бизнеса. Предприятия с устойчивыми экологическими практиками могут привлечь больший объем инвестиций, так как они менее подвержены рискам, связанным с экологическими катастрофами и изменением законодательства.

6. Улучшение имиджа предприятия

Предприятия с эффективными системами экологического менеджмента имеют более высокий уровень доверия со стороны общества и заинтересованных сторон. Позитивный имидж может быть мощным конкурентным преимуществом на рынке, особенно в отраслях с высокой конкуренцией.

7. Устойчивость к рискам

Предприятия, внедряющие экологический менеджмент, способны лучше предсказывать и управлять экологическими рисками, что позволяет им адаптироваться к меняющимся условиям рынка и свести к минимуму возможные негативные последствия для бизнеса.

Экологический менеджмент — это не просто следование правилам и нормам, это стратегическое преимущество в конкурентной борьбе. Он трансформирует отношение предприятия и работников к окружающей среде, превращая экологическую ответственность в двигатель инноваций и роста. Вместо пассивного соблюдения законодательства, предприятия, внедряющие эффективный экологический менеджмент, активно ищут пути минимизации экологического следа, используя это как стимул для разработки новых технологий, продуктов и бизнес-моделей. Такой подход позволяет снизить операционные издержки за счет рационального использования ресурсов, повышения энергоэффективности и уменьшения отходов. Экономия на сырье, энергии и воде напрямую отражается на прибыльности.

Внедрение экологических практик также повышает репутацию предприятия среди потребителей, все чаще отдающих предпочтение товарам и услугам экологически ответственных производителей. Кроме того, экологически ответственный бизнес способствует созданию новых рабочих мест в "зеленых" отраслях, стимулируя экономическое развитие. Инновации в области переработки отходов, возобновляемых источников энергии и экологически чистых технологий являются движущей силой экономического роста, а предприятия, активно внедряющие такие инновации, занимают лидирующие позиции.

Концепция устойчивого развития на предприятии: от теории к практике.

Устойчивое развитие предприятия — это стратегический подход к ведению бизнеса, направленный на гармоничное сочетание экономической эффективности, социальной ответственности и экологической безопасности [4,5].

Для предприятий переход к устойчивому развитию означает не просто соблюдение экологических норм, а интеграцию принципов устойчивости во все аспекты деятельности, от стратегического планирования до повседневных операций. Ключевыми аспектами внедрения концепции устойчивого развития на уровне предприятия являются:

1. Экономическая устойчивость: обеспечение финансовой жизнеспособности предприятия путем повышения эффективности, инноваций и поиска новых рынков. В контексте устойчивого развития, это включает долгосрочное планирование, инвестиции в экологически чистые технологии и социально ответственные проекты.

2. Социальная ответственность: предприятие должно учитывать воздействие своей деятельности на сотрудников, потребителей и всех заинтересованных сторон. Это включает создание безопасных и справедливых условий труда, поддержку местного развития, уважение прав человека и прозрачную коммуникацию.

3. Экологическая устойчивость: минимальное воздействие на окружающую среду является ключевым аспектом устойчивого развития. Это означает снижение выбросов парниковых газов, сокращение потребления ресурсов, утилизацию отходов, использование возобновляемых источников энергии и защиту биоразнообразия.

Многие предприятия рассматривают экологическую деятельность и СЭМ как результат, а не средство достижения результата, фокусируясь на соблюдении стандартов (например, ISO), но не достигают существенного улучшения экологических показателей, либо демонстрируют лишь незначительные улучшения. Для успешной интеграции концепции устойчивого развития в бизнес-стратегию необходимо переориентироваться с пассивного соблюдения норм на активное управление устойчивостью. Это предполагает:

1. Проведение глубинного анализа влияния: Предприятия должны провести тщательный анализ своего влияния на окружающую среду и социальную сферу на всех этапах деятельности — от добычи сырья до утилизации отходов. Только понимание своих материальных аспектов позволит выработать целевые и эффективные стратегии.

2. Включение целей устойчивого развития в стратегическое планирование: Цели устойчивого развития должны быть тесно связаны с бизнес-целями и включены в стратегические планы предприятия. Это обеспечит их интеграцию во все аспекты деятельности.

3. Разработка измеримых показателей эффективности (KPI): Для отслеживания прогресса необходимо разработать конкретные, измеримые, достижимые и ограниченные во времени KPI для каждого из ключевых аспектов устойчивого развития.

4. Интеграция в процессы управления: Принципы устойчивого развития должны быть интегрированы во все процессы управления – от закупок и производства до маркетинга и продаж.

5. Вложение в инновации и технологии: Инвестиции в новые технологии и инновационные решения способствуют повышению энергоэффективности, снижению выбросов и созданию более устойчивых продуктов и услуг.

6. Постоянное совершенствование: Устойчивое развитие – это не одноразовый проект, а постоянный процесс совершенствования. Предприятия должны регулярно оценивать свою деятельность, анализировать результаты и вносить необходимые корректировки в свою стратегию для достижения более высокого уровня устойчивости.

7. Взаимодействие с клиентами, сотрудниками, инвесторами и т.д.: Открытый диалог и взаимодействие со всеми заинтересованными сторонами – является необходимым условием для успешной интеграции устойчивого развития [4,5].

Только такой активный и целенаправленный подход позволит предприятиям превратить устойчивое развитие из формальной обязанности в конкурентное преимущество.

Устойчивое развитие предприятия — это стратегический подход, требующий активного управления, включающего глубокий анализ влияния на окружающую среду и общество, интеграцию целей устойчивого развития в бизнес-стратегию, разработку KPI, инновации и постоянное взаимодействие со всеми заинтересованными сторонами, что превращает его из формальной обязанности в конкурентное преимущество.

Заключение

Устойчивое развитие бизнеса невозможно без эффективной системы экологического менеджмента (СЭМ), которая является неотъемлемой частью стратегии достижения долгосрочной экономической эффективности, социальной ответственности и экологической безопасности. СЭМ обеспечивает контроль за экологическими рисками, минимизируя негативное воздействие на окружающую среду и оптимизируя использование ресурсов, что напрямую вписывается в концепцию устойчивого развития.

Оптимизация ресурсопотребления, снижение выбросов и управление отходами, реализуемые в рамках СЭМ, являются ключевыми показателями экологической ответственности, а сертификация по стандартам, таким как ISO 14001, подтверждает приверженность предприятия принципам устойчивого развития, укрепляя его репутацию и привлекательность для инвесторов и потребителей, что в конечном счете обеспечивает долгосрочное процветание бизнеса и способствует созданию более устойчивого будущего. Внедрение СЭМ – это инвестиции в устойчивое будущее, обеспечивающее долгосрочное процветание и соответствие современным требованиям ответственного бизнеса.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Т.В. Гурская

Библиографический список

1. Национальный стандарт российской федерации гост р исо 14001-2016 системы экологического менеджмента требования и руководство по применению.
2. С.Ю. Дайман, Т.В. Островкова, Е.А. Заика, Т.В. Сокорнова; Под ред. С.Ю. Даймана. Системы экологического менеджмента для практиков Москва: Издво РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. С. 248.
3. Измалкова С.А., Авдеева И.Л., Головина Т.А., Бахтина С.С., Парахина Л.В. Экологический менеджмент // учебное пособие для высшего профессионального образования. Орел: ФГБОУ ВПО «Госунiversитет -УНПК», 2013. С. 62 — 65.
4. Л.М. Давлетшина. Управление устойчивым развитием бизнеса: учебно-методическое пособие. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. С. 44.
5. Петуныкин С.П., Никулина И.Е., Управление экологической устойчивостью организаций в условиях зеленой экономики