

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098
от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова»
(141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)
Издается с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
2. Технические науки; 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации [2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов]; 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

«Почта России» ПП997

Главный редактор
Артюшенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-30 (доб. 138),
E-mail: rio-kimes@mail.ru,
Site:www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

Лобанов О.А., Петров В.Е.

**НЕТОЖДЕСТВЕННОСТЬ ВЫРАЖЕНИЙ:
ДУБЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ, ЗАДВОЕННАЯ
ЗАПИСЬ И ДУБЛИКАТ ДАННЫХ**..... 3

Мамаев А.С.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ
КОГНИТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА
ДОСТОВЕРНОСТЬ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК
В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ СФЕРЕ** 15

Попова Е.С., Нефедов А.В.

**МЕТОДИКА ПОШАГОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ**..... 21

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Горский Г.Е.

**СОВРЕМЕННЫЕ АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННЫХ
СЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ
В ВИДЕО ПОТОКАХ** 34

Самаров Е.К.

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
АЛГОРИТМА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА
МОНОИМПУЛЬСНОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО
ИЗМЕРИТЕЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ** 40

Семенов А.Б.

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ВИЛКИ МОДУЛЬНОГО РАЗЪЕМА В СОСТАВЕ
СИСТЕМЫ АДМИНИСТРИРОВАНИЯ СКС** 48

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аббасова Т.С.

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЗАПАС ЖИДКОСТНОГО
РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ** 58

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Барканов Е.Н., Dr.sc.ing.
2. Васильев Н.А., д.т.н., профессор
3. Леоненко Д.В., д.ф.-м.н., профессор
4. Тимофеев А.Н., д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Аббасов Э.М., к.т.н.
2. Аббасова Т.С., к.т.н., доцент
3. Бухаров С.В., д.т.н., профессор
4. Бершадский В.А., д.т.н., профессор кафедры
5. Воловач В.И., д.т.н., профессор
6. Кучеров Б.А., к.т.н.
7. Логачев И.А., к.т.н.
8. Логачева А.И., д.т.н., профессор
9. Макаров М.И., д.т.н., профессор
10. Матвиенко Ю.Г., д.т.н., профессор
11. Мороз А.П., д.т.н., профессор
12. Мосалов О.П., к.ф.-м.н.
13. Разумовский И.М., д.ф.-м.н., профессор
14. Рудаков В.Б., д.т.н., профессор
15. Самаров Е.К., д.т.н., доцент
16. Скрябин М.Л., к.т.н.
17. Соляной В.Н., к.т.н.
18. Стрелянюк Ю.В., д.т.н., профессор
19. Халиулин В.И., д.т.н., профессор
20. Чесноков А.В., д.т.н.
21. Щурин К.В., д.т.н., профессор

Подписано в печать 10.12.2025

Формат 70x100/16/

Печать офсетная. Усл. печ. л. 10.

Тираж 500 экз. Заказ № 4890.

Отпечатано в типографии
ИП Копыльцов П.И. 394052,
Россия, г. Воронеж,
ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56.
Тел.: 8 (950) 765 69 59

Вокин Г.Г.

**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ
ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО
ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ ДОСТАВКИ ГОЛОВНЫХ
ЧАСТЕЙ (БОЕВЫХ БЛОКОВ) БАЛЛИСТИЧЕСКИХ
РАКЕТ СРЕДНЕЙ И МЕЖКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ
ДАЛЬНОСТИ К ЦЕЛЕВЫМ ОБЪЕКТАМ
СТАЦИОНАРНОГО И МОБИЛЬНОГО
БАЗИРОВАНИЯ** 65

Ионченкова Я.Ю., Самаров Е.К.

**ОЦЕНКА ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДАЛЬНОМЕРНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**..... 76

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Артюшенко А.В.

**ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ВАРИАЦИИ ДЛИНЫ
РЕЗОНАТОРА** 89

Спирин Б.Л., Фролов С.В.

**ПРИМЕНЕНИЕ МКЭ С МАСШТАБИРУЕМЫМИ
ГРАНИЦАМИ ДЛЯ РАСЧЕТА 3D КОНСТРУКЦИЙ
С ТРЕЩИНАМИ** 99

Шульженко С.Н., Шульженко Н.А.

**ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ В БЛАГОУСТРОЙСТВЕ
ТЕРРИТОРИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ** 111

УДК 004.65

**Нетождественность выражений: дублирование данных,
задвоенная запись и дубликат данных**

Олег Андреевич Лобанов, преподаватель кафедры «Управления и информатики
в технических системах» (УИТС),

Валерий Евгеньевич Петров, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управления и информатики в технических системах» (УИТС),
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН» (ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»), г. Москва

В данной исследовательской статье проводится анализ терминологических расхождений при описании аномалий повторения данных. Единого стандарта для использования словосочетаний нет, поэтому в статье проанализированы различия между понятиями «дублирование данных» (управляемая избыточность), «задвоенная запись» (непреднамеренный артефакт) и «дубликат» (факт наличия копии). Обращаясь к источникам: словарь, литература, публикации, в поиске четкого определения находим неоднозначность в этих выражениях. Предлагаются к рассмотрению примеры для выявления некоторых закономерностей ошибок и неточностей, в каких плоскостях лежит эта воспринимаемая сущность. На основе анализа учебной, научной и технической литературы выявлена системная терминологическая неоднозначность, затрудняющая формализацию процессов контроля целостности данных. Предлагается классификация на основе критериев интенциональности, функциональности и генезиса явления. Особое внимание уделено операционному контексту использования термина «задвоенность», который, в отличие от общепринятого понятия дублирования, требует отдельного терминологического и методологического осмысления. Результаты работы могут быть применены для стандартизации терминологии в области качества данных и проектирования отказоустойчивых протоколов обработки информации.

База данных, дублирование, задвоенная запись, дубль, аномалии данных, повторение данных.

**The difference between concepts duplication of data,
dummy recording and double**

Oleg Andreevich Lobanov, Lecturer at the Department of Management
and Informatics in Technical Systems,

Valery Evgenevich Petrov, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Management
and Computer Science in Technical Systems,

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«Moscow State Technological University «STANKIN», Moscow

This research paper analyzes terminological discrepancies in describing data repetition anomalies. Since no single standard for terminology usage exists, the article examines the differences between the concepts of «data duplication» (managed redundancy), «dummy record» (unintentional artifact), and «duplicate» (the fact of a copy's existence). When consulting sources-dictionaries, literature, and publications – in search of clear definitions, ambiguity in these expressions becomes apparent. Examples are provided to identify patterns of errors and inaccuracies and to determine the planes in which this perceived entity exists. Based on the analysis of educational, scientific, and technical literature, a systematic terminological ambiguity has been identified, complicating the formalization of data integrity control processes. A classification is proposed based on the criteria of intentionality, functionality, and genesis of the phenomenon. Special attention is paid to the operational context of using the term «dummy recording» which, unlike the generally accepted concept of duplication, requires separate terminological and methodological comprehension. The results can be applied to standardize terminology in the field of data quality and design fault-tolerant data processing protocols.

Database, duplicate, dummy record, duplicate, duplicate, data anomalies, data repetition.

Введение

Проблема повторяющейся информации в базах данных представляет собой значительный интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения. В ходе исследования данного феномена была выявлена существенная терминологическая неоднозначность, осложняющая как профессиональную коммуникацию, так и разработку стандартизированных методов решения проблемы. В различных источниках можно встретить целый ряд понятий для описания сходных явлений: «дублирование данных», «дубль», «повторение данных», «задвоение записей» и другие. Данная терминологическая вариативность свидетельствует об отсутствии устоявшегося категориального аппарата и затрудняет однозначную интерпретацию рассматриваемых процессов. В статье рассматривается вопрос правильности передачи смысловой нагрузки при использовании этих слов при повторяющейся информации в базе данных.

Сложившаяся ситуация требует проведения терминологического анализа и выработки четких критериев разграничения понятий. В обиходе принято, что дублирование данных – это процесс создания и хранения идентичных копий – данных в различных узлах системы или на разных носителях с целью повышения отказоустойчивости, ускорения доступа или обеспечения избыточности.

Но сейчас так же часто используется еще такое понятие как «задвоенные данные» – это артефакт, возникающий впоследствии объединения различных сущностей, ошибок в процессе сбора, обработки или интеграции данных, приводящий к неконтролируемому появлению идентичных или практически идентичных записей в рамках одного хранилища. Характерно, что данный термин, не будучи формально закрепленным в нормативной документации, активно используется специалистами-практиками – бухгалтерами, аналитиками, администраторами баз данных. Часто от бухгалтеров, аналитиков и других профессий, которые работают с

данными можно услышать фразу «Данные задвоились – надо исправлять» и всем сразу понятно, в чем проблема. Фраза «данные задвоились» стала своеобразным профессиональным маркером, однозначно указывающим на наличие проблемы, требующей немедленного решения.

Целью настоящего исследования является комплексный анализ сложившейся терминологической ситуации и выработка предложений по упорядочению понятийного аппарата. Для начала рассмотрим различные учебники, и что там используется при обсуждении вопроса повторений в базе данных на русском языке, потом обратимся к научным статьям на русском языке, затем рассмотрим информационные источники на иностранных языках и под конец посмотрим словари русского языка. Последним этапом будет рассмотрено, откуда появилось выражение «задвоенность» и предложения по их определению.

Проведенный анализ позволит не только систематизировать существующую терминологию, но и выявить семантические нюансы использования различных понятий, что представляет значительную ценность для совершенствования профессиональной коммуникации и разработки эффективных методов управления качеством данных.

Использование выражений в учебной литературе

В литературе чаще всего используется понятие дублирование, хотя по смыслу это понятие не совсем подходит к тому, что описывается. К примеру, в учебном пособии «Основы проектирования баз данных» используется дублирование для повторяющейся информации в базе данных, причем идет разделение на неизбыточное и избыточное дублирование, которое может привести к ошибкам [1]. Речь тут идет о повторениях записей в базе данных, а не о каком-то другом дублировании. Еще много такой литературы, где используется дублирование с этой смысловой загрузкой. В учебно-практическом пособии «Базы данных: Введение в технологию баз данных» используется просто «Дублирование» для базы данных, без какого-либо деления этого понятия [2].

У В.В. Конкина в учебном пособии «Введение в большие данные и анализ информации» применяется нейтральное слово «Дубликат», которое можно применить и к задвоенной записи, и к дублированной информации [3].

В учебно-методическом пособии «Типовые сценарии создания и работы с базой данных» применяется словосочетание «Повторяющиеся записи» для задвоенной информации в базе данных. Это учебное пособие учит работать в Microsoft Office Access, в самой программе есть «Мастер повторяющихся записей», который осуществляет поиск повторений по введенным настройкам [4], а словосочетание «дублирование записей» не применяется. В учебном пособии «Основы баз данных» тоже применяется словосочетание «Повторяющиеся записи» [5].

В книге «Путеводитель по базам данных» вместо повторяющейся записи или дублирования записи применяется слово: «аномалия». При этом в этом же информационном источнике применяется «Дублирование» с точки зрения осмысленного создания дублей для обеспечения отказоустойчивости при хранении данных на дисках [6].

Использование выражений в научной литературе

Статьи не далеко ушли от книг, там тоже встречаются совершенно разные понятия, которое используют для повторяющейся информации в базе данных. В научной статье по специальности «Компьютер и информационные науки» используется «дублирование данных» и «дубликаты» для обозначения повторений в базах данных [7].

Алимов А.А. в своей экономической статье при описании преимуществ и недостатков программного обеспечения в 1С бухгалтерии использует понятие «Дублирование учетных записей» и «задвоение счетов» [8]. В то же время в статье кандидата экономических наук, доцента О.Б. Бородиной применяются сразу 2 понятия при обозначении одного и того же: «дублирование сведений государственного лесного реестра» и «задвоение данных о лесном фонде страны» [9]. В журнале «пространственные данные: наука и технологии» автор применил понятие «задвоенные данные» и более нейтральное выражению: «дубль» [10].

Из рассмотренной выше информации, можно сказать, что в экономических статьях чаще применяется словосочетание «Задвоенность информации» и «Дубликат информации», а в технических чаще встречается: «Дублированная информация».

В иностранной литературе применяется «Doubling», что можно перевести как «дублирование». Слова «Дублированный» и «двойной» связаны с понятием «два», но различаются по своему использованию и нюансам. «Двойной» означает удвоенный размер, количество и т.д. или состоящий из двух похожих элементов вместе. «Дублированный» означает создание точной копии или воспроизведение чего-либо намеренно. Чаще всего применяется при резервном копировании данных. Так же в иностранной литературе встречается выражение «Redundancy data», что переводится как избыточные данные. Когда иностранцы говорят про избыточные данные БД, имеют в виду распространенную ошибку, которая может вызвать ряд проблем: противоречивые данные, снижение производительности и повышенный риск безопасности.

Определение выражений в словарях и их сравнение

В словарях дублирование обозначает: «ДУБЛИРОВАНИЕ (от франц. doubler – удваивать) в технике, способ повышения надёжности объекта (напр., системы, агрегата, устройства) путём однократного резервирования объекта в целом или его отдельной узлов, блоков, элементов. Основной и резервный объекты образуют дублированную группу. В зависимости от условий эксплуатации различают дублирование нагруженное, при котором основной и резервный объекты работают одновременно и находятся в одинаковых эксплуатационных условиях, облегчённое (резервный объект нагружен меньше, чем основной) и ненагруженное (резервный объект не нагружен и начинает работать только после отказа основного). Применяются различные способы соединения объектов в дублированную группу...» [11].

Данное явление является управляемым и часто применяется в распределённых базах данных, системах репликации и резервного копирования.

Данное выражение используется, когда речь идет о преднамеренном создании копий данных для резервирования, репликации или оптимизации. Плюсами

может быть:

- отказоустойчивость, при потере узла данные останутся доступны на копии;
- ускорение чтения, запросы распределятся между копиями;
- соответствие конкретным требованиям и обязательствам, зафиксированным в соглашении об уровне сервиса – SLA (Service Level Agreement).

Минусами можно назвать: усложнение архитектуры, затраты на хранение и необходимость механизмов согласованности работы таких данных.

Дубль в словарях: «ДУБЛЬ (франц. double – двойной), в музыке 16-18 вв. варьированное повторение (вариация) небольшой пьесы.» [11]. Или «ДУБЛЬ (фр. double – двойной) – повторение, вариант, второй экземпляр чего-либо (съемки эпизодов, какой-либо ситуации и т.п.)» [12].

Задвоиться в словарях: «Задвоиться – начать двоиться, удваиваться (о воспринимаемых зрением предметах)» [13] или «Задвоение – это процесс или результат удвоения, увеличения в два раза. Это понятие может применяться как в математике, так и в других областях, где речь идет об увеличении чего-либо в два раза» [14].

«Задвоение» в данных это относительно новое слово, в словарях его найти тяжело, но часто можно услышать от тех, кто работает с данными: «Данные задвоились», то есть произошло несогласованное повторение данных. Найти это слово можно в русско-английском словаре от слова «doubling» [15].

В отличие от дублирования, задвоенность является нежелательным эффектом, ухудшающим качество данных, увеличивающим объем хранилища и усложняющим аналитическую обработку.

Используется, когда речь идет о непреднамеренном, ошибочном повторении данных в результате сбоев, ошибок ввода или проблем интеграции. Чаще всего причинами бывают: сбои при импорте, нет UNIQUE-ограничений (уникальные ограничения) в БД и race condition в транзакциях (одновременная обработка одной и той же транзакции). Такие данные могут привести к следующим проблемам: искажение аналитики, увеличение объема хранилища, конфликты при обновлениях и другие.

В результате собранных данных, представленных сверху, получилась диаграмма, которая показывает полученную разницу между понятиями дубликат, задвоение и дублирование (Рис. 1).

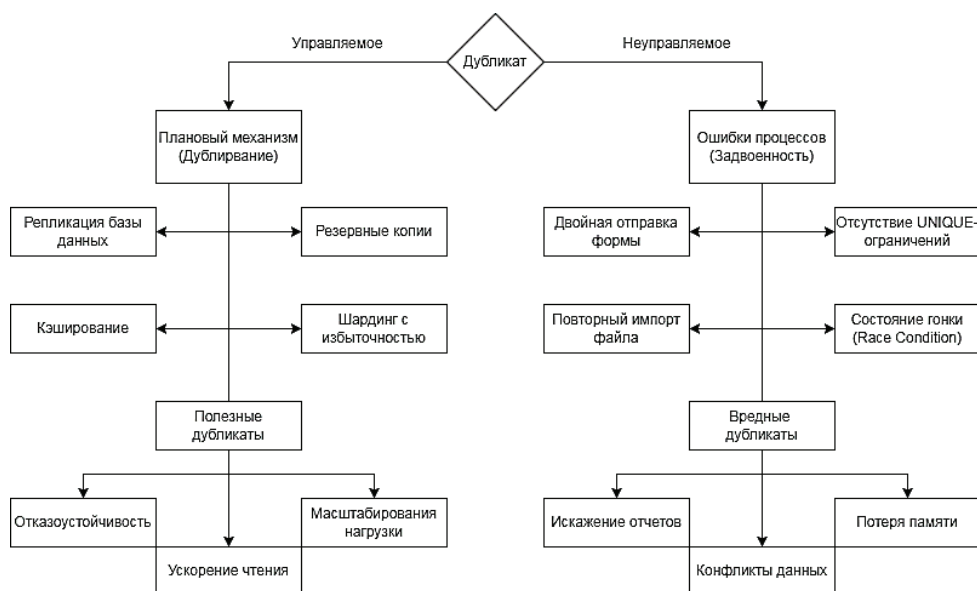


Рисунок 1 – Схема дубликата

В итоге выделены ключевые различия между дублированием и задвоенностью данных и построена на основе этой информации таблица 1.

Таблица 1 – Сравнение понятий дублирование и задвоенность

Критерий	Дублирование	Задвоенность
Природа возникновения	Результат осознанных преднамеренных действий	Следствие ошибок настроек или человеческого фактора
Производительность	Улучшается (чтение)	Ухудшается (лишние операции)
Надежность	Повышается	Снижается (риск противоречий)
Целостность	Контролируется (согласованность)	Нарушается
Затраты	Планируемые (ресурсы на копии)	Непредвиденные (очистка)
Семантическая эквивалентность	Копии семантически и структурно идентичны	Могут иметь незначительные расхождения
Методы управления	Регулируется политиками репликации и согласованности	Устраняется методами очистки данных, хеширования и алгоритмами обнаружения дубликатов

Обращение к выражениям дублирование и задвоенность в интернете

Воспользуемся сервисом «Вордстат», чтобы посмотреть статистику поисковых запросов у Яндекса с запросом «дублирования» и «задвоенности».

Дублирование выдало 67162 запроса только в месяц с 28.04.2025 по 28.05.2025, в основном это запросы: дублирование экрана, работников, работ,

функций, действий. Про дублирование данных было всего лишь 2754 запроса, из которых некоторые могут иметь значения создания резервной копии данных (Рис. 2).

Запросов задвоения оказалось за этот же период меньше – 8392. Из них две с половиной тысячи про то, как правильно пишется это слово, а остальные про задвоение в 1С, в экселе (Microsoft Office Excel), задвоение счетов, сумм и тому подобное (Рис. 2).

Также было рассмотрено обращение к этим выражениям в разные года: с 2022 по май 2025 года. Из статистики запросов, можно сказать, что в последнее время запросов в браузере «задвоенности» существенно увеличилось (Рис. 3).

На сервисе «Вордстат» были проанализированы популярные запросы со словами «Дублирование» и «Задвоенность», а также проанализирован их спрос. Из популярных запросов Яндекса видно, что выражение «завдоение» сейчас часто используют бухгалтеры в 1С и другие профессии при встрече повторной ошибочной записи, которая не должна учитываться при составлении дальнейших документов. А при поиске «дублирования» пользователи хотят получить информацию о случаях, когда им надо проводить резервное копирование или создать дубль экрана, фильмов (Рис. 4).

Общее число запросов «дублирование» за 28.04.2025 – 28.05.2025:

Скачать

Общее число запросов «задвоение» за 28.04.2025 – 28.05.2025: 8 392

Скачать

Формулировка	Число запросов	Формулировка	Число запросов
дублирование	67 162	задвоение	8 392
дублирование экрана	13 764	задвоение как пишется	1 056
дублирование телевизора на телевизор	4 281	задвоение 1с	683
дублирование рабочего	3 897	задвоение как пишется слитно	503
дублирование экрана на телевизор	3 873	задвоение слитно или раздельно	463
дублирование телефона	3 630	задвоение как пишется слитно или раздельно	453
дублирование работ	2 959	задвоение в экселе	282
дублирование данных	2 754	задвоение в эксель	282
дублирование экрана телефона	2 667	задвоение как правильно	244
время дублирования	2 462	задвоение счетов	213
дублирование функций	2 358	задвоение налогов	186
дублирование действий	2 234	задвоение сумм	183
сделай дублирование	2 183	задвоение как пишется правильно	172

Рисунок 2 – Количество запросов дублирования и задвоения за месяц

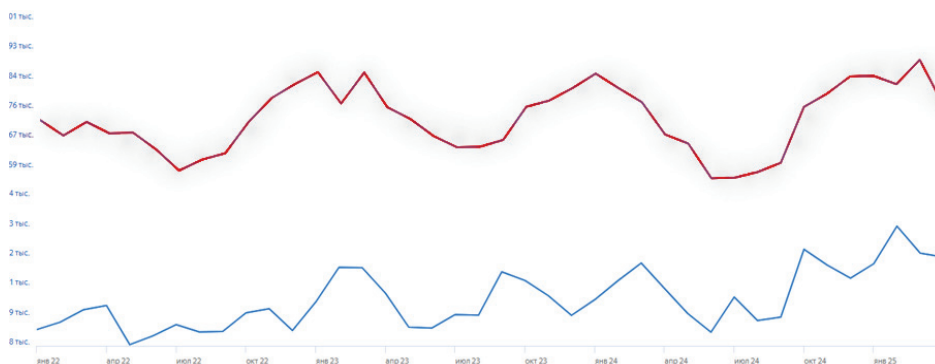


Рисунок 3 – Количество запросов дублирования (красное) и задвоения (синие) за последние 3 года

Запрос	Конкурентность ①	Спрос ②	Запрос	Конкурентность ①	Спрос ②
в каких случаях не проводится дублирование?	● умеренная	871	зادвоение контрагентов в 1с 8.3 как убрать	● умеренная	172
в каких случаях не проводится дублирование	● высокая	737	зadвоение чека в офд как исправить	● высокая	157
дублирование фильмов	● высокая	278	зadвоение	● низкая	626
какое количество противоаварийных тренировок необходимо за время дублирования	● высокая	411	зadвоение как пишется слитно или раздельно	● низкая	202
какое количество противоаварийных тренировок необходимо за время дублирования?	● высокая	609	зadвоение кадастрового номера земельного участка что депать	● умеренная	37
обнаружено дублирование ключевых значений в колонках: "ссылка", отображение данных в списке невозможно.	● умеренная	141	зadвоение как пишется	● низкая	135
дублирование экрана	● высокая	434	зadвоение снилс как исправить	● высокая	17
обнаружено дублирование ключевых значений в колонках ссылка 1с 8.3	● умеренная	128	зadвоение как пишется правильно	● низкая	105
дублирование комбинации код дохода 2000 вычет 0 в личном кабинете налогоплательщика	● умеренная	80	зadвоение вычетов по ндфл в январе 2025	● высокая	15
кто несет ответственность за действия работника, допустившего к дублированию на рабочем месте?	● высокая	437	зadвоения как пишется	● низкая	23
			как пишется задвоение	● низкая	19
			зadвоение ндфл в начислении зарплаты в 1с 8.3 бухгалтерия	● умеренная	9

Рисунок 4 – Популярны запросы дублирования и задвоенности

Эволюция терминологического поля

Возникновение и закрепление термина «задвоенность» в профессиональном русскоязычном лексиконе – это не случайность, а закономерный результат эволюции языковых практик под влиянием технологических и операционных потребностей. Этот процесс является классическим примером того, как язык, особенно в узкоспециализированных областях, развивается не «сверху» (путем предписаний нормативных институтов), а «снизу» – через ежедневное использование специалистами, которые сталкиваются с проблемой и испытывают необходимость в её точном и емком обозначении.

Исторически проблема непреднамеренного появления идентичных или почти идентичных записей в информационных системах описывалась расплывчатыми и заимствованными из общего языка формулировками: «ошибочные повторы», «технические дубли», «артефакты слияния» или с английского «data duplicates» – дубликаты данных. Эти обозначения были недостаточны, так как не передавали ключевых аспектов явления: его неумышленного, деструктивного и системного характера.

Переломный момент наступил в конце 1990-х – начале 2000-х годов с массовой цифровизацией отечественного бизнеса, особенно в сфере бухгалтерского учета и ERP-систем (таких как 1С). Именно в этом контексте глагол «задвоилось» стихийно возник в речи практиков – бухгалтеров, системных администраторов, консультантов по внедрению. Это был мгновенно понятный коллегам ярлык для критичной ошибки, когда, например, один и тот же платеж или накладная отражались в системе дважды, что приводило к искажению отчетности и финансовых результатов. Термин родился как реакция на острую операционную проблему, которую старые слова не могли точно описать.

Механизм формирования и закрепления этого термина можно разложить на три взаимосвязанных лингвистических процесса:

1. Когнитивная метафора (Conceptual Metaphor)

В основе термина лежит яркая и понятная метафора переноса свойства из одной сенсорной области в другую. В русском языке глагол «двоиться»

исторически относится к зрительному восприятию (пример: «в глазах двоится»). Это ощущение размытости, нечеткости, искажения реальности было метафорически спроецировано на данные. «Данные задвоились» – значит, они воспринимаются системой и пользователем нечетко, размыто, их целостная картина искажена наличием неразличимых копий. Метафора оказалась на удивление емкой, передавая не только факт наличия двух записей, но и когнитивный диссонанс пользователя, который сталкивается с этой аномалией.

2. Семантическое сужение (Semantic Narrowing)

Общеупотребительное слово «удвоение» или «двойной» обладает широким значением (увеличение в два раза, состоящий из двух частей). Профессиональное сообщество совершило над ним операцию семантического сужения. Теперь «задвоенность» означает не любое удвоение, а строго определенный тип – неумышленное, ошибочное, технологическое удвоение информационных сущностей в рамках одной системы или набора данных. Это сужение отличает его от нейтрального или позитивного «дублирования» (создание резервных копий, репликация для производительности).

3. Эмоциональная и оценочная маркированность (Emotional and Evaluative Connotation)

С английского *duplicat* – «дубликат» или технический термин *redundancy* – «избыточность» нейтральны. Термин «задвоенность» с самого начала несет в себе четкую негативную оценочную нагрузку. Он не просто описывает состояние системы, а сразу же выносит вердикт: это – проблема, это – ошибка, это – то, что требует немедленного исправления. Эта оценочность, рожденная в гуще операционной деятельности, сделала термин исключительно практичным и функциональным для постановки задач: фраза «данные задвоились» является сразу и диагнозом, и призывом к действию для всех участников процесса.

Дальнейшая эволюция термина пошла по пути терминологической дивергенции – его сознательного отделения от смежных понятий. Если первоначально «дубликат» и «задвоенность» могли использоваться как синонимы, то со временем они начали иметь свой неповторимый окрас:

Дубликат – это констатация факта: существует две или более идентичных записи.

Задвоенность – это объяснение генезиса и последствий: дубликаты возникли непреднамеренно вследствие сбоя, ошибки интеграции или процесса и наносят вред качеству данных.

Таким образом, эволюция термина «задвоенность» – это путь от стихийного, ситуативного словечка до полноценного, семантически нагруженного профессионального термина. Его сила – в метафорической точности, оценочной ясности и функциональности, что и позволило ему вытеснить более громоздкие или менее выразительные формулировки и претендовать на включение в нормативные словари и стандарты. Это наглядный пример того, как живой язык практиков формирует тот точный инструментарий, который необходим для решения реальных задач.

Вывод

Проведенное исследование позволяет констатировать отсутствие терминологического единства в отношении феномена непреднамеренного повторения данных в научном сообществе. Сложившаяся лексическая поливариантность порождает семантическую неопределенность, что приводит к существенным коммуникационным коллизиям при обсуждении данной проблематики. Отсутствие консенсусного определения и регламентированного стандарта номинации детерминирует ситуацию, при которой субъекты профессиональной коммуникации вынуждены оперировать контекстуально-обусловленными понятиями, релевантными для конкретной предметной области или операционной среды.

На основании комплексного анализа сложившейся терминосистемы, охватывающего учебно-методические, научные и нормативные источники, авторы предлагают ввести четкое терминологическое разграничение, основанное на критериях интенциональности, функциональности и генезиса:

- Понятие «**Дублирование данных**» предлагается трактовать как целенаправленно спроектированную системную избыточность, применяемую для обеспечения отказоустойчивости, повышения производительности или выполнения регламентных требований (например, в распределенных системах, механизмах репликации и резервного копирования). Данный процесс является управляемым, детерминированным и обладает четко определенной целевой функцией.
- Понятие «**Задвоенность данных**» идентифицируется как аномальное состояние, возникающее в результате некорректной интеграции систем, нарушения транзакционной целостности, ошибок ввода или сбоев процессов. Это явление носит деструктивный характер, приводит к нарушению консистентности данных и требует применения корректирующих мер, таких как усиление ограничений целостности (UNIQUE-ограничения), внедрение идемпотентных операций и превентивной валидации на уровне приложения.
- Понятие «**дубликат**» предлагается использовать как родовой, интенционально-нейтральный термин, обозначающий факт наличия повторяющейся записи в множестве данных, без импликации о причинах или природе ее возникновения.

Таким образом, введение предложенной трехуровневой терминологической дифференциации позволяет не только устранить существующую смысловую неоднозначность, но и заложить методологический фундамент для разработки более точных метрик качества данных, алгоритмов детектирования артефактов и протоколов их устранения, что является необходимым условием для повышения надежности и согласованности современных информационных систем.

Литература

1. Попова-Коварцева Д.А., Сопченко Е.В. Основы проектирования баз данных: учебное пособие. Самара: Издательство Самарского университета, 2019. 112 с.
2. Градусов А.Б. Базы данных: Введение в технологию баз данных: учебное-практическое пособие. Владимирский государственный университет имени

- Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. Владимир: Издательство ВлГУ, 2021. 208 с.
3. Конкина В.В., Борисенко А.Б., Коробова И.Л. Введение в большие данные и анализ информации: учебное пособие. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. 82 с.
 4. Фомина И.А. Типовые сценарии создания и работы с базой данных. ЧАСТЬ 2: Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2020. 60 с.
 5. Крикунов М.М., Поручиков А.Н. Основы баз данных: учебное пособие. Самара: Издательство Самарского университета, 2021. 84 с.
 6. Комаров В.И. Путеводитель по базам данных. М.: Издательство ДМК Пресс, 2024. 520 с.
 7. Тарасов С.В., Бураков В.В. Контекстно зависимый способ поиска нечётких дубликатов в реляционных базах данных // Информационно-управляющие системы. 2015. № 2. С. 76-81.
 8. Алимов А.А. Преимущества и недостатки программного обеспечения «1С бухгалтерия» // Форум молодых ученых. 2019. № 6. С. 105-108.
 9. Бородина О.Б., Чуксин И.В., Фомина А.В., Желонкина Е.Э. Государственный лесной реестр как информационная база в системе устойчивого управления землями лесного фонда российской федерации // Московский экономический журнал. 2022. № 4. С. 10-23.
 10. Вавулинская Д.Д., Миклашевская О.В. Информационное обеспечение деятельности Росреестра по вопросам верификации и гармонизации сведений ФГИС ЕГРН // Пространственные данные: наука и технологии. 2022. № 13. С. 5-18.
 11. Фомин В.Н. Большая российская энциклопедия. В 30 томах. Том 9. Москва, 2007. 384 с.
 12. Комлев Н.Г. Словарь иностранных слов [более 4500 слов и выражений]. Москва: Эксмо, 2006. 669 с.
 13. Ефремова Т.Ф. Новый словарь русского языка. Толково-словообразовательный. М.: Русский язык, 2000. 1084 с.
 14. Словозавр – место, где вы сможете узнать значение слова и его происхождение, «Задвоение» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://slovozavr.ru/zadvoenie/> (дата обращения 20.05.2025).
 15. Академик.ру, Универсальный русско-английский словарь, 2011 [Электронный ресурс]. Режим доступа: web.archive.org/web/20221003004143/https://dic.academic.ru/ (дата обращения 21.05.2025).
 16. Бобров Е.В., Ткачёв А.А. Задвоенная ответственность контролирующих лиц в процедурах банкротства // Образование. Наука. Научные кадры. 2024. № 1. С. 145-150.
 17. Маликов А.В., Целиковский А.С. Алгоритм обнаружения фактов дублирования информации в документированных результатах самостоятельной учебной деятельности студентов, устойчивый к незначительным изменениям текста // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2011. № 4. С. 40-42.

18. Степаненко Д.О. К проблеме «задвоения» кадастровых номеров // Актуальные проблемы совершенствования законодательства и правоприменения. Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции 21 декабря 2017. С. 277-279.
19. Рябцов А.Ю., Аврамчук Л.В. Аспекты стратегического планирования в условиях цифровой трансформации // Вестник науки. 2025. № 2. С. 206-211.

УДК 519.8

Системный анализ влияния когнитивных искажений на достоверность экспертных оценок в профессиональной сфере

Александр Сергеевич Мамаев, ассистент кафедры КБ-2
«Информационно-аналитические системы кибербезопасности»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»
(РТУ МИРЭА), г. Москва

Исследуется влияние когнитивных искажений на точность экспертных оценок в профессиональной сфере. Рассматриваются ключевые типы искажений и их проявление в индивидуальной и групповой экспертной деятельности. Предложены методы оптимизации: алгоритмы дебиазинга и модифицированные методы групповой работы. Апробация в образовательной среде показала повышение точности оценок на 15-20%. Исследование основано на системном анализе, математическом моделировании и теории принятия решений.

Когнитивные искажения, экспертные оценки, системный анализ, дебиазинг, принятие решений, метод Дельфи, точность оценок, оптимизация решений.

System analysis of the influence of cognitive biases on the reliability of expert assessments in the professional sphere

Alexander Sergeevich Mamaev, postgraduate 2-nd year Department of Management,
Assistant at the Department of KB-2 «Information and Analytical Security Systems»,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«MIREA – Russian Technological University» (RTU MIREA), Moscow

The study investigates the impact of cognitive biases on the accuracy of expert assessments in the professional sphere. Key types of biases and their manifestation in individual and group expert activities are analyzed. Optimization methods are proposed, including debiasing algorithms and modified group work techniques. Testing in an educational environment demonstrated a 15-20% increase in assessment accuracy. The research is based on system analysis, mathematical modeling, and decision-making theory.

Cognitive biases, expert assessments, system analysis, debiasing, decision making, Delphi method, assessment accuracy, optimization of decisions.

Введение

Экспертные оценки играют критически важную роль в процессе принятия управленческих решений в различных профессиональных сферах, особенно в условиях неопределенности и дефицита объективных данных [1]. Однако достоверность экспертных заключений существенно ограничивается влиянием когнитивных искажений – систематических ошибок мышления, нарушающих адекватность восприятия и анализа информации.

Актуальность исследования обусловлена возрастающей зависимостью современных организаций от экспертных оценок при одновременной недостаточной изученности методов нейтрализации когнитивных искажений в экспертной деятельности. Как показывают исследования, до 80% экспертов демонстрируют склонность к подтверждающему искажению (confirmation bias), сознательно или бессознательно отбирая только информацию, подтверждающую их первоначальную гипотезу.

Теоретической основой исследования выступили фундаментальные работы в области когнитивной психологии (Д. Канеман, А. Тверски, Д. Ариели) [6], системного анализа и теории принятия решений. Особый вклад в разработку методологии экспертных оценок внесли отечественные исследователи (В.А. Бажанов, Э.Р. Кашапова, Л.А. Боброва) [4, 5], разработавшие классификации когнитивных искажений и методы их диагностики.

Цель исследования – разработка и апробация комплекса методов оптимизации экспертных оценок, направленных на минимизацию влияния когнитивных искажений на всех этапах экспертной деятельности.

Материалы и методы

Исследование проводилось в период с 2023 по 2025 год и включало несколько этапов:

1. **Теоретический анализ** – систематизация когнитивных искажений, наиболее релевантных для экспертной деятельности, на основе научной литературы и мета-анализа существующих исследований.

2. **Эмпирическое исследование** – проведение серии экспериментов с участием 85 экспертов из различных профессиональных сфер (академическая среда, IT-индустрия, управленческий консалтинг). Для диагностики когнитивных искажений использовался специализированный инструментарий, включающий [7]:

- анкеты для выявления индивидуальных склонностей к конкретным типам искажений;
- кейсы, моделирующие типичные экспертные ситуации;
- тесты на определение выраженности эффектов ореола, якорения и сверхуверенности.

3. **Разработка и апробация методов оптимизации** – создание и тестирование алгоритмов коррекции экспертных оценок с последующей оценкой их эффективности.

4. **Статистический анализ** – обработка данных с применением методов математической статистики (корреляционный и регрессионный анализ), реализованных в среде MATLAB с использованием Optimization Toolbox и Curve Fitting Toolbox [2, 3].

Основные результаты исследования

Классификация когнитивных искажений в экспертной деятельности

На основе теоретического анализа и эмпирических данных разработана классификация когнитивных искажений, наиболее значительно влияющих на экспертные оценки (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация когнитивных искажений в экспертной деятельности

Тип искажения	Сущность	Проявление в экспертной деятельности
Эффект подтверждения	Тенденция искать и интерпретировать информацию, подтверждающую существующие убеждения	Игнорирование альтернативных вариантов решений, отбор только подтверждающих данных
Эффект ореола	Влияние общего впечатления о человеке/объекте на оценку их конкретных качеств	Перенос положительной/отрицательной характеристики эксперта на оценку его профессиональных качеств
Сверхуверенность	Переоценка точности своих знаний и прогнозов	Завышение точности экспертных оценок, недооценка рисков и неопределенности
Эффект якорения	Склонность сильно полагаться на первую полученную информацию	Влияние первоначальных данных на последующие оценки и суждения

Наиболее распространенными в экспертной деятельности оказались эффект подтверждения (выявлен у 78% экспертов) и сверхуверенность (обнаружена у 72% участников исследования). Эффект якорения проявился у 65% экспертов, преимущественно в ситуациях с высокой неопределенностью и дефицитом времени.

Влияние когнитивных искажений на точность экспертных оценок

Эмпирическое исследование выявило существенное влияние когнитивных искажений на точность экспертных оценок. У экспертов с выраженной сверхуверенностью погрешность оценок превышала среднестатистические показатели на 25-30%. Наличие эффекта подтверждения снижало точность прогнозов на 15-20% за счет игнорирования альтернативных сценариев и противоречащей информации (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние когнитивных искажений на точность экспертных оценок

Тип искажения	Средняя погрешность оценок	Увеличение погрешности относительно контрольной группы
Контрольная группа (без выраженных искажений)	12,3%	-
Эффект подтверждения	28,7%	+16,4%
Сверхуверенность	34,5%	+22,2%
Эффект якорения	24,8%	+12,5%
Комбинация 2+ искажений	41,2%	+28,9%

Наибольшее негативное влияние наблюдалось при комбинации нескольких типов искажений, что приводило к кумулятивному эффекту и увеличению погрешности экспертных оценок до 40% и более.

Методы оптимизации экспертных оценок

На основе выявленных закономерностей разработан комплекс методов оптимизации экспертных оценок, включающий:

1. Алгоритмы дебиазинга индивидуальных оценок:
 - метод динамической калибровки уверенности – коррекция самооценки эксперта на основе сравнения заявленной точности с фактической погрешностью;
 - когнитивное профилирование – выявление индивидуальных склонностей к конкретным типам искажений и разработка персонализированных корректирующих процедур;
 - структурированные чек-листы – системы проверки гипотез и аргументов на предмет предвзятости.
2. Модифицированные методы групповой экспертной работы:
 - многоуровневый метод Дельфи с анонимными этапами критики - позволяет нивелировать эффекты группомыслия и конформизма;
 - алгоритм взвешенной агрегации мнений – учет когнитивных профилей экспертов при формировании групповой оценки;
 - техника «адвоката дьявола» – назначение специального участника, задачей которого является целенаправленный поиск слабых мест в предлагаемых решениях.
3. Программный модуль поддержки экспертных решений:
 - интеграция алгоритмов дебиазинга в системы поддержки принятия решений;
 - визуализация степени согласованности/конфликта мнений;
 - автоматизированный расчет взвешенных групповых решений с поправкой на когнитивные профили экспертов.

Анализ результатов

Результаты исследования подтвердили значительное влияние когнитивных искажений на точность экспертных оценок, что согласуется с данными других исследователей в области когнитивной психологии и теории принятия решений. Выявленная распространенность эффекта подтверждения и сверхуверенности среди экспертов (78% и 72% соответственно) свидетельствует о необходимости системного подхода к минимизации когнитивных искажений в профессиональной деятельности.

Предложенные методы оптимизации показали высокую эффективность в ходе апробации в образовательной среде (РТУ МИРЭА). Внедрение алгоритмов дебиазинга и модифицированных методов групповой работы позволило повысить точность экспертных оценок на 15-20% и увеличить согласованность групповых мнений на 25% по сравнению с традиционными методами экспертной оценки.

Особого внимания заслуживает разработка программного модуля поддержки экспертных решений, который обеспечивает интеграцию методов коррекции когнитивных искажений в процесс принятия решений. Данный подход согла-

суется с современными тенденциями в области искусственного интеллекта и когнитивных наук, где все большее внимание уделяется гибридным системам, сочетающим человеческий экспертный и вычислительные возможности машин.

Ограничением исследования является относительно небольшая выборка экспертов (85 человек), что не позволяет экстраполировать результаты на все профессиональные сферы без дополнительных исследований. Также требует дальнейшей разработки вопрос учета отраслевой специфики при коррекции когнитивных искажений.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило значительное влияние когнитивных искажений на точность и надежность экспертных оценок. Разработанный комплекс методов оптимизации, включающий алгоритмы дебиазинга индивидуальных оценок и модифицированные методы групповой работы, показал высокую эффективность в ходе апробации.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии методологии системного анализа и обработки экспертной информации за счет:

- уточнения классификации когнитивных искажений применительно к экспертной деятельности;
- разработки формальных моделей влияния искажений на процесс принятия экспертных решений;
- расширения аппарата теории принятия решений за счет алгоритмов коррекции систематических ошибок.

Практическая значимость работы подтверждена внедрением разработанных методов и программного модуля в учебный и экспертный процесс в РТУ МИРЭА, что позволило повысить точность экспертных оценок на 15-20%.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой отраслевых моделей коррекции когнитивных искажений, а также интеграцией методов дебиазинга в системы искусственного интеллекта для создания гибридных систем поддержки принятия решений.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю, доктору технических наук, профессору Владимиру Михайловичу Артюшенко за ценные замечания и методическую помощь в проведении исследования.

Литература

1. Андруник А.П. Конфликтология: учебное пособие. Пермь: ПНИПУ. 2013. 250 с.
2. Артюшенко В.М., Акимкина Э. Имитационная модель адаптивной системы поддержки принятия решений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 2(164). С. 46-56.
3. Артюшенко В.М., Попова Е.С. Анализ работы машинного обучения искусственного интеллекта при реализации информационного поиска в больших объемах данных // Информационно-технологический вестник. 2024. № 2(40). С. 3-13.

4. Боброва Л.А. Когнитивные искажения // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Сер. 3. Философия. 2021. № 2. С. 69-79.
5. Боброва Любовь Алексеевна КОГНИТИВНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Сер. 3. Философия: Реферативный журнал. 2021. № 2.
6. Канеман Д., Словик П., Тверски А. Принятие решений в неопределенности: правила и предубеждения. Харьков: Гуманитарный центр, 2005. 632 с.
7. Мосолов А.С. Компьютерные технологии и методы проектирования в сфере безопасности: Учебник для вузов / А.С. Мосолов, Н.И. Акинин. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 444 с.

УДК 621.38.019.3

**Методика пошагового прогнозирования состояния
сложных технических объектов**

Екатерина Сергеевна Попова, специалист
по учебно-методической работе учебного отдела,
Александр Валерьевич Нефедов, ведущий программист
отдела информационно технического и сетевого обеспечения,
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова» –
филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии»,
г. Королев, Московская область

Предложена модифицированная методика краткосрочного пошагового прогнозирования состояния сложных технических объектов (СТО), позволяющая моделировать процесс определения допустимого предела эксплуатации. Методика использует параболическую аппроксимацию и метод наименьших квадратов с расчетом доверительных интервалов, что существенно снижает погрешности и повышает точность прогноза. Алгоритм может быть интегрирован в системы искусственного интеллекта для предиктивного обслуживания, оптимизации эксплуатации и упреждения деградационных отказов, что особенно актуально для повышения надежности и безопасности ответственных систем.

Деградационный отказ, допустимый предел эксплуатации, упреждение отказов.

A step-by-step method for predicting the state of complex technical objects

Ekaterina Sergeevna Popova, Specialist for Educational and Methodological Work,
Alexander Valeryevich Nefedov, Lead Programmer, Department of Information,
Technical and Network Support,
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union
pilot-cosmonaut A.A. Leonov» –
Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow State University of Geodesy and Cartography», Korolev, Moscow region

A modified methodology for short-term step-by-step forecasting of the state of complex technical objects (CTOs) is proposed, enabling the modeling of the allowable operating limit determination. The methodology employs parabolic approximation and the least squares method with confidence interval calculation, significantly reducing errors and enhancing prediction accuracy. The algorithm can be integrated into artificial intelligence systems for predictive maintenance, operational optimization, and degradation failure prevention, which is particularly relevant for improving the reliability and safety of critical systems.

Degradation failure, allowable operating limit, failure prevention.

Введение. Как известно, качество технических объектов, формируемое при проектировании и изготовлении, в дальнейшем, уже в процессе эксплуатации, будет зависеть только от их состояния [4], которое определяется деградацией свойств сложных технических объектов (СТО) и условиями эксплуатации (например, температурой, вибрацией, наличием смазки и т.д.). Так как нельзя одновременно учесть все физико-технические свойства таких объектов, необходимо перейти к обобщенным показателям состояния, представляющим эти свойства. Соответственно обеспечение безотказности СТО можно свести к слежению за изменениями показателей состояния и установления степени их приближения к допустимому пределу эксплуатации [1]. В соответствии с этим рассмотрим модель установления допустимого предела эксплуатации СТО.

В условиях постоянного усложнения технических систем и повышения требований к их надежности и безопасности, проблема управления их жизненным циклом становится критически важной. Отказы сложных технических объектов могут приводить не только к значительным экономическим потерям, связанным с простоями и дорогостоящими ремонтами, но и к катастрофическим последствиям, угрожающим жизни и здоровью людей, а также окружающей среде. Традиционные подходы к техническому обслуживанию, такие как планово-предупредительные ремонты, часто являются неоптимальными, поскольку они не учитывают реальное состояние объекта и могут приводить либо к преждевременной замене еще работоспособных компонентов, либо, наоборот, к возникновению внезапных отказов между плановыми интервалами. Поэтому все большая актуальность приобретает концепция обслуживания по состоянию (Condition-Based Maintenance, CBM) и предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance, PdM), основанная на непрерывном мониторинге и прогнозировании остаточного ресурса объектов. Ключевым элементом этих подходов является точное определение момента, когда показатели состояния объекта приближаются к критическим значениям, то есть к допустимому пределу эксплуатации. Это позволяет своевременно принимать решения о проведении ремонтных работ или корректировке режимов эксплуатации, тем самым предотвращая деградационные отказы и максимизируя полезный ресурс СТО.

Установление допустимого предела эксплуатации СТО. Как известно, с момента поступления СТО в эксплуатацию до его утилизации показатель состояния этих систем F в силу деградации свойств сначала медленно, а затем резко или возрастает (например, зазор в соединении двух деталей), или убывает (например, толщина защитного слоя). При описании таких изменений необходимо регистрировать опорное значение F_0 , установленное при завершении производства СТО или после их капитального ремонта, и затем – текущее значение F . Эти значения со временем могут выйти за предел $F_{\text{пред}}$, что соответствует деградационному отказу СТО.

На практике большой интерес представляет не F и F_0 , а разность этих значений, то есть $f = |F - F_0|$, поскольку в данном случае наблюдается только рост значения показателя состояния (рисунок 1).

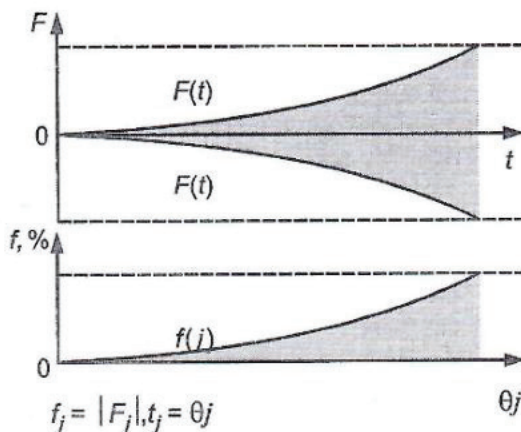


Рисунок 1 – Исходная информация о состоянии изделия

На начальном этапе эксплуатации СТО зависимость изменяется лишь в диапазоне погрешности измерения. Соответственно $|f_j - f_{j+1}| = \varepsilon$, причем погрешность измерения ε в данном случае определяется лишь погрешностью измерительной системы и практически не связана с деградационным процессом, поэтому можно считать $\varepsilon = 0$. При дальнейшей же эксплуатации СТО, когда рост деградационных процессов подчиняется линейному закону, может оказаться, что $|f_j - f_{j+1}| < \varepsilon$, где $\varepsilon = \text{const}$. На заключительном этапе эксплуатации, когда $|f_j - f_{j+1}| > \varepsilon$ и $\varepsilon \neq \text{const}$, функция $f(t)$ нелинейна. Из анализа результатов эксперимента следует, что аппроксимацией деградационного процесса может служить функция полиномиального вида, представляемая многочленом [2]: $f(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_n t^n$. Для описания деградационных процессов данного вида можно использовать два подхода. Первый – интерполяция зависимости с помощью сплайн-функции при нефиксированном объеме выборки с рекуррентным учетом всей предыстории элементов [3], второй – регрессивный анализ зависимости $f(t)$ с помощью метода наименьших квадратов при фиксированном объеме выборки элементов [3]. Так как при получении исходных данных всегда неизбежны погрешности измерения, остановимся на последнем подходе.

Ограничимся здесь параболическим сплайном, обеспечивающим достаточно высокую степень приближения к реальному процессу и позволяющим избежать ухудшения точности вычислений из-за осцилляции полиномов высоких степеней: $f_j(t) = A_j t_j^2 + B_j t_j + C_j$, где A_j, B_j, C_j – коэффициенты уравнения для текущего цикла; t_j – текущее время, которое можно представить в виде $t_j = \theta j$ (j – номер фиксируемого значения f_j , а θ – период измерений). Предельному значению $f_{\text{пред}}$ (устанавливается разработчиком) отвечает время предельной отработки ресурса $t_{\text{пред}}$ ($t_{\text{пред}} = \theta j_{\text{пред}}$). При этом особую важность имеет допустимый предел времени t_0 ($t_0 = t_{\text{пред}} - \theta$), которому соответствует допустимый предел f_0 (рисунок 2).

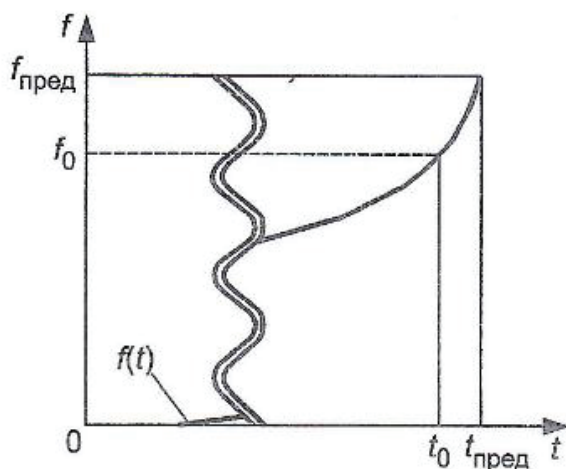


Рисунок 2 – Схема определения допустимого предела эксплуатации СТО

Чтобы обеспечить необходимую точность прогнозирования состояния СТО, период прогнозирования выбирают достаточно малым ($\theta \ll t_{\text{пред}}$). Диапазон времени, отвечающий значению θ , не должен превышать максимально допустимое время, в котором вероятность отказа существенно ниже вероятности отказа, предусмотренной техническими условиями на объект. Однако в реальных условиях эксплуатации СТО экспертное устанавливаемое значение θ , как правило, меньше расчетного, поэтому обычно в решении практических задач используют экспертные значения θ . В качестве θ может служить период между взлетом и посадкой самолета или между включением и отключением энергосистемы машинного агрегата, а также другие варианты.

Более детально рассмотрим концепцию обобщенных показателей состояния. Вместо мониторинга множества индивидуальных физико-технических параметров (например, химического состава, твердости, микротрещин), которые могут быть сложны для непрерывной оценки, предлагается использовать один или несколько агрегированных показателей. Эти показатели должны интегрально отражать совокупность деградационных процессов и быть легко измеряемыми. Например, для подшипников это может быть уровень вибрации или температура, для защитных покрытий – их толщина, для изоляции – сопротивление. Основная идея заключается в том, что по мере эксплуатации СТО, один или несколько из этих обобщенных показателей начинают монотонно изменяться, приближаясь к некоторому критическому значению. Важно отметить, что выбор таких показателей является ключевым этапом и должен основываться на глубоком понимании физики отказов конкретного объекта.

Деградационные процессы могут проявляться по-разному. В начальной фазе эксплуатации (период приработки) наблюдается быстрая стабилизация параметров или небольшое их изменение. Далее следует фаза нормальной эксплуатации, где изменения показателей происходят медленно и предсказуемо. Наконец, в конце жизненного цикла начинается фаза ускоренной деградации, где изменение

параметров становится нелинейным и быстрым, что непосредственно предшествует отказу. Описываемая в статье функция как раз призвана уловить эти фазы. Разность позволяет сфокусироваться исключительно на изменении состояния, абстрагируясь от начальных опорных значений, что упрощает моделирование и делает его более универсальным.

Выбор параболического сплайна для аппроксимации деградиационного процесса не случаен. В то время как полиномы высоких степеней могут обеспечить очень точную интерполяцию для большого количества точек, они часто страдают от проблемы осцилляции (эффект Рунге), что приводит к нестабильности прогнозов за пределами интервала измерений. Параболический сплайн (полином второй степени) является компромиссом между точностью и стабильностью. Он достаточно гибок, чтобы адекватно описать как линейные, так и нелинейные участки деградиационной кривой, но при этом минимизирует риски нежелательных колебаний. Это особенно важно для краткосрочного прогнозирования, где стабильность экстраполяции имеет первостепенное значение.

Допустимый предел эксплуатации – это пороговое значение показателя состояния, устанавливаемое разработчиком объекта или эксплуатирующей организацией, достижение которого означает, что дальнейшая эксплуатация объекта несет неприемлемый риск отказа. Часто это значение выбирается с запасом относительно абсолютного физического предела отказа. Соответственно, допустимый предел времени – это прогнозируемый момент, когда показатель состояния достигнет. Цель данной методики – не только определить этот предел, но и предсказать его с достаточной заблаговременностью, чтобы можно было принять упреждающие меры. Малый период прогнозирования критичен для обеспечения высокой точности. Например, для авиационной техники может быть временем одного полетного цикла, для энергетического оборудования – интервалом между плановыми проверками. Экспертное установление ниже расчетного является важным аспектом безопасности, поскольку оно учитывает неопределенности и потенциальные неучтенные факторы, тем самым создавая дополнительный запас прочности.

Принципиальная схема слежения за состоянием СТО (рисунок 3) включает измерительный блок, согласующее устройство, блок ввода информации и принятия решения, исполнительный блок.

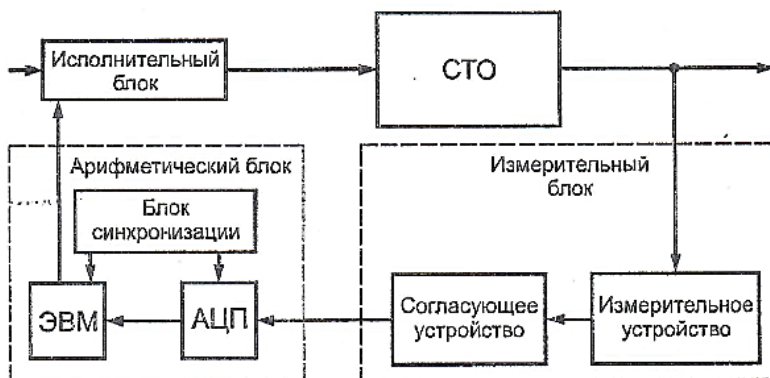


Рисунок 3 – Схема устройства слежения за приближением состояния СТО к допустимому пределу

Схема работает следующим образом. Измерения показателя системы с датчика поступают через согласующее устройство для оцифровки на АЦП, а затем нормируются. Полученные значения функции f выражаются в процентах или баллах, что обеспечивает универсальность описания зависимости $f(t)$ для разнообразных СТО. С АЦП измеряемые показатели поступают на вход ЭВМ для последующей обработки и принятия решения. Чтобы запустить программу для реализации краткосрочного пошагового прогнозирования, первый измерительный блок $\{f_{j-k}, \dots, f_j\}$ с числом отсчетов в нем $k = 3$ фиксируют непосредственно в ходе эксперимента с шагом θ . С поступлением новых отсчетов размер обрабатываемого блока увеличивается. С учетом результатов, полученных на модели процесса, приняли оптимальный максимальный размер блока равным 25 отсчетам.

Рассмотрим более подробно функциональное назначение каждого блока в схеме слежения.

Измерительный блок: Это совокупность сенсоров и датчиков, предназначенных для непрерывного или периодического измерения выбранного обобщенного показателя состояния СТО. Например, это могут быть акселерометры для измерения вибрации, термопары для температуры, ультразвуковые датчики для толщины материала, тензодатчики для деформации и т.д. Выбор типа датчика определяется физикой деградационного процесса и требованиями к точности и частоте измерений.

Согласующее устройство: Поскольку сигналы от датчиков могут быть аналоговыми, иметь низкий уровень напряжения, или быть подвержены шумам, необходимо устройство для их подготовки. Согласующее устройство выполняет функции усиления, фильтрации, гальванической развязки и масштабирования сигнала, приводя его к виду, пригодному для дальнейшей цифровой обработки.

Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП): Это критически важный компонент, который преобразует аналоговый сигнал с согласующего устройства в цифровой формат, понятный для вычислительной техники (ЭВМ). Количество разрядов АЦП и частота дискретизации определяют точность и временное разрешение получаемых данных. После оцифровки данные нормируются, то есть приводятся к безразмерной шкале (например, от 0% до 100% или в баллах), где 0% соответствует идеальному состоянию, а 100% – допустимому пределу эксплуатации. Такая нормировка делает методику универсальной и применимой к различным типам СТО и разнообразным показателям состояния.

Блок ввода информации и принятия решения (ЭВМ): Это центральный вычислительный узел системы. Сюда поступают нормированные цифровые данные. ЭВМ реализует алгоритм краткосрочного пошагового прогнозирования, рассчитывает коэффициенты аппроксимирующего полинома, строит прогнозные кривые, определяет доверительные интервалы и, самое главное, сравнивает прогнозируемое состояние с допустимым пределом. На основе этих расчетов принимается решение о дальнейшей эксплуатации объекта.

Исполнительный блок: в случае, если ЭВМ принимает решение о приближении к критическому состоянию, например, исполнительный блок генерирует соответствующую команду. Это может быть визуальное или звуковое оповещение оператора, автоматическое изменение режима работы СТО (например, снижение

скорости, мощности), блокировка объекта, или команда на запуск процедуры технического обслуживания.

Оптимальный максимальный размер блока в 25 отсчетов, упомянутый в статье, является результатом экспериментальных исследований и компромиссом. Слишком малый блок данных (например, 3-5 отсчетов) может быть недостаточно репрезентативным для точного построения полинома и чувствительным к случайным погрешностям измерения. С другой стороны, слишком большой блок (например, 100 и более отсчетов) увеличивает вычислительную сложность и может «сглаживать» актуальные изменения в деградиационном процессе, замедляя реакцию системы на резкое ухудшение состояния. Размер в 25 отсчетов, как показали исследования, обеспечивает достаточную статистическую значимость для аппроксимации параболой и при этом сохраняет чувствительность к динамике процесса, позволяя эффективно отслеживать как медленные, так и ускоряющиеся фазы деградации.

Алгоритм решения задачи работает следующим образом. С момента регистрации значения f_j появляется команда на прогнозирование значения $f(t + \theta)$. Для идентификации и экстраполяции зависимости $f(t)$ необходимо определить коэффициенты параболы A, B, C . Для того чтобы представление функции $f(t)$ имело наименьшую среднюю квадратическую погрешность, для обработки данных измерений воспользуемся методом наименьших квадратов. Имеются вектор с данными измерений $\mathbf{t}\{t_{j-k}, \dots, t_j\}$ из k элементов, отстоящих друг от друга на период измерений θ , вектор \mathbf{f} (также из k элементов) значений функции $f(t)$ в точках t . Требуется найти вектор $\mathbf{p} = \{A_j, B_j, C_j\}$ коэффициентов аппроксимирующего полинома степени $n = 2$. Построим матрицу Вандермонда размерностью $(k \times (n + 1))$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} t_0^n & \dots & \dots & t_0^2 & t_0 & 1 \\ t_1^n & \dots & \dots & t_1^2 & t_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_k^n & \dots & \dots & t_k^2 & t_k & 1 \end{pmatrix}.$$

Чтобы найти коэффициенты, определяющие вектор \mathbf{p} , необходимо решить систему линейных уравнений $\mathbf{Vp} = \mathbf{f}$. Для решения такой системы было предложено использовать метод Гаусса, применение которого позволяет избежать больших вычислительных затрат и ухудшения точности вычислений, связанных с обращением матриц. Кроме того, для последующего нахождения доверительных интервалов прогноза необходимо произвести разложение матрицы Вандермонда, а также определить степень свободы d и норму невязки n_r . Ортогональное треугольное разложение (\mathbf{QR}) матрицы Вандермонда ищется в виде произведения унитарной матрицы \mathbf{Q} и верхней треугольной матрицы \mathbf{R} , так что $\mathbf{V} = \mathbf{QR}$. Описание алгоритма такого разложения можно найти в [3]. Степень свободы d определяется как $d = k - (n + 1)$, где k – длина вектора \mathbf{f} значений функции, n – степень аппроксимирующего полинома, а норма вектора невязки $\mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{Vp}$ – как $n_r =$

$$(\sum_{i=1}^k |r_i^2|)^{1/2}.$$

Чтобы получить коэффициенты аппроксимирующего полинома $\mathbf{p} = \{A_j, B_j, C_j\}$, необходимо рассчитать прогнозируемые значения функции и доверительные интервалы таких прогнозов. Прогнозируемые значения функции $\hat{f}(t_j + \theta)$ в момент времени $t_j + \theta$ вычисляются по формуле $\hat{f}(t_j + \theta) = A_j(t_j + \theta)^2 + B_j(t_j + \theta) + C_j$.

Для определения доверительного интервала строится матрица Вандермонда \mathbf{V}_p размерностью $(k_p \times (n + 1))$ для вектора точек t из k_p элементов, для которых был осуществлен расчет прогнозируемых значений функции. Из системы линейных уравнений $\mathbf{R}^T \mathbf{E}^T = \mathbf{V}_p^T$ необходимо найти матрицу \mathbf{E} размерностью $(k_p \times (n + 1))$: $e_j = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^k E_{ij}^2}$, $j = 1, \dots, n$. Тогда вектор доверительных интервалов δ рассчитывается по следующей формуле $\delta = n_r e t_s / \sqrt{d}$, где t_s – доверительная граница распределения Стьюдента с d степенями свободы, соответствующая уровню значимости s .

В том случае, когда прогнозируемое значение $\hat{f}(t_j + \theta) + \delta < f_{\text{пред}}$, система получает команду к экспериментальному определению $f(t_j + \theta)$. Если $f(t_j + \theta) < f_{\text{пред}}$, цикл повторяется. Процедура переходов от цикла к циклу продолжается до тех пор, пока не окажется что или $\hat{f}(t_j + \theta) + \delta > f_{\text{пред}}$, или $f(t_j + \theta) > f_{\text{пред}}$. Если выполняется условие $\hat{f}(t_j + \theta) + \delta > f_{\text{пред}}$ или $(t_j + \theta) > t_{\text{пред}}$, на исполнительное устройство выдается команда «эксплуатацию объекта приостановить». Таким образом, эксплуатация объекта будет прекращена за шаг до того, как показатель состояния достигнет значения 100%. При этом получаемые на каждом шаге значения интервалов неопределенности позволяют определить временной интервал, в который с большой вероятностью попадает значение $t_{\text{пред}}$ (рисунк 4).

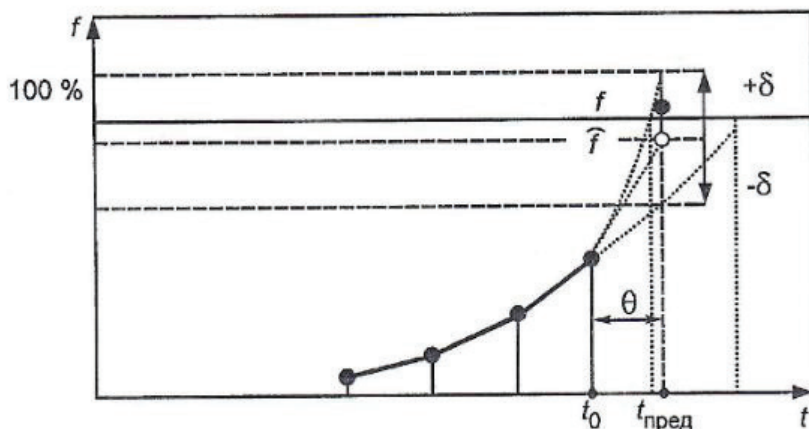


Рисунок 4 – Определение значений доверительного интервала

Использование доверительных интервалов прогноза позволяет также скомпенсировать влияние погрешности измерения и погрешности, связанной с выбором неоптимального значения шага измерения. Работа при таких условиях приведет к тому, что значение допустимого предела эксплуатации, определенное алгоритмом, будет несколько меньшим, чем при работе в оптимальных условиях.

В каждом цикле, по мере отработки объектом ресурса, оценивают степень приближения \hat{f} к $f_{\text{пред}}$ или f_j к $f_{\text{пред}}$, рассчитывая одновременно значения $t_{\text{пред}}$ (момент времени, когда $f = \hat{f}_{\text{пред}}$, то есть показатель степени достигает критического значения):
$$t_{\text{пред}} = \frac{-B_j + \sqrt{B_j^2 - 2A_j(C_j - f_{\text{пред}})}}{2A_j}.$$

Чтобы определить прогнозируемое время прекращения эксплуатации t_{0j} , необходимо учесть дискретность измерений, для этого следует округлить до ближайшего меньшего целое частное t_0/θ , затем умножить его на θ . Также необходимо определить доверительные интервалы такого прогноза по времени. Для этого находят доверительные интервалы $\pm\delta$ прогноза значений функции в точке t_{0j} и соответствующие значениям функции $f_{0j} \pm \delta$ значения $f_{0п}$ и $t_{0п}$. Обобщенная методика краткосрочного пошагового прогнозирования состояния СТО с коррекцией результатов по каждому шагу позволяет оценить степень приближения состояния СТО к допустимому пределу эксплуатации и тем самым предупредить возможность деградационных отказов. При этом проведена модернизация методики связанная, с применением доверительных интервалов прогноза и метода наименьших квадратов, что позволяет на порядок снизить погрешности, возникающие в ходе эксперимента.

Метод наименьших квадратов (МНК) является классическим и наиболее распространенным подходом для аппроксимации функций по эмпирическим данным, особенно в условиях наличия случайных ошибок измерений. Его основное преимущество заключается в том, что он минимизирует сумму квадратов отклонений между наблюдаемыми значениями и значениями, предсказанными аппроксимирующей функцией. Это обеспечивает «наилучшее» приближение в среднем квадратическом смысле. В нашем случае, где – наблюдаемые значения показателя состояния, а – значения, предсказанные параболой, МНК позволяет определить коэффициенты, таким образом, чтобы парабола максимально точно описывала тренд деградации.

Для решения системы линейных уравнений для вектора коэффициентов, применение метода Гаусса (или методов его модификации, например, метода Гаусса-Жордана) является обоснованным выбором. Этот метод отличается вычислительной эффективностью и стабильностью при работе с хорошо обусловленными матрицами, в отличие от прямого обращения матрицы, которое может быть чувствительно к числовым погрешностям, особенно для больших матриц или плохо обусловленных систем. Метод Гаусса последовательно преобразует систему уравнений к треугольному виду, после чего решение легко находится обратной подстановкой.

Ортогональное треугольное разложение матрицы Вандермонда, где – унитарная матрица, а – верхняя треугольная, является важным шагом для анализа статистических свойств регрессионной модели. В частности, оно используется для

расчета ковариационной матрицы оценок коэффициентов, что, в свою очередь, необходимо для построения доверительных интервалов прогноза. Степень свободы отражает количество «независимых» наблюдений, оставшихся после оценки параметров модели. Для полинома степени n и наблюдений, показывает, сколько информации остается для оценки случайной ошибки. Норма невязки является мерой того, насколько хорошо модель подходит к данным; чем меньше норма невязки, тем точнее аппроксимация.

Расчет доверительных интервалов прогноза является краеугольным камнем предложенной методики. В реальных условиях эксплуатации всегда присутствует неопределенность, связанная с погрешностью измерений, флуктуациями параметров среды и стохастическим характером деградационных процессов. Прогноз одного лишь точечного значения не дает полной картины. Доверительный интервал предоставляет диапазон, в котором с заданной вероятностью (например, 95% или 99%, соответствующей уровню значимости) будет находиться истинное значение показателя состояния в прогнозируемый момент времени. Это позволяет принимать более обоснованные и безопасные решения, поскольку учитывается не только наиболее вероятный сценарий, но и возможные отклонения.

Например, если точечный прогноз показывает, что до допустимого предела осталось 5 шагов, но нижняя граница доверительного интервала приближается к пределу уже через 3 шага, система должна сигнализировать о необходимости действия через 3 шага, чтобы обеспечить требуемый уровень надежности. Это консервативный, но безопасный подход, который компенсирует неизбежные погрешности и неопределенности. Рисунок 4 наглядно демонстрирует, как доверительные интервалы расширяются с увеличением горизонта прогнозирования, что отражает возрастающую неопределенность.

Алгоритм постоянно сравнивает текущее прогнозируемое значение и его доверительные интервалы с допустимым пределом.

1. Если, это означает, что показатель состояния еще далек от критического значения. Система может запросить дополнительное экспериментальное определение в следующем цикле или продолжить мониторинг.

2. Если (что соответствует верхней границе доверительного интервала), это служит предупреждением. Объект еще не достиг критического состояния, но существует значительная вероятность того, что он приблизится к нему в ближайшее время. На этом этапе могут быть рекомендованы усиленный мониторинг, предварительная подготовка к обслуживанию или снижение нагрузки на объект.

3. Если (точечное значение достигло предела) или, что более важно для упреждения, (верхняя граница доверительного интервала достигла предела), это является сигналом к немедленным действиям. Команда «эксплуатацию объекта приостановить» выдается для предотвращения отказа. Такая логика позволяет прекратить эксплуатацию объекта за один или несколько шагов до того, как его состояние достигнет 100%, обеспечивая необходимый запас времени для безопасного вывода объекта из работы или проведения ремонтных мероприятий.

Эта модифицированная методика, с учетом доверительных интервалов и МНК, значительно повышает точность и надежность прогнозирования. Она пре-

вращает систему мониторинга из простого регистратора состояния в мощный инструмент для предиктивной аналитики, способный предупреждать отказы и оптимизировать управление ресурсом СТО.

Интеграция алгоритма в системы искусственного интеллекта. В условиях развития концепций Индустрии 4.0 (трансформация производственных процессов через интеграцию цифровых технологий, сенсоров, искусственного интеллекта и интернета вещей) и создания «умных» производств, предложенный алгоритм пошагового прогнозирования деградации СТО приобретает особую ценность в качестве фундаментального компонента для систем искусственного интеллекта (ИИ) [2]. ИИ-системы, ориентированные на предиктивное обслуживание (Predictive Maintenance, PdM) и автономное управление, могут использовать выходные данные этого алгоритма для принятия сложных, многокритериальных решений [5, 6].

Рассмотрим несколько ключевых аспектов интеграции:

1. **Интеллектуальное ядро для предиктивного обслуживания (PdM):** Алгоритм служит «мозгом», который непрерывно оценивает остаточный ресурс объекта. Системы ИИ могут использовать эту информацию для:
 - **Оптимизации графиков технического обслуживания:** Вместо фиксированных интервалов, ИИ может динамически планировать обслуживание, когда алгоритм прогнозирует приближение к допустимому пределу. Это позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию «по состоянию», сокращая издержки на ненужные ремонты и максимизируя полезное время работы оборудования.
 - **Автоматического формирования запросов на запчасти:** Как только алгоритм прогнозирует критическое состояние в определенный момент времени, ИИ может автоматически формировать заявки на закупку или подготовку необходимых запасных частей, сокращая время простоя при ремонте.
 - **Управления рабочими нагрузками:** ИИ может анализировать прогнозы для нескольких СТО и перераспределять нагрузку, если один из объектов находится под угрозой деградационного отказа, тем самым продлевая его ресурс или предотвращая отказ.
2. **Повышение безопасности и снижение рисков:** В критически важных системах (авиация, атомная энергетика, транспорт) предсказание деградационных отказов с высокой точностью и заблаговременностью является вопросом безопасности. ИИ-системы могут быть запрограммированы на активацию аварийных протоколов, автоматическое отключение оборудования или сигнализацию об экстренной ситуации, основываясь на прогнозах алгоритма. Это позволяет минимизировать риски катастрофических сбоев.
3. **Обучение и адаптация систем ИИ:** Данные, генерируемые алгоритмом (фактические значения показателей состояния, прогнозы, доверительные интервалы, моменты принятия решений), могут служить ценным набором для обучения других моделей машинного обучения.

- Например, ИИ может использовать эти исторические данные для выявления скрытых корреляций между различными деградиационными процессами или для построения более сложных ансамблевых моделей прогнозирования, которые учитывают не только сам процесс деградации, но и внешние факторы, влияющие на него (например, изменения окружающей среды, режимы эксплуатации).
 - ИИ может учиться на ошибках или успехах прошлых прогнозов, адаптируя параметры алгоритма или выбирая оптимальные стратегии реагирования.
4. **Развитие концепции «цифрового двойника»:** Алгоритм может быть интегрирован в цифровой двойник СТО. Цифровой двойник – это виртуальная копия физического объекта, которая обновляется в режиме реального времени на основе данных с датчиков. Интеграция алгоритма позволяет цифровому двойнику не только отражать текущее состояние, но и прогнозировать его будущее, а также моделировать различные сценарии эксплуатации и отказов. Это дает инженерам и операторам мощный инструмент для принятия решений, тестирования гипотез и оптимизации работы объекта без физического воздействия на него.
5. **Автономные системы:** В контексте полностью или частично автономных систем (например, беспилотные летательные аппараты, автономный транспорт, робототехнические комплексы), способность алгоритма к упреждающему обнаружению деградации позволяет ИИ самостоятельно принимать решения о возвращении на базу, смене маршрута или запросе технического обслуживания без вмешательства человека.

Таким образом, предложенный алгоритм является не просто средством мониторинга, а стратегическим элементом, который, будучи интегрированным в системы искусственного интеллекта, позволяет значительно повысить эффективность, надежность и безопасность эксплуатации сложных технических объектов в условиях современных высокотехнологичных производств и систем.

Заключение. Таким образом, предложена модифицированная обобщенная методика краткосрочного пошагового прогнозирования состояния СТО с коррекцией результатов по каждому шагу, позволяющая провести моделирование процесса установления допустимого предела эксплуатации подобных объектов. Расширена возможность использования аппаратуры с относительно низким классом точности.

Применение параболической аппроксимации и метода наименьших квадратов, в сочетании с расчетом доверительных интервалов, обеспечивает высокую точность прогнозирования деградации и позволяет эффективно управлять рисками. Одним из ключевых преимуществ методики является ее универсальность, достигаемая за счет нормирования показателей состояния, что позволяет применять ее к широкому кругу СТО различного назначения и с разнообразными физическими принципами деградации.

Особенно значимым является вклад данной методики в развитие систем предиктивного технического обслуживания и, в более широком смысле, в интеграцию в системы искусственного интеллекта. Она предоставляет ИИ-системам

необходимый инструментарий для глубокого понимания текущего и прогнозируемого состояния объектов, позволяя переходить от реактивного устранения отказов к проактивному управлению ресурсом. Это открывает перспективы для создания по-настоящему «умных» и автономных систем, способных самостоятельно принимать решения о планировании обслуживания, управлении нагрузкой и обеспечении безопасности, что является критически важным для современных высокотехнологичных производств. Возможность использования аппаратуры с относительно низким классом точности при этом значительно расширяет область практического применения методики, снижая барьеры для ее внедрения.

Литература

1. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безопасности сложных технических систем. М.: Логос, 2001. 206 с.
2. Артющенко В.М., Попова Е.С. Анализ работы машинного обучения искусственного интеллекта при реализации информационного поиска в больших объемах данных // Информационно-технологический вестник. 2024. № 2(40). С. 3-13.
3. Гмошинский В.Г. Практика прогнозирования. М.: Знание, 1972. 162 с.
4. Марчук И.Г., Образцов И.Ф., Седов Л.И. Научные основы прогрессивной техники и технологии. М.: Машиностроение, 1986. 376 с.
5. Попова Е.С., Нефедов А.В. Анализ работы модели машинного обучения искусственного интеллекта при реализации информационного поиска в большом объеме данных // Информационно-технологический вестник. 2024. № 3(41). С. 24-37.
6. Шульженко С.Н., Артющенко В.М. Системный анализ искусственных нейронных сетей: учебное пособие / под науч. ред. док. техн. наук, проф. С.Н. Шульженко. М.: Издательство «Научный консультант», 2024. 110 с.

УДК 004.032.26

Современные архитектуры нейронных сетей для распознавания объектов в видео потоках

Глеб Евгеньевич Горский, ассистент кафедры
«Компьютерные системы и сети»,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва

Статья посвящена анализу современных архитектур нейронных сетей, применяемых для решения задач обнаружения и распознавания объектов в видео-потоках. В работе рассматриваются ключевые этапы развития технологий в данной области, начиная от классических методов машинного обучения и заканчивая передовыми подходами глубокого обучения. В статье представлены результаты последних исследований, которые демонстрируют значительные улучшения в точности и скорости обработки. Материалы статьи могут быть полезны специалистам в области искусственного интеллекта и разработчикам систем компьютерного зрения.

Архитектуры нейронных сетей, обнаружение объектов, глубокое обучение, энергоэффективность.

Modern neural network architectures for object recognition in video streams

Gleb Evgenyevich Gorsky, assistant of the Department of Computer Systems and Networks,
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education of the
«Bauman Moscow State Technical University», Moscow

This article analyzes modern neural network architectures used for object detection and recognition in video streams. It examines key stages in the development of technologies in this field, from classical machine learning methods to advanced deep learning approaches. The article presents the results of recent studies that demonstrate significant improvements in accuracy and processing speed. The materials of the article may be useful for specialists in the field of artificial intelligence and developers of computer vision systems.

Neural network architectures, object detection, deep learning, energy efficiency.

Введение

Технологии компьютерного зрения на базе глубоких нейросетей активно применяются в системах видеонаблюдения, медицине и промышленной автоматизации. Во всех этих сценариях ключевую роль играет обнаружение и распознава-

ние объектов в видеопотоках. Для практического использования важны три критерия: точность, низкая задержка обработки кадров и умеренное энергопотребление.

Спрос на обработку видео в реальном времени постоянно растёт. Камеры наблюдения должны надёжно распознавать людей, транспорт и подозрительные предметы. В бортовых системах предотвращения столкновений требуется своевременное распознавание дорожных знаков, пешеходов и другие автомобили, обеспечивая безопасность в сжатых временных рамках. Эти требования неизбежно ведут к использованию сложных нейросетевых архитектур, способных эффективно обрабатывать большие объёмы данных.

Целью данной работы является анализ современных архитектур нейронных сетей, используемых для обнаружения объектов в видеопотоках. Теоретической основой исследования послужили работы российских и зарубежных ученых, а также современные научные публикации в области компьютерного зрения и глубокого обучения [1] [2]. Практическая значимость работы заключается в возможности применения описанных методов для разработки систем, требующих высокой производительности и низкой задержки. Например, методы, рассмотренные в статье, могут быть использованы для создания систем видеонаблюдения, беспилотных автомобилей и мобильных приложений с функциями компьютерного зрения.

Научная новизна данной работы состоит в первом для русскоязычной литературы сравнительном анализе метрики «точность на ватт» для детекторов CNN и Transformer на периферийном оборудовании. Экспериментальные данные демонстрируют преимущество модели RT-DETR-R50 по компромиссу скорость/точность относительно классических CNN детекторов [3].

Развитие архитектуры YOLO

Семейство YOLO рассматривается как одно из самых популярных решений для обнаружения объектов в режиме реального времени. С момента выпуска первой версии в 2015 году архитектура множество раз модернизировалась, что позволило ей занять передовые позиции в системах видеонаблюдения, беспилотных транспортных средствах и медицине. В статье [4] представлен подробный анализ эволюции архитектуры YOLO, начиная с YOLOv1 и заканчивая современными версиями, такими как YOLOv8, YOLO-NAS и YOLO с применением трансформеров. Всего в статье рассматриваются 16 итераций модели.

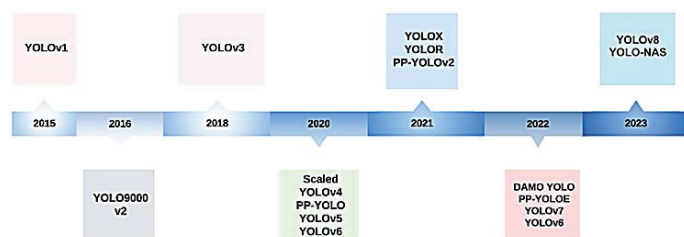


Рисунок 1 – Развитие архитектуры YOLO

На рисунке 1 представлена временная шкала, иллюстрирующая ключевые этапы развития архитектур YOLO. Каждая версия модели была направлена на по-

вышение точности, скорости и эффективности, что сделало YOLO одной из наиболее востребованных технологий для задач компьютерного зрения.

Первая версия YOLO представила революционный подход к распознаванию объектов, обрабатывая всё изображение за один проход через нейронную сеть. Вторая версия YOLO значительно улучшила точность за счёт введения anchor boxes (якорных рамок) и обучения на нескольких масштабах. YOLOv3 внедрила residual connections (остаточные связи) и предсказание на нескольких масштабах, что улучшило обнаружение небольших объектов. Архитектура Darknet-53, использованная в YOLOv3, стала более глубокой и эффективной, повысив общую производительность модели. Архитектура YOLOv4 использует CSPDarknet-53 в качестве базовой сети и PANet (Path Aggregation Network) для улучшения передачи признаков между слоями, что обеспечивает прирост точности при сохранении высокой скорости обработки. Реализация YOLOv5 в экосистеме PyTorch и наличие масштабируемых конфигураций (YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l) упрощают адаптацию к заданным ограничениям по вычислительным ресурсам и целевым метрикам. В YOLOv6 применена архитектура RepVGG, улучшающая производительность распознавания за счёт более эффективного использования вычислительных ресурсов. YOLOv7 опирается на E-ELAN и обновлённые стратегии масштабирования, демонстрируя более высокую точность по сравнению с предыдущими версиями при минимальном использовании вычислительной мощности. В YOLOv8 была внедрена архитектура без якорей, что упростило процесс обучения и повысило точность распознавания. Модель получила улучшенный блок CSPLayer, переименованный в C2f, что улучшает обработку маленьких объектов и лучше справляется с насыщенными сценами.

В работе [5] представлена новая версия YOLOv10, разработанная исследователями THU-MIG. Она демонстрирует передовые показатели производительности и эффективности благодаря использованию стратегий обучения с подавлением немаксимумов (non-maximum suppression, NMS) (рис. 2). Это позволяет значительно ускорить обработку данных без потери точности. Эксперименты показали, что YOLOv10-S в 1,8 раза быстрее RT-DETR-R18 при сопоставимой точности на наборе данных COCO. Кроме того, YOLOv10-B снижает задержку на 46% по сравнению с YOLOv9-C, что делает её одним из наиболее эффективных решений для задач обнаружения объектов в реальном времени.

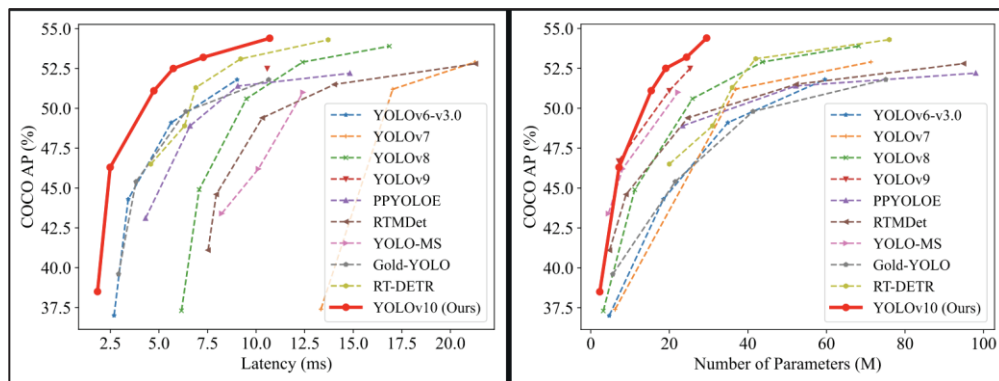


Рисунок 2 – Экспериментальное сравнение YOLOv10

Single Shot MultiBox Detector (SSD)

Работа [6] представляет метод обнаружения объектов с использованием единой глубокой нейронной сети. Основная идея SSD (Single Shot MultiBox Detector) заключается в дискретизации пространства вывода ограничивающих рамок в набор «стандартных рамок» (default boxes) с различными соотношениями сторон и масштабами. Экспериментальные результаты, описанные в данной статье [6], демонстрируют высокую конкурентоспособность метода SSD (Single Shot MultiBox Detector) в задачах обнаружения объектов. В отличие от подходов, требующих дополнительных этапов для генерации предложений по объектам, SSD показывает сопоставимую точность при значительно более высокой скорости обработки данных. Например, на тестовом наборе данных VOC2007 с разрешением входного изображения 300x300 модель SSD достигает средней точности (mAP) 74,3%, обрабатывая до 59 кадров в секунду (FPS) на графическом процессоре Nvidia Titan X. При увеличении разрешения входного изображения до 512x512 точность модели возрастает до 76,9% mAP, что превышает показатели модели Faster R-CNN.

Эти результаты подтверждают, что SSD способен обеспечивать высокую точность и скорость обнаружения объектов без необходимости использования сложных и ресурсоёмких процессов, таких как генерация сети предложений по регионам (Region Proposal Network, RPN) и последующая обработка предложений.

Современные подходы к распознаванию объектов

Современная практика обнаружения объектов опирается на два принципиально разных режима обучения. Первый – полное обучение модели «с нуля», когда сеть инициализируется случайно и осваивает задачу на большом, специально собранном корпусе изображений. Такой путь обеспечивает максимальную свободу в выборе архитектуры и, при достаточном объёме данных, даёт наивысшую точность, однако взамен требует существенных вычислительных ресурсов и времени. Второй режим – трансферное обучение, который предполагает использование предварительно обученной модели для решения новой задачи. Этот метод более экономичен по времени и ресурсам, поскольку модель уже обучена на большом наборе данных.

В семействе YOLO к базовым версиям постоянно добавляются специальные ответвления. Так, YOLO-NAS использует автоматический поиск архитектур (NAS): программа сама подбирает структуру сети, подходящую под ограничения оборудования или нужную метрику качества, поэтому инженеру не приходится вручную перебрать десятки вариантов. Есть и модификации YOLO, где к обычной свёрточной сети добавлены трансформерные слои самовнимания. Эти слои помогают учитывать связи между удалёнными участками изображения, поэтому модель увереннее находит объекты даже на перегруженных сценах.

Параллельно развиваются детекторы, которые вовсе обходятся без стадии non-maximum suppression (NMS). Один из самых быстрых – RT-DETR [3]. Благодаря гибриднему энкодеру и «запросам», учитывающим IoU, он обрабатывает 108 кадров в секунду при точности 53 mAP на изображениях 640 × 640, то есть более чем в двадцать раз быстрее Deformable-DETR при сопоставимом качестве. YOLO-World (CVPR 2024) [7] делает ещё один шаг вперёд: детектор объединён с языковой подсетью RepVL-PAN и обучен на 1,2 млн пар «изображение-текст». Итог –

35,4 AP на LVIS в режиме zero-shot при 52 FPS: модель без труда находит, например, огнетушитель, даже если такого класса не было в обучающих данных.

Таким образом, отрасль смещается от чисто свёрточных однопроходных схем к гибридным архитектурам, где автоматический поиск, самовнимание и языковые признаки совместно обеспечивают как рост точности, так и гибкость «open-vocabulary».

Сравнительный анализ «точность-на-ватт» на edge-платформах

Для прикладных систем компьютерного зрения важна не столько абсолютная точность детектора, сколько количество правильно распознанных объектов за единицу потреблённой энергии. Чтобы сделать разные архитектуры сопоставимыми, введём интегральный показатель:

$$\text{Эффективность} = \frac{mAP \times FPS}{P_{\text{средн.}}},$$

где mAP – средняя точность по COCO/LVIS,

FPS – кадровая частота при инференсе видеопотока,

$P_{\text{средн.}}$ – средняя потребляемая мощность, измеренная встроенными датчиками платформы при полной загрузке.

В таблице сведены результаты трёх моделей, выбранных в качестве опорных ориентиров на оси «точность – энергия». RT-DETR-R50 [8] иллюстрирует класс трансформерных детекторов без стадии NMS: с бэкбоном ResNet-50 и запуском на серверной GPU-карте NVIDIA T4 (TDP 70 Вт) он демонстрирует показатели, заявленные в репозитории модели. На другом конце спектра располагается YOLOv8-n – самая компактная конфигурация семейства YOLOv8, протестированная на Jetson AGX Orin в 30-ваттном профиле [9, 10]. Между этими полюсами находится MobileNet-SSDLite: однопроходный SSD-детектор с облегчённым бэкбоном MobileNet V2 [11], скомпилированный под сопроцессор Coral Edge TPU. Глубинно-точечные свёртки и полная INT8-квантовка позволяют ему держать очень высокую кадровую частоту при среднем энергопотреблении всего 2 Вт [12].

Таблица 1 – Сравнительный анализ «точность-на-ватт»

Модель	Платформа	mAP, %	FPS	P, Вт	mAP·FPS/W
RT-DETR-R50	NVIDIA T4 (70 Вт)	53.1	108	70	82
YOLOv8-n	Jetson AGX Orin (30 Вт mode)	37.3	383	30	475
MobileNet-SSDLite	Coral Edge TPU (2 Вт)	22.0	400	2	440

Сравнение показывает, что лёгкие CNN-детекторы в паре со специализированными SoC/ASIC-ускорителями остаются эталоном энергоэффективности, тогда как без-NMS-трансформеры оправдывают более высокий энергобюджет только там, где критична максимальная точность и широкий словарь классов.

Заключение

Статья анализирует современные архитектуры нейронных сетей, используемые для обнаружения и распознавания объектов в видеопотоках. Особое внимание уделено энергоэффективности, что особенно важно для мобильных

устройств и встроенных систем. Практическая значимость этих технологий заключается в их применимости в беспилотных транспортных средствах, системах видеонаблюдения, медицинской диагностике и промышленной автоматизации.

Текущая тенденция смещается к трансформерным NMS-free моделям (RT-DETR) и open-vocabulary-детекторам (YOLO-World), которые уже работают в реальном времени. Решающее конкурентное поле – метрика «точность-на-ватт»: лёгкие CNN (YOLOv8-n) и специализированные ускорители (Edge TPU, Jetson Orin) показывают, что энергомерная оптимизация становится неотъемлемой частью разработки систем компьютерного зрения.

Литература

1. Coefficient estimation of simultaneous equations in the case of stochasticity of exogenous variables [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2543/1/012005> (дата обращения: 15.02.2025).
2. Unbiased estimation method for coefficients of simultaneous equations with stochasticity of exogenous variables [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1145/3686540.3686554> (дата обращения: 15.02.2025).
3. RT-DETR: Real-Time Detection Transformer [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2304.08069> (дата обращения: 15.02.2025).
4. A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/make5040083> (дата обращения: 15.02.2025).
5. YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2405.14458> (дата обращения: 15.02.2025).
6. Single Shot MultiBox Detector [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1512.02325> (дата обращения: 15.02.2025).
7. Cheng R., et al. YOLO-World: Real-Time Open-Vocabulary Object Detection [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/papers/Cheng_YOLO-World_Real-Time_Open-Vocabulary_Object_Detection_CVPR_2024_paper.pdf (дата обращения: 07.05.2025).
8. Model Card: RT-DETR (transformers) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://huggingface.co/docs/transformers/en/model_doc/rt_detr (дата обращения: 07.05.2025).
9. Performance benchmark of YOLO v5, v7 and v8 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.stereolabs.com/en-pl/blog/performance-of-yolo-v5-v7-and-v8> (дата обращения: 07.05.2025).
10. Jetson AGX Orin Series Technical Brief [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/gtc21/jetson-orin/nvidia-jetson-agx-orin-technical-brief.pdf> (дата обращения: 07.05.2025).
11. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474> (дата обращения: 07.05.2025).
12. Dual EdgeTPU M.2 Accelerator: product page [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://coral.ai/products/m2-accelerator-dual-edgetpu/> (дата обращения: 07.05.2025).

УДК 621.396.961

Разработка математической модели алгоритма цифровой обработки сигнала моноимпульсного радиотехнического измерителя повышенной точности

Евгений Кимович Самаров, доктор технических наук,
заведующий кафедрой математики,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет», г. Санкт-Петербург

Рассмотрен и проанализирован метод повышения точности и помехоустойчивости обзорного импульсно-доплеровского углового радиотехнического измерителя за счет когерентной межпериодной обработки сигналов с априорно неизвестной частотной модуляцией. Показано, что разработанный на основе данного метода математический алгоритм достаточно прост в реализации и хорошо применим при цифровой обработке сигналов.

Радиотехнический моноимпульсный измеритель, когерентная обработка сигнала, алгоритм измерения угловых координат.

Development of a mathematical model of the digital signal processing algorithm of a monopulse radio engineering meter of increased accuracy

Evgeny Kimovich Samarov, Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of Mathematics,
St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg

The paper considers and analyzes a method for improving the accuracy and noise immunity of a survey pulse-Doppler angular radio engineering meter by means of coherent inter-period processing of signals with a priori unknown frequency modulation. It is shown that the mathematical algorithm developed based on this method is quite simple to implement and is well applicable for digital signal processing.

Radio engineering monopulse meter, coherent signal processing, and angular coordinate measurement algorithm.

Введение. Как известно принцип измерения угловых координат моноимпульсным (МИ) методом состоит в том, что они вычисляются в виде заранее установленной функции от оценок амплитуд, фаз и временных задержек отраженных сигналов. Эта функция, получившая название пеленгационной характеристики моноимпульсного измерителя (МИИ) радиолокационной станции (РРС), указывает на величину и знак углового рассогласования ($\delta\epsilon$) между направлением на источник сигнала и, так называемым, равносигнальным направлением, то есть представляет собой нечетную действительную функцию угла прихода эхо-сигналов. Кроме того, пеленгационная характеристика не должна зависеть от абсолютного уровня амплитуды отраженного сигнала.

Для обзорной амплитудной моноимпульсной системы (МИС) с суммарно (Σ) разностной (Δ) обработкой эхо-сигналов пеленгационная характеристика имеет вид [1]:

$$S(\delta\varepsilon) = \frac{\hat{A}_\Delta}{\hat{A}_\Sigma} \cos(\hat{\varphi}_\Delta - \hat{\varphi}_\Sigma) = |\delta\hat{\varepsilon}| \text{sign} \delta\hat{\varepsilon}, \quad (1)$$

где \hat{A}_Σ , \hat{A}_Δ , $\hat{\varphi}_\Sigma$, $\hat{\varphi}_\Delta$ – оценки амплитуд и начальных фаз сигналов в Σ - и Δ -каналах приемного тракта; sign – математический знак, означающий в математике функцию, принимающую значения -1 , $+1$ или 0 в зависимости от того, является ли знак заданного действительного числа положительным или отрицательным, или же само число равно нулю.

Из анализа выражения (1) следует, что в обзорных амплитудных суммарно-разностных МИС оценка угловой координаты объекта вычисляется на основе оценок амплитуд и начальных фаз сигналов в Σ - и Δ -каналах; по оценкам амплитуд сигналов в Σ - и Δ -каналах приемного тракта вычисляется оценка углового рассогласования $\delta\varepsilon$ (в виде модуля $|\delta\hat{\varepsilon}|$), а по оценкам начальных фаз – ее знак ($\text{sign} \delta\hat{\varepsilon}$).

Нормировка Δ -сигнала относительно Σ -сигнала осуществляется не на промежуточной частоте с помощью автоматической регулировки усиления (АРУ), а на видеочастоте – делением оценок на выходах Δ - и Σ -каналов. Это объясняется невозможностью использовать АРУ в обзорных РЛС в силу того, что в них необходимо измерять координаты всех объектов, находящихся в зоне обзора, а схема АРУ обладает инерционностью и не может адекватно реагировать на несколько близко расположенных объектов.

В обзорных МИС обнаружение объекта в принципе возможно как по одиночному эхо-сигналу, так и по пачке из L импульсов. Измерять координаты объекта можно также как по одиночному отраженному импульсу, так и по пачке эхо-сигналов.

Однако в обзорных МИ РЛС задачу совместного обнаружения – измерения необходимо решать по пачке эхо-сигналов. Это связано с тем, что обзорная МИ РЛС должна обнаруживать и измерять координаты объектов, находящихся в зоне обзора на больших дальностях, где энергия отраженного сигнала соизмерима с дисперсией внутренних шумов. Энергия пачки эхо-сигналов во много раз больше энергии одиночного радиоимпульса, поэтому в этом случае показатели качества обнаружения сигнала и точности измерения его параметров значительно выше.

Для получения высокой точности измерения угловой координаты объекта необходимо обеспечить эффективное накопление энергии пачки эхо-сигналов. Доказано, что некогерентное накопление в обзорной МИС не устраняет смещение оценки угловой координаты и не позволяет повысить точность измерения при малых внутриимпульсных отношениях сигнал-шум (ОСИ). На эффективность некогерентного накопления отрицательно влияет априорная неопределенность параметров детерминированной фазовой модуляции эхо-сигналов. В большинстве случаев принимаемые за время облучения объекта сигналы когерентны с неизвестной частотной модуляцией.

Таким образом, в качестве решаемой задачи выступает разработка алгоритма измерения угловой координаты объекта для обзорной МИ РЛС с когерентной межпериодной обработкой, инвариантной к параметрам частотной модуляции.

Синтез когерентного измерителя, работающего по пачке эхо-сигналов, на основе метода комплексных огибающих. Рассмотрим синтез радиолокационного измерителя на основе метода комплексных огибающих. Представим отдельные импульсы пачки как последовательность отсчетов комплексных огибающих

$$\dot{U}_j = U_{cj} + iU_{sj},$$

которые получены на выходе оптимального фильтра одиночного радиосигнала одного из j каналов МИС. Считаем, что данные импульсы образуют вектор \mathbf{U} , причем период их повторения равен величине T_{Π} .

Как известно, если сигнал и шум имеют гауссовское распределение, то совместную плотность распределения вероятностей (ПРВ), составляющих вектора \mathbf{U} можно описать следующим выражением [2]:

$$W(\mathbf{U}) = (2\pi)^{-L} \det[R_{jk}^{-1}] \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^L R_{jk}^{-1} \dot{U}_j^* \dot{U}_k \right\}, \quad (2)$$

где R_{jk}^{-1} – элементы матрицы \mathbf{R}^{-1} , обратной эрмитовой корреляционной матрице \mathbf{R} с элементами $R_{jk} = \frac{1}{2} \dot{U}_j \dot{U}_k^* = \sigma_c^2 \rho(j, k) \exp\{i(j-k)\varphi_d\} + \sigma_{\Pi}^2 \delta_{jk}$; \det – математический символ, обозначающий определитель матрицы; \dot{U}_j^* – комплексно-сопряженное \dot{U}_j ; σ_c^2 – дисперсия эхо-сигнала; $\rho(j, k)$ – коэффициенты между периодической корреляции сигнала; $\varphi_d = \Omega_d T_{\Pi}$ – сдвиг фаз сигнала за период T_{Π} , обусловленный детерминированной частотной модуляцией эхо-сигналов; σ_{Π}^2 – дисперсия внутреннего шума; δ_{jk} – символ Кронекера. Здесь и далее, символом «*», будем обозначать комплексно-сопряженные числа.

Заметим, что при наличии только одного шума совместная ПРВ $W_{\Pi}(\mathbf{U})$ будет описываться выражением, аналогичным (2), с элементами

$$R_{jk}^{\Pi} = \sigma_{\Pi}^2 \delta_{jk} \text{ и } (R_{jk}^{-1})^{\Pi} = \frac{\delta_{jk}}{\sigma_{\Pi}^2}.$$

Вычислив условное отношение правдоподобия, совпадающее до постоянного множителя с функцией правдоподобия оценки амплитуды эхо-сигнала, получим

$$\Lambda = L(\mathbf{U}) = C \exp \left\{ \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^L Q_{jk} \dot{U}_j^* \dot{U}_k \right\},$$

где C – нормировочная постоянная; $Q_{jk} = (R_{jk}^{-1})^{\Pi} - R_{jk}^{-1}$ – элементы матрицы ошибок измерений $[\mathbf{Q}_{jk}]$.

Обозначим ОСШ $q = \sigma_c^2 / \sigma_{\Pi}^2$.

Как правило, отраженные сигналы имеют экспоненциальную функцию корреляции [2], $\rho(j, k) = \exp\{-\pi \Delta f T |j - k|\} = \rho^{|j-k|}$, где $\Delta f T$ – нормированная ширина спектра, поэтому можно перейти к нормированным матрицам. Как известно, нормированная эрмитова матрица имеет вид

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1+q & q\rho e^{-i\varphi_d} & \dots & q\rho^L e^{-iL\varphi_d} \\ q\rho e^{i\varphi_d} & 1+q & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q\rho^L e^{iL\varphi_d} & \dots & \dots & 1+q \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Заметим, что если $q \gg 1$, то в ее диагональных элементах единицей можно пренебречь. В этом случае она будет представлять собой корреляционную матрицу эхо-сигнала.

Матрица, обратная сигнальной, имеет ленточно-диагональную структуру, элементы которой будут определяться исходя из выражений:

$$Q_{11} = Q_{LL} = \frac{1}{q(1-\rho^2)}; Q_{jj} = \frac{(1-\rho^2)}{q(1-\rho^2)}, j = 2, \dots, L-1.$$

$$Q_{j-1,j} = \frac{-\rho \exp\{-i\varphi_d\}}{q(1-\rho^2)}, Q_{j,j-1} = \frac{\rho \exp\{-i\varphi_d\}}{q(1-\rho^2)}, j = 2, \dots, L-1.$$

Обратная матрица шумов в нормированном виде представляет собой диагональную матрицу с элементами $(R_{jk}^{-1})^u = \delta_{jk}$.

Тогда в нормированном виде матрица ошибок измерений $[Q_{jk}] = [\delta_{jk} - (R_{jk}^{-1})^c]$.

Имеет так же, как и обратная корреляционная матрица сигнала, ленточно-диагональную структуру, но с элементами

$$Q_{11} = Q_{LL} = 1 - \frac{1}{q(1-\rho^2)}; Q_{jj} = 1 - \frac{(1-\rho^2)}{q(1-\rho^2)}, j = 2, \dots, L-1.$$

$$Q_{j-1,j} = \frac{-\rho \exp\{-i\varphi_d\}}{q(1-\rho^2)}, Q_{j,j-1} = \frac{\rho \exp\{-i\varphi_d\}}{q(1-\rho^2)}, j = 2, \dots, L-1.$$

Функционал правдоподобия (2) без учета краевых эффектов при $j = \overline{1, L}$ принимает вид

$$L(\mathbf{U}) = C \exp \left\{ \frac{1}{2} \left[\sum_{j=1}^L C_1 |\dot{U}_j|^2 + C_2 \left(\exp\{-i\varphi_d\} \sum_{j=2}^L \dot{U}_{j-1}^* \dot{U}_j + \exp\{i\varphi_d\} \sum_{j=2}^L \dot{U}_{j-1} \dot{U}_j^* \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

$$\text{где } C_1 = 1 - \frac{(1+\rho^2)}{q(1-\rho^2)}; C_2 = \frac{\rho}{q(1-\rho^2)}.$$

Показатель экспоненты представляет собой взвешенную сумму двух типов алгоритмов между периодной обработки – некогерентную и когерентную. Вклад каждого из них определяется весовыми коэффициентами C_1 и C_2 , которые зависят от корреляционных свойств эхо-сигналов.

Из анализа зависимостей значений коэффициентов C_1 и C_2 от корреляционных свойств сигнала (см. рисунок 1) для различных q очевиден вывод о применимости когерентного и некогерентного накоплений в процессе обработки эхо-сигналов.

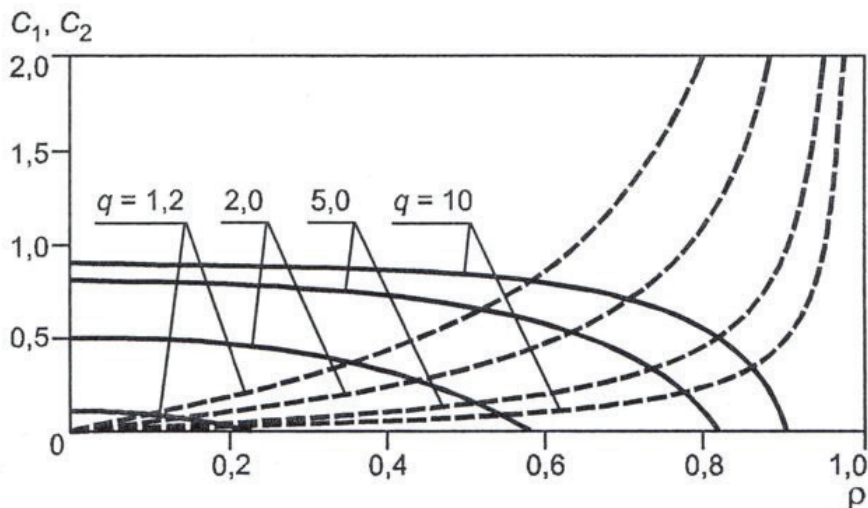


Рисунок 1 – Зависимость коэффициентов C_1 (сплошные линии) и C_2 (пунктирные линии) от корреляционных свойств сигнала

При высоких q и быстрых флуктуациях амплитуд отдельных импульсов пачки ($q < 0,5$) наибольший эффект дает некогерентное накопление. При $q \approx 1$ эффективность некогерентного накопления близка к нулю. При малых q и особенно при медленных флуктуациях эхо-сигналов, что наблюдается при больших расстояниях до цели особенно в дециметровом диапазоне длин волн, когда нормированная ширина спектра меньше 0,01, эффективность когерентного накопления существенно превышает эффективность некогерентного.

Для эхо-сигналов с нормированной шириной спектра меньше 0,01 можно полностью пренебречь составляющей некогерентного накопления в выражении (4). Тогда данное выражение примет вид

$$L(\mathbf{U}) = C \exp \left\{ \frac{1}{2} C_2 (\exp \{-i\varphi_d\} \dot{X} + \exp \{i\varphi_d\} \dot{X}^*) \right\}, \quad (5)$$

$$\text{где } \dot{X} = \sum_{j=2}^L \dot{U}_{j-1}^* \dot{U}_j, \quad \dot{X}^* = \sum_{j=2}^L \dot{U}_{j-1} \dot{U}_j.$$

Максимум функционала правдоподобия наблюдается при условии максимума монотонной функции, стоящей в показателе экспоненты, которую в тригонометрическом виде можно записать как

$$\dot{u} = \cos \varphi_d \operatorname{Re} \dot{X} + i \sin \varphi_d \operatorname{Im} \dot{X}. \quad (6)$$

В выражение (6) входит неизвестная величина φ_d , данные о которой отсутствуют. Как правило, для устранения ее априорной неопределенности используют многоканальные системы. Однако такой способ ввиду своей громоздкости и недостаточной точности менее эффективен, чем способ замены неизвестных параметров φ_d их состоятельными оценками $\hat{\varphi}_d$. В этом случае алгоритм (6) примет вид

$$\dot{u} = \cos \hat{\varphi}_d \operatorname{Re} \dot{X} + i \sin \hat{\varphi}_d \operatorname{Im} \dot{X}. \quad (7)$$

Алгоритм оценки величины $\exp \{i\hat{\varphi}_d\}$ на основе метода максимального правдоподобия сводится к результату решения уравнения

$$\left. \frac{\partial L(\varphi_d)}{\partial \varphi_d} \right|_{\varphi_d = \hat{\varphi}_d} = 0.$$

Решив данное уравнение, найдем

$$\exp \{i\hat{\varphi}_d\} = \frac{\dot{X}}{|\dot{X}|} = \cos \hat{\varphi}_d + i \sin \hat{\varphi}_d = \frac{\operatorname{Re} \dot{X}}{|\dot{X}|} + \frac{\operatorname{Im} \dot{X}}{|\dot{X}|}. \quad (8)$$

Подставляя выражения для $\cos \hat{\varphi}_d$ и $\sin \hat{\varphi}_d$ из (8) в (7), получаем

$$u = \frac{\operatorname{Re} \dot{X}^2 + \operatorname{Im} \dot{X}^2}{|\dot{X}|} = |\dot{X}| = \left| \sum_{j=2}^L \dot{U}_{j-1}^* \dot{U}_j \right|. \quad (9)$$

Анализируя выражение (9) можно сделать вывод, что максимум функционала правдоподобия (5) достигается при когерентном накоплении произведений комплексно-сопряженных соседних отсчетов огибающих радиоимпульсов. Данный алгоритм инвариантен к детерминированному сдвигу фаз, что является неоспоримым преимуществом по сравнению с алгоритмом обычного когерентного накопления.

Особое внимание необходимо обратить на \dot{X} . Если

$$\begin{aligned} \dot{U}_j &= |\dot{U}_j| \exp \{i(j\varphi_d + \psi_j)\}, \\ \dot{U}_{j-1}^* &= |\dot{U}_{j-1}| \exp \{-i((j-1)\varphi_d + \psi_{j-1})\} \end{aligned}$$

и амплитуды огибающих в соседних отсчетах для медленного флуктуирующей пачки эхо-сигналов приблизительно равны, то есть $|\dot{U}_j| = |\dot{U}_{j-1}| = |U_j|$, то

$$\dot{X} \approx \sum_{j=2}^L |U_j|^2 \exp \{i(\varphi_d + \psi_j - \psi_{j-1})\}. \quad (10)$$

На основе этого выражения можно заключить, что \dot{X} представляет собой эквивалент комплексной огибающей накопленной пачки эхо-сигналов. Из анализа выражения (10) очевидно, что приращение фазы за счет детерминированной частотной модуляции не зависит от номера отсчета и является постоянным для всех импульсов пачки. Это объясняет инвариантность процесса накопления к данной модуляции.

Используя известное выражение для оценки амплитуды эхо-сигнала с равномерно распределенной начальной фазой [3] для когерентной пачки медленно флуктуирующих эхо-сигналов, получаем следующий алгоритм оценивания:

$$\hat{A} = \frac{1}{L-1} \frac{2|\dot{X}|_{I_1}(2\hat{A}|\dot{X}|_{C_2})}{\tau_{II_0}(2\hat{A}|\dot{X}|_{C_2})}. \quad (11)$$

Известно, что при больших q (при когерентном накоплении это не вызывает сомнения) $I_1(z)/I_0(z) \rightarrow 1$. Тогда (11) примет вид

$$\hat{A} = \frac{1}{L-1} \frac{2|\dot{X}|}{\tau_{II}}.$$

О выражение представляет собой оптимальный по критерию максимального правдоподобия алгоритм оценивания амплитуды пачки эхо-сигналов в Σ - и Δ -каналах обзорного амплитудного суммарно-разностного моноимпульсного измерителя; на основе него можно найти $|\delta\hat{\varepsilon}|$.

Для получения знака углового отклонения воспользуемся выражением для оценки фазы сигнала

$$\hat{\varphi} = \arg \dot{X} = \arctg \frac{\operatorname{Im} \dot{X}}{\operatorname{Re} \dot{X}}.$$

Рассмотрим отношение комплексных огибающих, полученных в Δ - и Σ -каналах:

$$\frac{\dot{X}_{\Delta}}{\dot{X}_{\Sigma}} = \left| \frac{\dot{X}_{\Delta}}{\dot{X}_{\Sigma}} \right| \exp\{i\Delta\varphi\} = \left| \frac{\sum_{j=2}^L \dot{U}_{j-1\Delta}^* \dot{U}_{j\Delta}}{\sum_{j=2}^L \dot{U}_{j-1\Sigma}^* \dot{U}_{j\Sigma}} \right| \exp\{i\Delta\varphi\}, \quad (12)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз в Δ - и Σ -каналах приемного тракта.

Но поскольку модуль углового рассогласования, согласно (1), вычисляется как модуль отношения амплитуд эхо-сигналов, а знак рассогласования – как знаковая функция от разности фаз в Δ - и Σ -каналах моноимпульсной системы, алгоритм оценки углового рассогласования можно записать как

$$\delta\hat{\varepsilon} = \frac{|\dot{X}_{\Delta}|}{|\dot{X}_{\Sigma}|} \operatorname{sign} \left(\operatorname{Re} \frac{\arg \dot{X}_{\Delta}}{\arg \dot{X}_{\Sigma}} \right).$$

Полученное соотношение можно упростить, умножив числитель и знаменатель в (12) на комплексно-сопряженное знаменателю выражение. Тогда имеем

$$\frac{\dot{X}_{\Delta} \dot{X}_{\Sigma}^*}{\dot{X}_{\Sigma} \dot{X}_{\Sigma}^*} = \frac{|\dot{X}_{\Delta}| |\dot{X}_{\Sigma}| \exp\{i\Delta\varphi\}}{|\dot{X}_{\Sigma}|^2} = \frac{|\dot{X}_{\Delta}|}{|\dot{X}_{\Sigma}|} \exp\{i\Delta\varphi\}. \quad (13)$$

Как видно из выражения (13), его конечный вариант совпадает с правой частью выражения (12). Для приведения алгоритма измерения к аналитической записи пеленгационной характеристики требуется найти действительную часть выражения (13).

Окончательный вариант алгоритма измерения:

$$\delta\hat{\varepsilon} = \operatorname{Re} \frac{\dot{X}_{\Delta} \dot{X}_{\Sigma}^*}{\dot{X}_{\Sigma} \dot{X}_{\Sigma}^*}. \quad (14)$$

После несложных преобразований и учета того, что оценка амплитуды, огибающей при большом ОСШ, совпадает со значением ее модуля, данный алгоритм можно привести к виду выражения (1):

$$\delta\hat{\varepsilon} = \operatorname{Re} \frac{|\dot{X}_{\Delta}| |\dot{X}_{\Sigma}| \exp\{i(\hat{\varphi}_{\Delta} - \hat{\varphi}_{\Sigma})\}}{|\dot{X}_{\Sigma}|^2} = \frac{\hat{A}_{\Delta} \hat{A}_{\Sigma}}{\hat{A}_{\Sigma}^2} \cos(\hat{\varphi}_{\Delta} - \hat{\varphi}_{\Sigma}) = \frac{\hat{A}_{\Delta}}{\hat{A}_{\Sigma}} \cos(\hat{\varphi}_{\Delta} - \hat{\varphi}_{\Sigma}).$$

Заключение. На основании алгоритма (14) с учетом выражения (9) была составлена математическая модель обзорного МИИ угловой координаты объекта (рисунок 2).

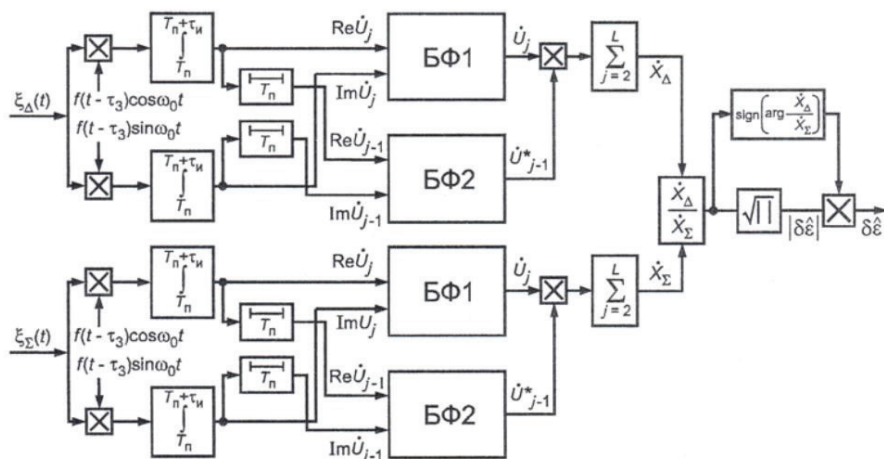


Рисунок 2 – Математическая модель МИИ угловых координат, где:
БФ1, БФ2 – соответственно, блоки формирования комплексных
и комплексно-сопряженных составляющих

Сравнительный анализ результатов цифрового моделирования синтезированного измерителя и измерителя, использующего обычное когерентное накопление в Σ - и Δ -каналах приемного тракта (рисунок 3), доказывает независимость погрешности измерения угловой координаты объекта от ее фазовой модуляции эхосигналов у синтезированного измерителя.

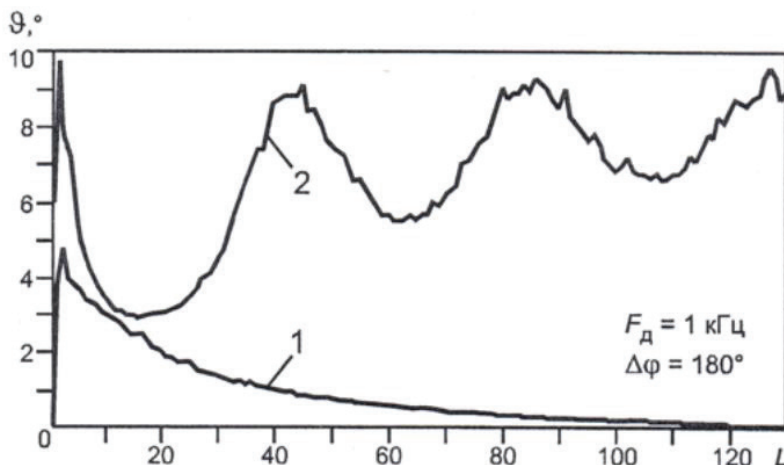


Рисунок 3 – Среднее значение погрешности измерения угловой координаты объекта для синтезированного алгоритма (1) и алгоритма с когерентным накоплением (2)

Это обстоятельство позволит повысить эффективность работы измерителя при детерминированной априори неизвестной фазовой модуляции.

Таким образом, синтезированный алгоритм измерения имеет неоспоримые преимущества по сравнению с другими, поскольку он инвариантен к детерминированной фазовой модуляции сигналов в отличие от обычного алгоритма с когерентным накоплением; обладает высоким быстродействием, позволяющим закончить процесс измерения к моменту приема последнего импульса пачки эхо-сигналов; легко реализуется при цифровой обработке первичной радиолокационной информации.

Литература

1. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 392 с.
2. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Сов. Радио, 1970. 560 с.
3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. Радио, 1982. 624 с.

УДК 621.315.21

Анализ возможностей использования вилки модульного разъема в составе системы администрирования СКС

Андрей Борисович Семенов, доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет
Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), г. Москва

Показана возможность использования вилки модульного разъема как штатного компонента системы администрирования информационной кабельной системы. Продемонстрированы основные возможности реализации элементов поддержки администрирования в зависимости от требуемого уровня результирующей эффективности. Особое внимание уделено возможностям адаптации применяемой индикации к местным условиям конкретного проекта. Рассмотрены реализующие метод наложения варианты внедрения элементов активной оптической индикации как средства наращивания эффективности администрирования.

Структурированные кабельные системы, модульный разъем, вилка, администрирование СКС, цветовая идентификация, интерактивное управление.

Analysis of the possibilities of using the plug of the modular connector as part of the SCS administration system

Andrey Borisovich Semenov, Doctor of Technical Sciences, professor,
National Research University Moscow State University of Civil Engineering
(NRU MGSU), Moscow

The possibility of using the plug of the modular connector as a regular component of the information cable system administration system is shown. The main possibilities of implementing administrative support elements are demonstrated, depending on the required level of resulting efficiency. Special attention is paid to the possibilities of adapting the applied indication to the local conditions of a particular project. The options for the implementation of active optical indication elements, which implement the installation method, as a means of increasing administrative efficiency, are considered.

Structured cabling systems, modular connector, plug, SCS administration, color identification, interactive control.

Введение. Информационно-телекоммуникационная система (ИТС) современного объекта недвижимости реализуется в соответствии с проверенной временем моделью OSI взаимодействия открытых систем [1]. Ее физический уровень может быть реализован по-разному, но в основной массе случаев для этого используются кабельные решения в виде структурированной кабельной системы (СКС).

СКС даже среднего размера насчитывает в своем составе несколько тысяч

отдельных компонентов, которые взаимодействуют между собой по определенным правилам. Иначе говоря, она представляет собой сложную техническую систему, эксплуатация которой выполняется по определенным правилам и нормируется профильными стандартами. В качестве таковых обычно используются ANSI/TIA-606A, IEC-14763-1 и ГОСТ Р 58468-2019 (ранжированы в порядке популярности).

Общим недостатком стандартной системы администрирования считается то, что уровень ее эффективности в ряде случаев серьезно не соответствует потребностям практики [2]. Это является прямым следствием невозможности простого внедрения в кабельную систему технических средств вычислительной техники из-за отсутствия обязательного штатного источника питания. При этом, однако, не запрещается установка таких блоков с исполнением по навесной схеме.

Указанный недостаток частично исправляется в случае обращения к реализации внутриобъектовой информационной системы по схеме PoLAN [3, 4] или внедрения активной консолидационной точки [5]. Однако, применение таких подходов, в основе которых лежит приближение активного сетевого оборудования к пользовательскому рабочему месту, означает по меньшей мере частичный отказ от базовых постулатов СКС, что серьезно ограничивает их практическую популярность.

Соответственно, службой эксплуатации хорошо востребованы любые технические средства, которые позволяют тем или иным образом с различной степенью глубины добиться более высокого по сравнению с задаваемым стандартами базовым уровнем удобства администрирования.

Законченная строительством и переданная в штатную эксплуатацию СКС представляет собой в общем случае совокупность стационарных линий, которые в процессе формирования кабельных трактов соединяются друг с другом и подключаются к активному сетевому оборудованию коммутационными шнурами [3]. Соответственно, нарастить эффективность системы администрирования можно только модернизацией тех компонентов стационарной линии и шнуров, которые являются доступными системному администратору во время изменения конфигурации кабельных трактов. При этом по умолчанию считается, что внедряемые нововведения не должны ухудшать телекоммуникационные параметры стационарных линий и кабельных трактов.

Концепция администрирования и ключевые направления наращивания уровня ее технической эффективности. В основу концепции администрирования СКС положено применение БД как ее центрального элемента, предназначенного в первую очередь для хранения актуального на любой момент времени образа текущей конфигурации структурированной проводки, а также непосредственно взаимодействующих с ней компонентов информационной инфраструктуры предприятия.

При изменении конфигурации СКС из БД извлекается информация, которая исчерпывающе описывает эту процедуру, тем или иным образом с привлечением уникальных меток-идентификаторов ставится в соответствие с необходимым компонентом, после чего осуществляется коммутация. Завершающим этапом становится занесение в БД системы соответствующего отчета (рисунок 1).

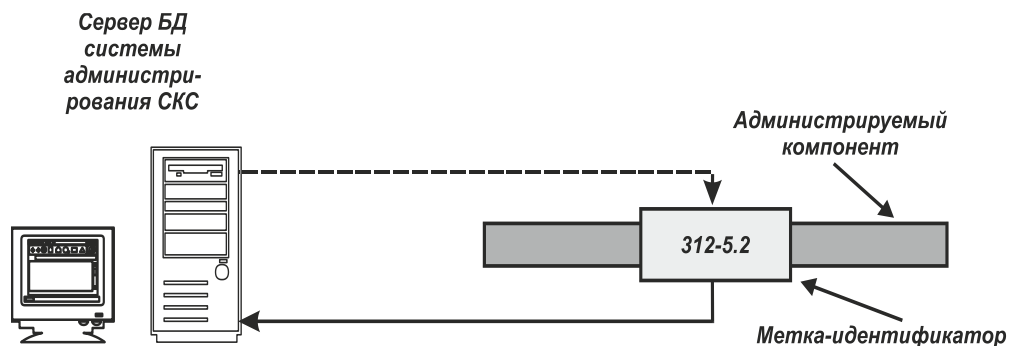


Рисунок 1 – Схема взаимодействия базы данных системы администрирования с отдельными компонентами СКС

Ключевым в этом процессе является наличие в БД корректной информации об СКС. Актуальность создаваемого ею образа поддерживается применением ряда технических и организационных приемов. Главные из них заключаются в следующем:

- строгая дисциплина изменения текущей конфигурации, выполняемая через наряды на задания с указанием в них ответственных лиц и последующим подтверждением выполнения работ через отчеты;
- обязательного применения системы уникальных идентификаторов, каждый из которых присваивается конкретному компоненту СКС и информационной инфраструктуры, входящей в область действия системы администрирования, а также отражается в записях БД;
- внедрение многоуровневой системы указателей и блокировок, предотвращающих непреднамеренные ошибки при изменении конфигурации СКС;
- максимально полная автоматизация процессов актуализации информации, хранимой в БД администрирования, при изменениях конфигурации СКС.

Место вилки модульного разъема в системе администрирования.

Структурированную информационную проводку допустимо рассматривать как совокупность стационарных линий, которые в процессе формирования трактов соединяются друг с другом и/или подключаются к интерфейсным разъемам активного сетевого оборудования коммутационными шнурами. Применение в некоторых случаях адаптеров качественно не меняет данную процедуру.

Стандарты СКС допускают применение в пользовательских информационных розетках разъемов трех различных разновидностей. Тем не менее в реалиях сегодняшнего дня подавляющее большинство этих компонентов представляют собой модульный разъем. Такие нестандартные изделия как получивший определенную популярность ARJ45, который можно рассматривать как вариант GG45, а также распространенный в Европе EC7, качественно не меняет этой картины.

Одновременно стандарты СКС не нормируют тип пользовательского интерфейсного разъема коммутационного оборудования технического помещения. Тем не менее, на практике из соображений использования симметричного по вилкам шнура, а также унификации шнуровых изделий, применяемых в технических

помещениях и на рабочих местах пользователей, также используется оборудование с розетками модульных разъемов.

Разъем модульного типа по действующей классификации соединителей относится к двухкомпонентным несимметричным изделиям. Его вилка выполняет функции кабельной части этого компонента тракта передачи информационного сигнала.

Вилка модульного разъема имеет достаточно большие габариты, что открывает перспективы ее использования в составе системы администрирования за счет интеграции в нее различных сервисных элементов.

Стандарты СКС запрещают прямое подключение различных сервисных цепей к проводам витых пар. Последнее ограничение означает, что дополнительные компоненты, направленные на наращивание эффективности системы администрирования, могут интегрироваться с вилкой только методом наложения, а сама вилка при этом берет на себя функции механической несущей платформы.

Все рассматриваемые далее компоненты делятся на две основные разновидности, рисунок 2:

- элементы групповой идентификации, задающие отнесение маркируемого компонента к определенной группе (по категории, функциональному назначению и т.д.)
- элементы индивидуальной идентификации, позволяющие непосредственно или в результате выполнения некоторой дополнительной процедуры выделить конкретный компонент среди множества аналогичных.

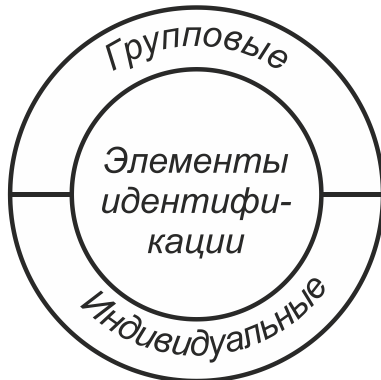


Рисунок 2 – Разновидности элементов идентификации, применяемые совместно с вилками модульных разъемов

В качестве средств групповой идентификации применяется предусмотренная стандартами окраска отдельных компонентов шнуров в различные цвета, а также нанесение на них соответствующих сменных цветных элементов. Данная особенность при соответствующем исполнении с учетом доминирующего положения в данной области пластиковых конструкций переводит некоторые элементы идентификации в разряд multifunctional.

Первой редакцией профильного стандарта ANSI/TIA-606 на администрирование СКС предусматривалась не только палитра цветов, но и их привязка к определенным приложениям. На практике стандартный подход не применяется и

цвета задействуются в зависимости от местной потребности конкретной СКС. Косвенным подтверждением малой практической популярности стандартизованного распределения цветов становится то, что цветовая палитра была исключена из нормативной части следующей редакции ANSI/TIA-606A рассматриваемого документа.

Отдельно укажем на то, что по мере роста эффективности выделения компонента СКС среди себе подобных наблюдается естественный и явно выраженный тренд перехода идентифицирующих элементов из разряда групповых в группу индивидуальных.

Простейшие элементы поддержки администрирования. Под простейшими элементами понимаются различные цветовые метки, которые фактически реализуют интуитивно понятный принцип «цвет к цвету». Возможность их привлечения именно для применения в конструкции вилки в неявном виде задается самими профильными стандартами, которые описывают этот вид идентификации.

Простота внедрение элементов цветовой идентификации в широкую инженерную практику заметно облегчается следующими факторами:

- технической простотой реализации этого вида маркировки;
- возможностью ее исполнения в сменном варианте;
- изготовлением корпуса вилки и ее дополнительных компонентов из пластика, который без проблем окрашивается в различные цвета (до 16 различных вариантов).

Фактом, подтверждающим техническую простоту простейших элементов цветовой идентификации в сочетании с их достаточно высокой эффективностью, является их широкое распространение. В качестве таковых выступают, см. рисунок 3.

- одно- или двухсторонние иконки, обычно несколько меньшего размера по сравнению с теми, которые устанавливаются на коммутационных панелях или в пользовательских информационных розетках;
- сменные защитные лапки рычажной защелки;
- распределенные элементы хребтового типа;
- незамкнутые кольцевые накладки.

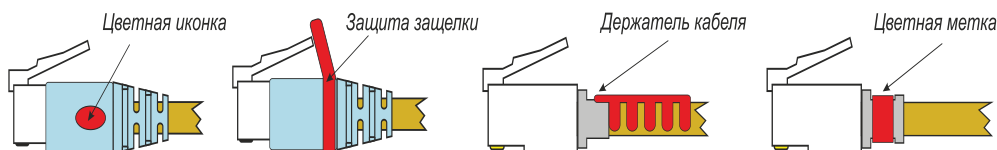


Рисунок 3 – Варианты исполнения сменных цветовых меток вилок коммутационных шнуров

Дополнительно подчеркнем факт того, что все перечисленные выше компоненты не являются фиксированными, механически привязаны к вилке только в рабочем положении и при необходимости меняются на другие. Это значительно расширяет их функциональные возможности.

Общим недостатком рассматриваемых компонентов, который является

прямым следствием их достоинства в виде хороших массогабаритных показателей, является их миниатюрность. В результате этого они легко теряются в процессе эксплуатации. Для устранения этого недостатка предложена сменная цветовая маркировка типа Rotatable Color Clips, в основу которой положена переработка конструкции хвостовика вилки. При необходимости соответствующей кодировки вилки хвостовик просто поворачивается на 90° с фиксацией в этом положении под внутреннюю защелку. Основную конструктивную идею данного решения в схематической форме демонстрирует рисунок 4.

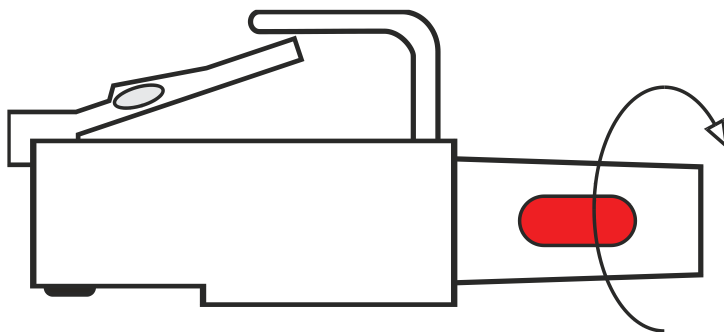


Рисунок 4 – Поворотный хвостовик с маркирующими окошками типа Rotatable Color Clips

Отдельно укажем на то, что маркировка сменными надписями, массово используемая на пользовательских информационных розетках и панелях, потенциально возможна также на вилках. При этом такая возможность остается невостребованной из-за сложности чтения на реальном коммутационном поле: даже при среднем уровне утилизации ресурсов кабельной системы маркировка данной разновидности перекрывается шнуровыми кабелями и вилками других шнуров.

Функции сменной цветовой идентификации вполне может брать на себя защитный хвостовик вилок, что предложено, например, в патенте США 5 538 438. Для этой цели он выполняется по раскладной схеме и может устанавливаться на вилку уже после ее подключения к кабелю. Схему данного элемента, которая позволяет также выполнять его демонтаж даже без отключения вилки от розетки, демонстрирует рисунок [7].

Внедрение элементов оптической идентификации. Элементы оптической идентификации реализуют активную ветвь технических средств поддержки администрирования и используются как средство двухточечной трассировки коммутационного шнура. Сильная сторона их применения заключается в заметном сокращении количества непреднамеренных ошибок в процессе переключений. Суть решения заключается в том, что вилки обоих концов отключаемого шнура отмечаются работающим оптическим индикатором, который тем или иным образом интегрируется в их конструкцию и активируется системным администратором по мере возникновения такой необходимости.

До уровня практического внедрения доведены две основные разновидности таких индикаторов. В первом случае используется внешний источник излучения, которое доставляется на вилку противоположного конца по пластиковому

световоду (так называемая схема PatchSee по имени компании, впервые внедрившей в самом начале нулевых годов текущего столетия это решение в широкую инженерную практику), интегрированному в сердечник шнурового кабеля [7].

Для увеличения заметности источник может быть переключен в мигающий режим работы с частотой срабатывания примерно 1 Гц или в составе источника применяется два световода. Вполне допустимо установка внутреннего рассеивающего элемента так, как это показано на рисунке 5, а также использования в качестве рассеивающего элемента самого корпуса вилки.

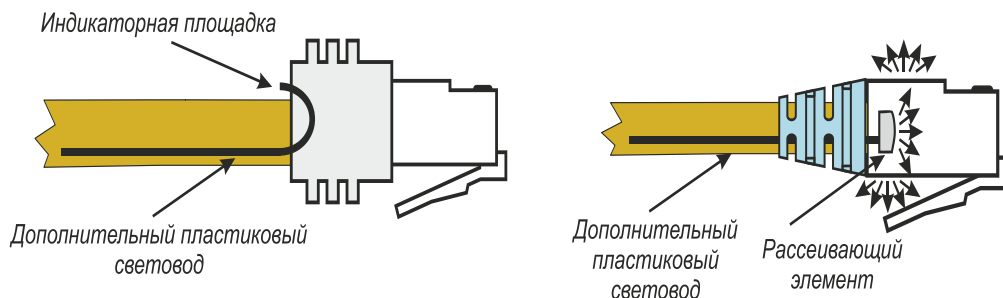


Рисунок 5 – Точечная оптическая индикация по классической схеме PatchSee (слева) и с использованием внутреннего рассеивающего элемента (справа)

Вторая группа технических решений основана на применении миниатюрных индикаторных СД, которые чаще всего встраиваются в защитный хвостовик вилки. При необходимости светодиоды активируются нажатием кнопки (при питании от встроенной часовой батарейки) или прямым подключением внешнего источника напряжения.

Ресурс батарейки при бортовом питании увеличивается добавлением контроллера, который принудительно отключает СД через примерно 30 с после нажатия на кнопку. Связь контроллеров и СД вилок противоположных концов шнура обеспечивается через два дополнительных провода, которые интегрируются в сердечник кабеля, рисунок 6.

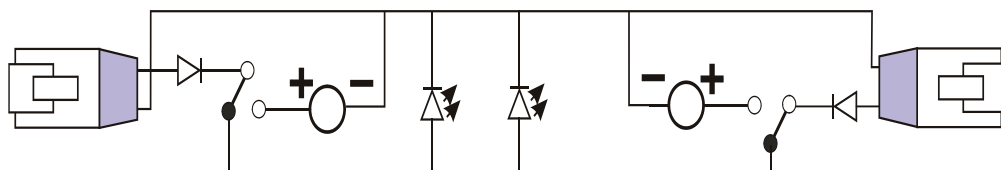


Рисунок 6 – Упрощенная принципиальная схема точечной светодиодной индикации вилок коммутационных шнуров

Для размещения часовой батарейки и контроллера может потребоваться удлинение задней части корпуса вилки или хвостовика. Кроме того, на корпусе или хвостовике предусматривается легкоъемная крышка, которая позволяет заменять батарейку после истощения ее ресурса, рисунок 7.

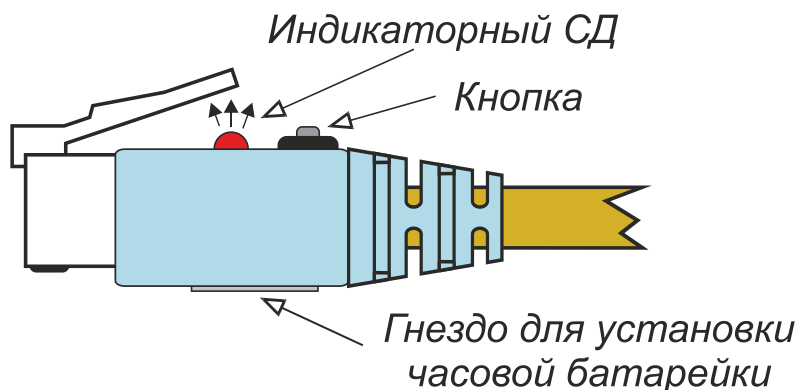


Рисунок 7 – Вилка с индикаторным светодиодом и автономным питанием от часовой батарейки

Вилка как носитель кабельной части датчика подключения шнура системы интерактивного управления. Система интерактивного управления СКС является на сегодняшний день одним из наиболее мощных технических средств поддержки процессов администрирования структурированной проводки. Суть этого технического решения заключается во внедрении в СКС датчиков подключения вилки шнура к розетке панели, что позволяет выполнять автоматический контроль текущей конфигурации проводки. Дополнительно система содержит также элементы интерактивного взаимодействия с системным администратором (в подавляющем большинстве случаев индикаторные одно- или многоцветные СД). Их наличие позволяет в пошаговом режиме управлять действиями системного администратора в процессе выполнения рабочего задания на изменение конфигурации СКС. Потребительская ценность реализуемого при этом алгоритма взаимодействия системы с администратором дополнительно усиливается тем, что допущенные ошибки выявляются и отмечаются в реальном масштабе времени [8] и отмечаются отдельными сигналами (изменением режима работы монохромного СД или цвета в случае многоцветного СД).

Конструкции датчика подключения отличаются большим разнообразием. Тем не менее, в реалиях сегодняшнего дня большинство из них реализуется на RFID-метках или чипах, информация с которых при подключении вилки к розетке взаимодействуют через соответствующий считыватель передается на контроллер системы интерактивного управления. Сам считыватель образует панельную часть датчика.

Разница между этими элементами при различных схемах построения системы заключается только в том, что информация с RFID-метки считывается по беспроводному каналу, тогда как чип требует прямого подключения через дополнительные контакты.

При общем сходстве основной идеи построения датчика подключения RFID-метка отличается от чипа тем, что ее установка выполняется по двум схемам. В случае обращения к постоянной схеме метка тем или иным образом интегрируется в корпус вилки или ее защитный хвостовик. При временной схеме метка одевается на хвостовик и фиксируется на нем в рабочем положении главным образом с помощью кольцевого фиксатора. Заметно реже практикуется ее укладка в

гнездо, выполненное обычно в утолщении защитного хвостовика, рисунок 8.

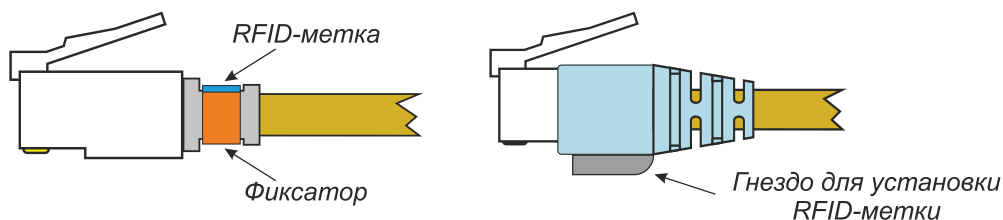


Рисунок 8 – Варианты установки RFID-меток системы интерактивного управления СКС на вилки модульных разъемов.
Слева на защитный хвостовик, справа – в гнездо

Заключение. Таким образом, проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Вилка модульного разъема как наиболее популярной на практике разновидности разъемного соединителя электропроводной подсистемы СКС может без проблем полноценно включаться в состав системы администрирования с различной степенью глубины без ущерба для выполнения своих основных функций.
2. Вилка модульного разъема представляет собой полноценный многофункциональный элемент информационной кабельной системы.
3. Модернизация вилки под углом зрения наращивания общей эффективности системы администрирования может выполняться внедрением различных активных элементов, но исключительно методом наложения таковых, т.е. вилка в этом смысле берет на себя не более чем функции чисто механической несущей платформы.
4. Форм-фактор вилки, структура и массогабаритные показатели ее внутренних токопроводящих цепей в случае соответствующей модернизации защитного хвостовика, дополненной при необходимости удлинением задней части корпуса, позволяет без проблем интегрировать в нее не только метки системы интерактивного управления, но и элементы активной оптической индикации с бортовым или внешним питанием.

Литература

1. Артюшенко В.М., Семенов А.Б. Структурированные кабельные системы: проектирование и расчет: учебное пособие / под науч. ред. док. техн. наук, проф. А.Б. Семенов. М.: Издательство «Научный консультант», 2025. 580 с.
2. Артюшенко В.М., Семенов А.Б. Проектирование структурированных кабельных систем: учебное пособие / под науч. ред. док. техн. наук, проф. А.Б. Семенова. М.: Издательство «Научный консультант», 2025. 126 с.
3. Семенов А.Б. Технология PoLAN как фактор наращивания объемов применения волоконно-оптической техники во внутриобъектовых информационно-телекоммуникационных системах // Фотон-экспресс. 2023. № 2(186). С. 13-16.
4. Семенов А.Б. Варианты внедрения технологии PoLAN в действующие СКС // Первая миля. 2023. № 5(113). С. 40-45.

5. Семенов А.Б. Активная консолидационная точка для офисных информационных систем // Вестник связи. 2020. № 8. С. 20-24.
6. Семенов А.Б. Технологические разъемы СКС // Вестник связи. 2025. № 3. С. 17-20.
7. Семенов А.Б. Активная трассировка оптических коммутационных шнуров // Фотон-экспресс. 2020. № 1(161). С. 18-21.
8. Семенов А.Б. Системы интерактивного управления СКС / М.: Эко-Трендз. 2011. 223 с.

УДК 621.454.2

Температурный запас жидкостного ракетного двигателя малой тяги

Татьяна Сергеевна Аббасова, кандидат технических наук,
доцент, кафедра информационных технологий и управляющих систем,
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова» –
филиал федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии»,
г. Королев, Московская область

Проанализированы характеристики наиболее критичных с точки зрения теплового состояния элементов жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРДМТ) – форсуночной головки и камеры сгорания. Поставлена задача обеспечения приемлемого теплового состояния ЖРДМТ как в непрерывном и импульсном режиме, так и в период длительного перерыва между включениями двигателя. Даны рекомендации по обеспечению эффективного охлаждения ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива азотный тетраоксид и несимметричный диметилгидразин, с тягой 9,81 Н (1 кгс).

Двухкомпонентное топливо, камера сгорания, форсуночная головка, тепловой поток.

Temperature margin of a low-thrust liquid rocket engine

Tatiana Sergeevna Abbasova, PhD in Engineering, Associate Professor,
Department of Information Technology and Control Systems,
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov» –
Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow State University of Geodesy and Cartography»,
Korolev, Moscow region

The characteristics of the most thermally critical components of a low-thrust liquid rocket engine (LTRE) – injector head, and combustion chamber – are analyzed. The objective is to ensure acceptable thermal performance of the LTRE in both continuous and pulsed modes, as well as during long pauses between engine starts. Recommendations are provided for ensuring effective cooling of LTREs using hypergolic propellants – nitrogen tetroxide and asymmetric dimethylhydrazine – with a thrust of 9.81 N (1 kgf).

Two-component fuel, combustion chamber, nozzle head, heat flow.

Введение

Жидкостные ракетные двигатели малой тяги (ЖРДМТ) являются основ-

ными двигателями, применяемыми в системах управления космических летательных аппаратов (КЛА), пилотируемых космических кораблях и т.д. Главным отличием ЖРДМТ от жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) является возможность работы как в импульсном режиме, так и в непрерывном режиме, в то время как ЖРД имеют возможность работать только в непрерывном режиме [9, С.2]. При проектировании ЖРДМТ важно обеспечить эффективную организацию жидкофазного смешения компонентов топлива и охлаждения камеры сгорания. Выполнение данных требований гораздо сложнее, чем в ЖРД из-за малых расходов компонентов топлива и малом числе форсунок. Актуально обеспечение приемлемого теплового состояния ЖРДМТ как в непрерывном и импульсном режиме, так и в период длительного перерыва между включениями двигателя.

Результаты исследования

При проектировании летательных аппаратов и их двигателей широко применяются методы машинного обучения [1, С.123], автоматического управления [2, С.70], анализа данных [3, С.77], полунатурного моделирования [4, С.68]. В системах ориентации, коррекции и стабилизации космического корабля, ориентации применяются ЖРДМТ, которые являются исполнительными органами этих систем наряду с датчиками и приборами маховичных и гиросиловых систем ориентации [10, С.18]. Эти двигатели работают в импульсном режиме и, как правило, по условиям технического задания (ТЗ) имеют бесчисленное сочетание времен включений и пауз.

Типовая конструкция ЖРДМТ приведена на рисунке 1, схема его работы – на рисунке 2.



Рисунок 1 – Пример конструкции двухкомпонентного ракетного двигателя малой тяги 17Д58Э

В соответствии с ТЗ, в ЖРДМТ не рекомендуется использовать регенеративное охлаждение, так как компонент топлива может закипеть в паузах между включениями, а это может привести к прогару стенки камеры сгорания, и как следствие повлечет за собой отказ двигателя [8, С.13]. Поэтому обеспечение теплового состояния ЖРДМТ во всех режимах его работы и ресурсе вызывает большие трудности при его проектировании.

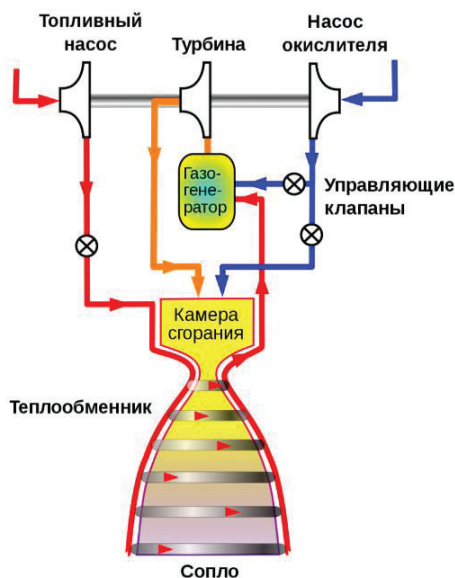


Рисунок 2 – Схема работы жидкостного ракетного двигателя малой тяги

Наиболее критичными элементами ЖРДМТ являются камера сгорания (КС) и форсуночная головка (ФГ). Надежность ЖРДМТ зависит от надежности КС и ФГ. Конструкция КС показана на рисунке 3.

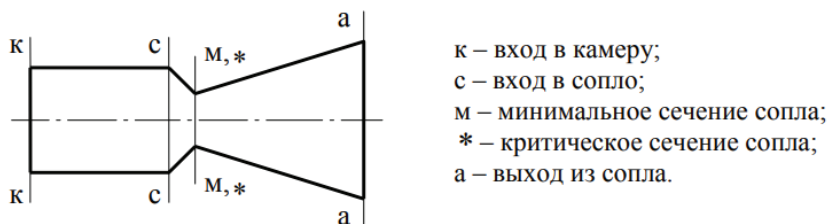


Рисунок 3 – Сечения камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги

Теплостойкость стенки КС ограничивает возможности использования высокоэнергетических топлив в ЖРДМТ при оптимальном, с точки зрения максимального удельного импульса, соотношении компонентов. В связи с тем, что двигатели (ЖРДМТ) системы управления работают в основном в импульсном режиме (десятки тысяч включений за время полета), надо провести анализ использования топлива, подаваемого в камеру двигателя за одно включение, и выявить, при каких параметрах ЖРДМТ использование топлива будет наиболее эффективным, с учетом поддержания стабильной и минимальной величины импульса последствия тяги.

Для эффективного смесеобразования в ЖРДМТ применяется двухкомпонентное топливо: окислитель (О) – АТ (азотный тетраоксид); горючее (Г) – НДМГ (несимметричный диметилгидразин). Исследованы характеристики двухкомпонентного двигателя, который работает на самовоспламеняющейся паре компонентов топлива АТ и НДМГ.

Управление тягой двигателя происходит путем подачи (для включения) или снятия (для выключения) командного напряжения на электромагнитные клапаны.

При включении двигателя напряжение подается одновременно на электроклапаны О и Г, а при выключении двигателя напряжение снимается одновременно со всех электроклапанов.

Компоненты топлива по трубопроводам подведены до уплотняющих элементов электроклапанов. После подачи напряжения электромагниты втягивают якоря, преодолевая усилие от давления компонентов топлива и усилия пружин, следовательно, открывая проходное сечение для подачи компонентов топлива.

Компоненты топлива, поступая в форсуночную головку, затем в камеру сгорания, распыляются, перемешиваются, самовоспламеняются и сгорают. Тяга двигателя создается за счет истечения продуктов сгорания через сопло камеры в окружающее пространство.

Дефлекторно-центробежная схема смесеобразования компонентов топлива на огневой стенке камеры сгорания предусматривает подачу всего окислителя и горючего на огневую стенку камеры сгорания, где происходит их жидкофазное смешение с одновременным охлаждением стенки камеры. Форсуночная головка (ФГ) изготавливается из титанового сплава и предназначена для организации смесеобразования компонентов топлива в камере сгорания.

На рисунке 4 показана модель взаимного проникновения и жидкофазного смешения компонентов топлива на огневой стенке КС при столкновении пленок О (попадает первым в КС вблизи ФГ) и Г. Для приведенной на рисунке 4 модели характерно, что дефлекторно-центробежная схема обеспечивает существенное охлаждение огневой стенки камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги вовремя его работы. Более эффективное охлаждение объясняется тем обстоятельством, что О течет по огневой стенке КС с длиной пробега больше, чем длина пробега Г, так как О попадает первым в КС и в качестве О используется топливо АТ, которое имеет большую охлаждающую способность.

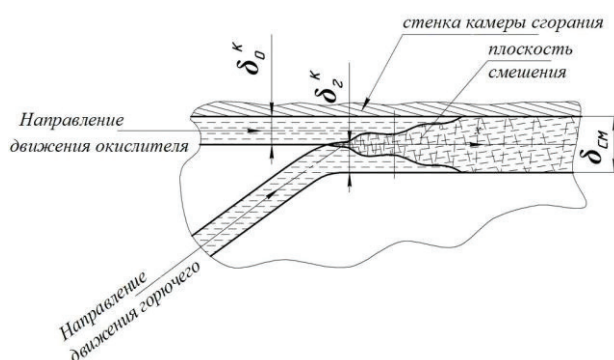


Рисунок 4 – Модель взаимного проникновения и жидкофазного смешения на огневой стенке камеры сгорания пленок окислителя и горючего

Для оценки температуры газа и дальнейшего расчета камеры сгорания и сопла необходимо провести термодинамический расчет в соответствии с методикой, указанной в [9, С.23].

Термодинамический расчет проведен в соответствии с параметрами, показанными на рисунке 5, с помощью программы «TERRA» определена температура в камере сгорания и на срезе сопла, а также молекулярная масса продуктов сгорания. Результаты термодинамического расчета представлены в таблице 1.

Исходные данные для расчета: давление в камере: $p_k = 0,85$ (МПа); геометрическая степень расширения сопла: $F(a)/F(kp) = 105$.

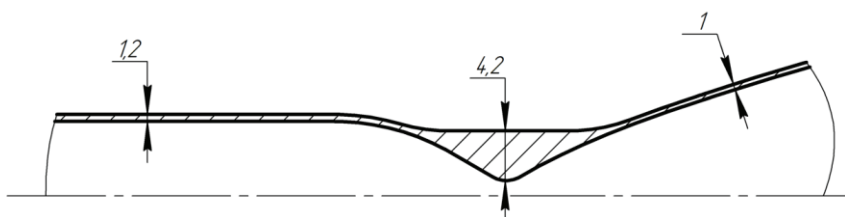


Рисунок 5 – Зона критического сечения сопла

Таблица 1 – Результаты термодинамического расчета

Параметр	Сечение	
	Камера сгорания	Срез сопла
Давление p , МПа	0,85	0,0005055
Температура T , К	2369,87	661,672
Молекулярный вес продуктов сгорания MMg , г/моль	19,32	20,12

Отличительной особенностью исследуемого ЖРДМТ, является дефлекторно-центробежная схема, где применяется схема организации рабочего процесса – горение происходит на стенке камеры сгорания. Данная схема обеспечивает образование на стенке КС жидкой пленки, смешение компонентов в жидкой фазе и тепловую защиту огневой стенки. Учитывая опыт АО «КБхиммаш им. А.М. Исаева», на рисунке 6 представлен температурный запас огневой стенки ЖРДМТ, из ниобиевого сплава с покрытием на основе дисицилида молибдена $MoSi_2$.

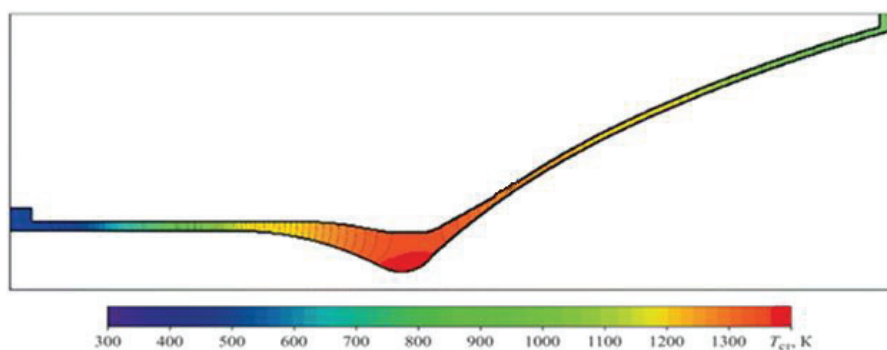


Рисунок 6 – Поля температур в конструкции камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги

Самым теплонапряженным участком является критическая часть сопла. Из данных рисунка 6 можно сделать вывод, что на этом участке температура стенки камеры сгорания достигает от 1200 К (926,85 °С) до 1400 К (1126,85 °С), в то время как допустимая температура для покрытия на основе дисцилида молибдена MoSi_2 составляет 1800 К (1526,85 °С). Это создаёт необходимый запас по температуре для исключения прогаров стенки камеры сгорания. Необходимый запас по температуре для исключения прогаров стенки камеры сгорания можно определить как разность между допустимой температурой и максимальной температурой на критической части сопла (1400 К).

Выводы

Проанализированы проблемы проектирования жидкостного ракетного двигателя малой тяги на самовоспламеняющихся компонентах топлива азотный тетраоксид и несимметричный диметилгидразин, с тягой 9,81 Н (1 кгс).

Проведен термодинамический расчёт с помощью программы «TERRA», получены температуры и молекулярные массы на срезе сопла и в камере сгорания. Выявлен самый теплонапряженный участок – критическая часть сопла, на котором температура стенки камеры сгорания достигает от 1200 К (926,85 °С) до 1400 К (1126,85 °С), в то время как допустимая температура для покрытия на основе дисцилида молибдена MoSi_2 составляет 1800 К (1526,85 °С). Определен необходимый запас по температуре для исключения прогаров стенки камеры сгорания, который составляет 400 К.

Литература

1. Аббасова Т.С., Ярыжко И.С. Применение больших данных и аналитики в космической науке / В сборнике: Русский космизм: история и современность. Место и роль науки и технологий в решении глобальных проблем современности. Сборник трудов по материалам VIII Всероссийской научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 122-131 (314 с.).
2. Artyushenko V.M., Abbasova T.S. Increasing the efficiency of satellite communication systems by optimizing the parameters of the ground stations // Radioengineering. 2015. № 2. С. 69-75.
3. Артюшенко В.М., Аббасова Т.С., Кучеров Б.А. Повышение эффективности систем спутниковой связи путем оптимизации параметров земных станций // Радиотехника. 2015. № 2. С. 76-82.
4. Воловач В.И., Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Синтез алгоритмов нелинейной обработки информационных параметров сигнала при воздействии узкополосных помех с негауссовским характером распределения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 3. С. 65-72.
5. ГОСТ 8.586.3-2005. Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования.
6. ГОСТ 17655-89. Государственный стандарт Союза ССР. Двигатели ракетные жидкостные. Термины и определения.

7. ГОСТ 10227-2013. Межгосударственный стандарт. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия.
8. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2005. 495 с.
9. Егорычев В.С. Термодинамический расчет и проектирование камер ЖРД [Текст]: учебное пособие / В.С. Егорычев, В.С. Кондрусев. Самара: СГАУ, 2009. 108 с.: ил.
10. Мелькумов Т.М., Мелик-Пашаев Н.И., Чистяков П.Г., Шиуков А.Г. Ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1976. 400 с.

УДК 629.782

Концептуальные основы решения проблемы обеспечения предельно высокой точности доставки головных частей (боевых блоков) баллистических ракет средней и межконтинентальной дальности к целевым объектам стационарного и мобильного базирования

Григорий Григорьевич Вокин, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник НИИ космических систем им. А.А. Максимова – филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», заведующий базовой кафедрой «Управление и информационные технологии в космических системах» Технологического университета им. А.А. Леонова при НИИ космических систем им. А.А. Максимова, г. Королев, Московская область

В статье предлагается адаптированный вариант дистанционно-кибернетической технологии транспортировки полезных грузов с использованием ракет применительно к доставке головных частей (боевых блоков) к целевым объектам с высокой точностью, то есть с точностью вплоть до прямого попадания в цель, что на порядок выше достигнутой точности.

В статье показано, что в связи с обеспечением высокоточной доставки к целевым объектам вероятного противника боевых средств поражения в безъядерном оснащении появляются реальные возможности достижения военно-стратегического паритета.

В итоге научно-технического анализа делается вывод о наличии реальных возможностей технической реализации выдвинутых предложений.

Точность попадания ракет, дистанционно-кибернетическая технология доставки, киберроботы, внешняя навигационная информация, стационарные и мобильные цели.

Conceptual foundation for solving the problem of ensuring extremely high accuracy of delivery of warheads of medium and intercontinental ballistic missiles to fixed and mobile targets

Grigory Grigorievich Vokin, D.Sc. (Tech.), professor, honored worker of science of the Russian Federation, Chief Scientific Officer of Space Systems Research Institute named after A.A. Maximov, Head of the basic Department of Technology university at the Space Systems Research Institute named after A.A. Maximov – a branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center, Korolev, Moscow region

The article proposes an adapted version of the remote cybernetic technology for transporting payloads using missiles in relation to the delivery of warheads to targets with high accuracy, that is, with accuracy up to a direct hit on the target.

The article also notes the emergence of the potential possibility of delivering nuclear-free weapons of mass destruction to the targets of a potential enemy, as a result

of which there are real opportunities to achieve defense-strategic parity.

As a result of the scientific and technical analysis it is concluded that there are real opportunities for the technical implementation of the above-mentioned proposals.

Missile hit accuracy, remote cybernetic delivery technology, cyberbots, external navigation information, stationary and mobile targets.

Введение

Современные баллистические ракеты по назначению можно квалифицировать как специальные транспортные средства для доставки полезного груза в целевой район или к целевому объекту за предельно короткое время полёта, при этом точность доставки, как правило, достаточна для поражения площадных целей или для вывода космических аппаратов на заданные орбиты.

С военной точки зрения наибольший интерес и связанные с ним проблемные ситуации представляют ракеты, которые могут обеспечивать высокую вероятность поражения точечных целей, представляющих собой элементы стратегического боевого потенциала вероятного противника как стационарного, так и мобильного базирования.

Вероятность поражения точечной цели определяется, в основном, как известно, величиной ошибки попадания, вероятностью доставки заряда к цели и величиной мощности заряда; при этом высокоточным попаданием, вплоть до прямого попадания, будем считать условно такую ситуацию, когда ошибка попадания не будет превышать геометрических размеров цели или точка падения заряда будет отстоять от цели на первые единицы-десятки метров. Будем считать, что мощность зарядов должна быть такой, чтобы его радиус поражения превышал размеры цели, имеющей определенный запас механической прочности. Такую мощность заряда будем именовать номинальной, при этом для уменьшения числа их градаций номинальную мощность целесообразно задавать с определенным коэффициентом запаса.

Учитывая высказанные соображения, можно заключить, что при условии использования номинальных зарядов, доставляемых для поражения заданных целей, основным показателем, определяющим вероятность поражения цели, будет являться дуэт таких характеристик, как точность доставки заряда и вероятность доставки. Эти две важнейшие характеристики определяются целым рядом других таких показателей ракет, как дальность стрельбы, вероятность преодоления системы противодействия, надежность работы всех систем и агрегатов ракеты и т.д. К настоящему времени для многих из упомянутых показателей достигнуты по существу предельные их значения, которые определяются технически допустимыми значениями характеристик конструкционных материалов, топлива и элементной базы.

Надо особо отметить, что исключением из этого ряда является точность попадания, высшее желаемое значение которой пока реально не достигнуто по ряду причин, которые будут указаны ниже с определением путей их преодоления. При этом надо особо подчеркнуть, что, говоря о повышении точности попадания, требуемая дальность стрельбы должна быть обеспечена по определению.

Почти за столетнюю историю активного становления и совершенствования ракет уместным будет назвать ключевые ступени развития, на которых достигались предельные значения ключевых характеристик ракет. Именно на этих этапах, благодаря внедрению новых научно-технических решений, серьезно изменялась конструкция ракет и существенно изменялись их функционально-боевые возможности.

Можно напомнить, хотя бы и кратко, важнейшие из упомянутых ключевых этапов совершенствования характеристик ракет и их функционально-боевых возможностей:

- существенное увеличение тяги ракетных двигателей за счет использования турбонасосных агрегатов для подачи топлива в камеру сгорания с учетом того обстоятельства, что предельная величина тяги определяется прочностью материалов двигательной установки;

- обеспечения возможностей полета баллистических ракет на межконтинентальную дальность (глобальную дальность в пределах Земли) и достижения космической скорости ракеты в конце активного участка траектории за счет установки на первой ступени ряда параллельных ракетных модулей, снабжённых топливом и ракетными двигателями, которые после интенсивной отработки отделяются в качестве первой ступени ракеты;

- создание многоканальной системы управления ракетой на основе использования гироскопических приборов, акселерометров и принципа обратной связи;

- устранение отрицательного влияния колебаний жидкого топлива в баках горючего путем установки соответствующих демпфирующих перегородок;

- создание устойчивого теплозащитного покрытия головных частей, основанного на использовании свойств сублимации твердых веществ.

Из других ключевых этапов совершенствования ракет, которые расширяют возможности ракет, дополнительно можно назвать следующие:

- использование твердого топлива в ракетных двигателях,
- создание разделяющихся головных частей с индивидуальным наведением боевых блоков,

- ампуализация жидкостных ракет,

- шахтное базирование ракет и базирование их на подвижных устройствах и железнодорожных платформах.

Как свидетельствует научно-технический ретроспективный анализ, возможности коренного повышения упомянутых характеристик ракет на каких-то новых этапах не предвидится в связи с фундаментальными ограничениями, связанными со свойствами, например, конструкционных материалов, комплектующих элементов, а также с экономическими ограничениями. В то же время из анализа следует, что имеются научно-технические возможности улучшения точности вплоть до прямого попадания в целевой объект. Это означает, что есть возможности обеспечить достижение предельного значения точности, то есть прямого попадания в цель, в том числе и в малоразмерную (точечную) цель.

С учетом использования упомянутых возможностей данная статья и нацелена на изложение концептуального подхода и на краткое описание новаторских научно-технических решений, при реализации которых может быть обеспечена предельно высокая точность попадания, но при этом не предвидится встреча с

фундаментальными ограничениями при технической реализации упомянутых подходов и решений.

1. Исходные предпосылки и функционально-целевая постановка проблемы обеспечения предельно высокой точности доставки головных частей (боевых блоков) ракет средней и межконтинентальной дальности к целевым объектам стационарного и мобильного базирования

Точность попадания, характеризуемая отклонением точки падения от расчетного ее положения, зависит, как известно, от достаточно большого числа факторов различной физической природы. Отклонение реальных их значений от значений, принимаемых при расчете полетного задания, приводит к соответствующим ошибкам отклонения по дальности и по боку. Значения реальных факторов при расчетах полетных заданий закладываются по результатам измерений или соответствующих оценок, которые, естественно, могут быть получены с использованием приборов, обладающих неустраняемыми до нулевых значений определенными ошибками.

К настоящему времени за почти столетнюю историю совершенствования ракет упомянутые факторы в значительной степени изучены и значения их определены с максимально возможной точностью. И тем не менее получаемая реально точность попадания головных частей (боевых блоков) в сильно укрепленные стационарные цели оказывается недостаточной.

К упомянутым факторам, влияющим на точность попадания, надо отнести, в первую очередь, следующие факторы:

- ошибки топографической привязки континентов;
- ошибки определения координат цели и старта;
- отклонение расчетных параметров атмосферы от реальных их значений;
- инструментальные и методические ошибки системы управления;
- ошибки прицеливания и определения уклонения линии отвеса;
- отклонение реальных параметров гравитационного поля Земли от параметров модели, используемой в расчетах;
- влияние асимметрии головных частей (боевых блоков), образующейся из-за неравномерности обгара теплозащитного покрытия;
- ошибки измерения габаритно-массовых характеристик ракеты и ее элементов и др.

Каждый из этих n , $n=1,2,\dots$ факторов вносит свою лепту ΔL_i в ошибку отклонения, например, по дальности:

$$\Delta L_i = \frac{\partial L_i}{\partial p_i} \Delta p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \Delta p_i - \text{величина отклонения параметра возмущающего фактора от значения, принимаемого в расчетах.}$$

На основе многочисленных оценок, особенно зарубежных, в настоящее время с учётом наиболее точных значений параметров упомянутых факторов есть основания сделать вывод о том, что, например, величина отклонения по дальности неуправляемых боевых блоков при поражении стационарных целей будет не менее 0,25-0,4 км. Что же касается попадания в подвижные цели, особенно, например, в подводные лодки, то вопрос во многом остается открытым, сложным и трудно решаемым.

Казалось бы, что достигнутый результат является вполне удовлетворительным, но это касается только случая, когда головная часть (боевой блок) имеет ядерное оснащение, а цель является стационарным точечным или площадным объектом.

По современным представлениям противоборство развитых стран на «ядерных» саблях является в высшей степени крайним случаем, ибо победы и победителей в этом случае, очевидно, не предвидится. Ядерное оружие принято считать сдерживающим средством, а вооруженная борьба должна вестись, в основном, обычными боевыми средствами с безъядерным оснащением. В связи с этим во втором варианте, как основном, неприемлемый ущерб должен наноситься головными частями в неядерном оснащении с предельно высокой точностью, то есть с точностью до прямого попадания в стационарную цель, а в случае необходимости поражения мобильных целей головная часть (боевой блок) должна обладать функцией доразведки ее координат. Насколько важна эта ситуация, достаточно сказать, что 80% ядерного потенциала США находится на мобильном базировании, причем на подводных лодках боевых блоков в два раза больше, чем на самолетах.

Учитывая изложенное и опираясь на результаты ретроспективного научно-технического анализа, есть основания сделать следующее заключение принципиального характера: если в сфере ядерных средств поражения военно-стратегический паритет к настоящему времени, как известно, достигнут, то для достижения такого паритета в сфере обычных средств поражения точность стрельбы современных баллистических ракет средней и межконтинентальной дальности оказывается совершенно недостаточной, при этом для достижения желаемого паритета ошибка попадания должна быть снижена не менее, чем на порядок.

В статье на принятом уровне общности излагается подход и приводятся новаторские научно-технологические предложения по решению упомянутых проблемных задач, при технической реализации которых не предвидится появление ограничений и трудностей фундаментального характера. В основу выдвигаемых предложений положена дистанционно-кибернетическая технология высокоточной доставки полезных грузов к целевым объектам с использованием баллистических ракет [1-10, 15-22].

2. Концептуальные основы и научно-технические решения по обеспечению предельно высокой точности доставки головных частей (боевых блоков) баллистических ракет средней и межконтинентальной дальности к целевым объектам стационарного и мобильного базирования

Как следует из анализа, неуправляемые боевые блоки не могут быть эффективными при поражении мобильных целей даже в случае использования ядерных зарядов. Упомянутые классические ББ оказываются недостаточно эффективными при поражении как стационарных целей с высокопрочной защитой, так и подвижных целей в случае использования даже ядерных зарядов.

Попытки использования инерциальных систем для управления традиционными ГЧ (ББ) не приводят к повышению их точности в связи с относительно длительным временем полета, но главным образом из-за наличия больших перегрузок

в атмосфере на нисходящем участке траектории (перегрузки для межконтинентальных ракет достигают 60-80 ед., для ракет средней дальности – примерно в 2 раза меньше). Попытки осуществить коррекцию движения с использованием внешней информации оказываются безрезультатными, так как температура теплозащитного покрытия и области ударного уплотнения достигают 2000...2500°C, что наглухо экранирует прохождение навигационной информации как в радиотехническом, так и в оптическом диапазонах электромагнитных волн.

Комплекс фундаментальных принципов оптимального управления и синтеза автоматических систем [3] в такого рода трудных ситуациях рекомендует, например, прибегать к таким вариантам мер, когда в процессе функционирования объектов управления, в данном случае ББ, должна изменяться структура системы управления. Объект управления должен обладать возможностями обеспечения высокоточной работы датчиков инерциальной и внешней информации, а также обладать, кроме того, возможностью быть управляемым. Эти условия выполняются при использовании выдвинутой в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века автором технологии – дистанционно-кибернетической технологии высокоточной доставки полезных грузов (зарядов, информационных датчиков и т.п.) к целевым объектам или их окрестностям [1,2,15-22].

В соответствии с этой технологией ББ должен состоять из теплозащитного корпуса (ТЗК), внутри которого будет компактно и экономно уложен автоматический летательный аппарат – киберробот и киберблок. ТЗК должен быть снабжен управляющими органами (выдвижными щитками или реактивными движками) для управления ББ по тангажу и курсу. В свою очередь киберробот может быть снабжен зарядом (ядерным или обычным), двигательной установкой, системой управления с каналами управления движением центра масс и относительного центра масс киберробота, а также может содержать датчики внешней навигационной информации и доразведки мобильных целей. Киберроботы как автоматически управляемые летательные аппараты могут быть самолетного или вертолетного типа. Алгоритмы управления реализуются с помощью бортовой достаточно производительной ЭВМ с использованием информации от датчиков различной физической природы и соответствующего назначения.

В краткой концептуальной форме изложим этапы полёта крылатого ББ в соответствии с заблаговременно рассчитанным полётным заданием. До входа в атмосферу крылатый ББ (ГЧ) летит по типовой схеме полёта ракеты и головной разделяющейся части в соответствии с полётным заданием.

Следуя этапам дистанционно-кибернетической технологии, реализацию программы полёта осуществляют путём обеспечения ориентированных по углу тангажа и крена входа в атмосферу ГЧ (ББ) и дальнейшего их полета по траектории, по виду близкой к настильной, с выходом в конце траектории на полет параллельно местному горизонту, при этом угол тангажа обеспечивает упомянутый желаемый вид программной траектории, а нулевой угол крена обеспечивает параллельность несущих поверхностей киберблока, например, самолетного типа, подстилающей поверхности Земли. При этом в полётном задании программные значения углов, координат, скоростей и других параметров задают в виде функций текущего времени, а отклонения текущих значений упомянутых параметров от

программных их значений отрабатываются соответствующими подсистемами системы управления кибербота (субблока).

Точка прицеливания может лежать в стороне от цели с таким расчетом, чтобы ББ мог обойти, например, зону досягаемости информационных и огневых средств противодействия. После входа в атмосферу начинает отрабатываться программа угла тангажа с таким расчетом, чтобы продольная ось ББ со временем стала параллельной местному горизонту на высоте порядка 2...5 км. При горизонтальном полете ГЧ (ББ) с увеличивающимся углом атаки скорость будет падать. Как показывают результаты моделирования, горизонтальный полет может продолжаться порядка первых десятков километров. После того, как скорость крылатого ББ станет, например, дозвуковой, отделяется с помощью пироболтов днище ББ, а с помощью пиротолкателя из теплозащитного корпуса выталкивается кибербот. При этом следует отметить, что кроме приведенного способа отделения ТЗК в работе [1] предложены и другие способы «освобождения» кибербота от элементов теплозащиты.

После отделения ТЗК через соответствующее мгновение кибербот приводится автоматически в рабочее состояние: включаются двигательная установка, все каналы системы управления и приводятся в рабочее положение несущие поверхности (крылья или лопасти винтов). Кибербот должен лететь на высоте 30-70 м с огибанием рельефа к объекту поражения. Одновременно должны работать координаторы коррекции движения по радиолокационным, оптическим или рельефным картам местности. В начале горизонтального полета закладываемые в память ЭВМ эталонные участки коррекции могут иметь большие размеры и более мелкий масштаб, а по мере подхода к целевому объекту площадь эталонных участков может сокращаться и повышаться при этом их масштаб. Из картографии известно, что масштаб карт жестко связан с точностью привязки объектов к местности. В связи с этим масштаб карт выбирается с учетом требуемой точности попадания. Очевидно, что коррекция движения киберботов может осуществляться также с использованием космической навигационной системы «Глонасс».

Подрыв заряда может осуществляться над объектом или после кабрирования-пикирования самонаводиться по образу цели. Очевидно, что точность попадания будет примерно равна точности привязки целевого объекта к используемой карте местности и при крупном масштабе эталонного участка точность попадания будет составлять первые метры, то есть может быть осуществлено прямое попадание в цель, особенно при самонаведении по образу цели. Можно полагать, что при такой точности попадания все объекты жизнеобеспечения мегаполисов могут быть выведены из строя обычными зарядами. Очевидно, что тогда при достаточном количестве киберботов (в зависимости от целевой обстановки) противнику на межконтинентальной дальности может быть нанесен неприемлемый ущерб. Это означает, что при использовании предлагаемого дистанционно-кибернетического оружия [1] может быть достигнут военно-стратегический паритет в области обычных вооружений. До появления дистанционно-кибернетического оружия такого паритета достигнуть было невозможно, потому что территория вероятного противника находится достаточно далеко, в то время, как его обычные высокоточные средства поражения располагаются вблизи наших границ.

Что же касается поражения подвижных объектов, например, подводных лодок, то, полагая, что их местоположение может быть известно только с точностью до района боевого патрулирования, предлагается направлять несколько киберроботов разделяющейся головной части с информационными датчиками в упомянутый район, располагая их в заданном порядке в водной среде. Отметим, что подводная лодка имеет много демаскирующих признаков (механический шум, большая металлическая масса, паразитные электромагнитные излучения и т.д.). При срабатывании одного или нескольких датчиков поражающий киберблок, барражирующий в районе поиска, может самонаводиться на возбуждавшийся датчик, при этом желательно, чтобы киберблок был оснащен в данном случае ядерным зарядом (для повышения эффективности поражения).

Таким образом, из изложенного следует, что выше на концептуальном уровне была представлена новаторская технология поражения стационарных и мобильных целей с высокой точностью ракетами средней и межконтинентальной дальности, то есть с точностью вплоть до прямого попадания, причем новизна технологии подтверждена соответствующими авторскими свидетельствами на изобретения [1,17-20].

3. Парадоксы оборонно-технического характера как следствие невосприятия новаторского решения поставленной проблемы

Из обобщения изложенных выше соображений можно сделать следующий вывод: для достижения предельно высокой точности попадания ГЧ (ББ) межконтинентальных ракет в целевые объекты на нисходящей ветви пассивного участка траектории необходимо выполнить ряд следующих функций, возможности технической реализации которых не вызывают сомнений, а именно:

- ориентированные по углам тангажа и крена вход в атмосферу и дальнейший полет ББ в атмосфере по программным их значениям;
- отделение (разделение на части) ТЗК на малой высоте и отвод его, предоставив возможности киберроботу (киберблоку) реализовать дальнейшие программные действия;
- приведение в рабочее состояние киберробота и полет его на малой высоте к целевому объекту с коррекцией (самонаведением) движения, используя при этом внешнюю навигационную информацию для выполнения заданий программы.

Из изложенного следует, что, во-первых, реализация предложения может обеспечить получение предельно высокой точности, получение которой при традиционном подходе, как показала практика, даже не ожидается, но новых подходов при этом не предлагается. Во-вторых, при доставке достаточного количества киберроботов в целевой район можно достигнуть оборонно-технического паритета в сфере средств поражения в обычном оснащении.

Возникает ситуация: нет полного признания упомянутых предложений, но нет и отрицания. Уместным в связи с этим будет напомнить, что изменение структуры конструкций посадочных средств при спуске космических аппаратов считается традиционным и привычным, а вот изменение структуры средств поражения при подходе к целям есть нечто необычное, как будто ГЧ и ББ являются, образно говоря, неприкасаемыми «священными коровами». Можно еще привести пример:

при применении нашей ракеты «Орешник» её головная часть разделяется на боевые элементы на относительно малой высоте при подходе к целевому району. В данном случае разделение конструкции ГЧ можно признать необходимым и успешным, при этом целевой объект поражается как площадной объект, потому что точность попадания упомянутой сверхзвуковой неуправляемой ГЧ невысока по определению.

В связи с этим появляются два парадокса оборонно-технического, а, может быть, точнее, оборонно-стратегического характера.

Парадокс № 1 – автором выдвинуто новаторское решение проблемы в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века, в том числе и на изобретательском уровне [1,2,17-20], но оно остается до настоящего времени почти незамеченным.

Парадокс № 2 – в результате решения поставленной проблемы появляются потенциальные возможности обеспечения оборонно-стратегического паритета в сфере обычного боевого оснащения и эффективного решения боевых задач на территории вероятного противника обычными средствами, но такие возможности, как можно понять, остаются почти невоспринятыми. По всей видимости, это очевидные заблуждения и ошибочные представления. В связи с этим есть основания сделать вывод: решить поставленную проблему традиционными способами – ошибочная цель, попытка решения проблемы в течение последних 50 лет не только не дала должных результатов, но они и не ожидаются в связи с фундаментальными ограничениями, однако, тем не менее на бесперспективные поиски ресурсы все еще тратятся. Как можно предположить, форма восприятия нового базируется, во многом, на психологической основе. Недаром и в шутку, и всерьез говорят, что процесс признания нового проходит в три этапа: 1) здесь нет ничего нового и полезного; 2) правда, здесь что-то есть: надо разобраться; 3) а что тут нового? Это все уже знают. Ничего не поделаешь: со скепсисом, с инерционностью мышления и с интересами людей надо считаться.

Заключение

Предложенные основные положения концепции высокоточной доставки головных частей (боевых блоков) баллистических ракет средней и межконтинентальной дальности к целевым объектам, базирующиеся на адаптивном использовании дистанционно-кибернетической технологии высокоточной доставки полезных грузов в предельно малую окрестность заданной точки за физически предельно малое время, являются, надо полагать, одним из заключительных ключевых этапов качественно-скачкообразного улучшения важнейших характеристик и функционально-боевых возможностей упомянутых выше классов ракет в ходе перманентно прогрессивного их развития.

В соответствии с упомянутой технологией качественное улучшение точностных характеристик ракет достигается на основе скачкообразного изменения конструкции головной части (боевых блоков) путем отделения теплозащитного корпуса на малой высоте и обеспечения дальнейшего движения автоматических летательных аппаратов-киберроботов, снабженных соответствующим оснащением (зарядами, датчиками информации и т.п.), к целевым объектам стационарного или мобильного базирования на малой высоте с огибанием рельефа местности и с коррекцией их движения на основе использования внешней навигационной

информации.

Есть основания ожидать, что достигаемые в результате реализации выдвигаемой концепции значения точностных характеристик и функционально-боевых возможностей упомянутых классов ракет могут позволить достигнуть военно-стратегического паритета и в сфере использования безъядерных средств поражения. Это означает, что наши боевые высокоточные дистанционно-кибернетические средства будут способны эффективно поражать объекты противника (средства боевого потенциала, элементы инфраструктуры мегаполисов и т.п.) на межконтинентальных дальностях с использованием соответствующего количества обычных средств поражения. При существующей расстановке и соотношения сил вероятный противник имеет возможность нанести обезоруживающий удар своими высокоточными средствами, так как его ударные силы базируются вблизи наших границ, в то время как цели противника для существующих наших высокоточных ударных сил являются недостижимыми, находясь на большом расстоянии. При реализации выдвигаемых предложений вероятный противник будет лишен упомянутых преимуществ, потому что с нашей стороны может быть реализован зеркальный ответ.

При использовании предполагаемых результатов решения проблемы обеспечения предельно высокой точности ГЧ (ББ) боевые возможности наших средств и вероятного противника с безъядерным оснащением будут уравниваться. Это означает, что при реализации предлагаемой технологии может быть достигнут баланс сил, в том числе и в безъядерном оснащении, что может быть залогом исключения прямого боевого противоборства. Для обеспечения безопасности страны это обстоятельство является, надо полагать, очень существенным. При этом надо добавить, что для технической реализации предложений нет фундаментальных ограничений, препятствующих внедрению в существующую систему вооружений дистанционно-кибернетической технологии доставки упомянутых средств поражения.

В заключение статьи уместным будет привести слова выдающегося конструктора вертолётов М.Л. Миля» «... всё или многое уже изобретено, осталось – сделать». Вещие слова, потому что в настоящее время вопросы реализации научно-технических предложений являются в высшей степени актуальными. Это непосредственно относится и к изложенным предложениям по вопросам качественного повышения точности стратегических ракет и связанных с этим вопросам создания дистанционно-кибернетического ракетного оружия.

Литература

1. Вокин Г.Г. Дистанционно-кибернетическое оружие – альтернатива оружию ядерному?: приглашение к размышлениям и к поиску решений. Москва-Королёв, ООО «Триада-С», 2024. 128 с.
2. Вокин Г.Г. Способ экстренной доставки средств спасения объектам, попавшим в экстремальные условия и терпящим бедствие в удаленных безлюдных районах земного шара с неточно известными координатами и аэробаллистическая система для его осуществления. Патент № 2076759 от 08.02.1993, бюллетень № 10, 1997 г., Комитет по патентам и товарным знакам.

3. Вокин Г.Г. О комплексе фундаментальных принципов, лежащих в основе оптимального управления процессами и синтеза автоматических систем. Труды МНТК «Кибернетика и высокие технологии 21 века, г. Воронеж, 2007. 143-147 с.
4. Вокин Г.Г., Бондаренко А.С., Конюхов С.Н. и др. Авторское свидетельство на изобретение № 212385 с приоритетом от 13 февраля 1979 г. Бюро изобретательства и рационализации РВСН Минобороны СССР.

УДК 531.71

Оценка точностных характеристик дальномерных радиотехнических систем с использованием квантово-оптических систем

Яна Юрьевна Ионченкова, старший преподаватель кафедры математики,
Евгений Кимович Самаров, доктор технических наук,
заведующий кафедрой математики,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет», г. Санкт-Петербург

Рассмотрен и проанализирован метод оценки точностных характеристик радиотехнических дальномерных измерительных средств с использованием измерений квантово-оптических систем. В качестве эталонных результатов были использованы сглаженные результаты измерений квантово-оптических систем, редуцированные к одним координатам и одному моменту времени с измерениями радиотехнических систем.

Космическая навигационная система, система координат, квантово-оптическая система, измерение дальности, погрешность измерения.

Evaluation of the accuracy characteristics of rangefinder radio systems using quantum-optical systems

Yana Yuryevna Ionchenkova, is a senior lecturer at the Department of Mathematics,
Evgeny Kimovich Samarov, Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of Mathematics,
St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg

The method of estimating the accuracy characteristics of radio-technical range-finder measuring devices using measurements of quantum-optical systems is considered and analyzed. Smoothed results of measurements of quantum-optical systems reduced to one coordinates and one moment of time with measurements of radio-technical systems were used as reference results.

Space navigation system, coordinate system, quantum optical system, range measurement, measurement error.

Введение. Решение задачи прецизионного определения эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов любой навигационной системы требует периодической оценки точностных характеристик дальномерных измерительных каналов радиотехнической системы [2].

Рассмотрим и проанализируем метод оценки точностных характеристик радиотехнической системы с использованием статистически сглаженных результатов дальномерных измерений квантово-оптической системы, редуцированных к одним координатам и одному моменту времени с измерениями радиотехнической системы.

Уравнение измерений дальности. Представим в геоцентрической экваториальной системе координат уравнение для расстояния между квантово-оптической системой и навигационными космическими аппаратами в виде [3]:

$$R(t) = \sqrt{\rho^2 + r^2 - 2\rho r(\cos\Omega t \cos\omega t + \cos i \sin\Omega t \sin\omega t)}, \quad (1)$$

где r – радиус Земли; $\rho = r + h$ – радиус орбиты навигационного космического аппарата; Ω – угловая скорость навигационного космического аппарата; ω – угловая скорость квантово-оптической системы; i – наклонение орбиты навигационного космического аппарата.

Приведем зависимость (1) к линейному виду относительно определяемых параметров. Для этого разложим функцию $R(t)$ в ряд Тейлора

$$\begin{aligned} R(t) = & h + \frac{\rho r}{h} [\Omega^2 + \omega^2 - 2\Omega\omega \cos i] \frac{t^2}{2!} - \\ & - \left\{ \frac{\rho r}{h} [(\Omega^2 + \omega^2 - 2\Omega\omega \cos i)^2 + 4\Omega^2\omega^2 \sin^2 i] + \right. \\ & \left. + \frac{3\rho^2 r^2}{h^3} (\Omega^2 + \omega^2 - 2\Omega\omega \cos i)^2 \right\} \frac{t^4}{4!} + \dots \end{aligned}$$

С учетом разложения в ряд Тейлора измеряемую величину дальности $R(t)$ на интервале сглаживания можно представить в виде полиномиальной функции, степень которой определяется принятой моделью траектории движения объекта:

$$R(t_i) = \alpha_0 + \alpha_1 t_i + \alpha_2 \frac{t_i^2}{2!} + \dots + \alpha_m \frac{t_i^m}{m!} + \varepsilon_i. \quad (2)$$

В этом случае уравнение измерений дальности (2) можно записать в матричном виде

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\varepsilon}_r, \quad (3)$$

где \mathbf{r} – вектор-столбец результатов N измерений, $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N]$; \mathbf{A} – матрица плана, связывающая текущие значения измерений дальности r_i с коэффициентами полинома $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m]^T$; T – математический знак транспонирования матрицы;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \frac{t_1^m}{m!} \\ 1 & t_2 & \frac{t_2^m}{m!} \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_N & \frac{t_N^m}{m!} \end{bmatrix}.$$

Метод максимального правдоподобия. Выражение для функции правдоподобия в векторно-матричной форме можно записать в виде

$$W(r/\alpha) = [(2\pi)^{N/2} |K_\varepsilon|^{1/2}]^{-1} \times \\ \times \left[-\frac{1}{2} (r - A\alpha)^T K_\varepsilon^{-1} (r - A\alpha) \right].$$

Дифференцируя $W(r/\alpha)$ по α и приравнявая к нулю, получаем выражение для максимально правдоподобной оценки α^* -вектора параметров α :

$$\alpha^* = (A^T K_\varepsilon^{-1} A)^{-1} A^T K_\varepsilon^{-1} r.$$

Для некоррелированных равноточных измерений метод максимального правдоподобия совпадает с методом наименьших квадратов. В этом случае оценка α^* -вектора параметров α будет иметь вид

$$\alpha^* = (A^T A)^{-1} A^T r.$$

На практике условие некоррелированности легко обеспечивается выбором шага измерений, приводящего интервал корреляции погрешностей.

Результирующая погрешность при полиномиальном сглаживании. Основной вклад в результирующую погрешность при полиномиальном сглаживании вносят случайные погрешности измерений. Их влияние на точность результатов обработки удобно характеризовать корреляционной матрицей ошибок оценки параметров α :

$$K_\alpha = \sigma^2 (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_0^2 k_{01} k_{0m} \\ k_{10} \sigma_1^2 k_{1m} \\ \dots \dots \dots \dots \\ k_{m0} k_{m1} \sigma_m^2 \end{bmatrix},$$

где σ^2 – дисперсия погрешности измерений ε .

Известно, минимальные значения погрешностей коэффициентов σ_i достигаются при ортогональной матрице плана A . В этом случае выражение (3) примет вид

$$r = F\beta + \varepsilon_r, \\ \text{где } F = \begin{bmatrix} \varphi_0(t_1) & \varphi_1(t_1) & \dots & \varphi_m(t_1) \\ \varphi_0(t_2) & \varphi_1(t_2) & \dots & \varphi_m(t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_0(t_N) & \varphi_1(t_N) & \dots & \varphi_m(t_N) \end{bmatrix} - \text{ортогональная матрица плана};$$

$\varphi_j(t_i)$ – ортогональные функции, например, полиномы Чебышева, для которых выполняется равенство $\sum_{i=1}^N \varphi_l(t_i) \varphi_k(t_i) = 0$ для всех $l \neq k$; $\beta = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m]^T$ – новый вектор параметров.

Полиномы Чебышева можно легко построить с помощью рекуррентного соотношения

$$\begin{cases} \varphi_0(t); \\ \varphi_1(t) = t - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^N t_i; \\ \dots\dots\dots \\ \varphi_{j+1}(t) = (t + \gamma_1)\varphi_j(t) + \gamma_2\varphi_{j-1}(t), \end{cases}$$

$$\text{где } \gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \varphi_j^2(t_i)}{\sum_{i=1}^N \varphi_j^2(t_i)}; \gamma_2 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \varphi_{j-1}^2(t_i) \varphi_j^2(t_i)}{\sum_{i=1}^N \varphi_{j-1}^2(t_i)}.$$

При использовании ортогональной матрицы плана корреляционная матрица ошибок оценки параметров \mathbf{K}_β становятся диагональной, а также существенно упрощается определение вектора параметров β . При необходимости могут быть рассчитаны параметры α с помощью следующих формул:

$$\begin{aligned}\alpha_m &= \beta_m m! ; \\ \alpha_{j-1} &= (\beta_{j-1} - \beta_j)(j-1)! + \frac{\alpha_j}{j}(1 - k_j),\end{aligned}$$

где $k_j = \frac{\sum_{i=1}^N t_i^j \varphi_{j-1}(t_i)}{\sum_{i=1}^N \varphi_{j-1}(t_i)}$.

Так как в техническом задании в месте расположения квантово-оптической системы, как правило, указывают требования к погрешности «сжатых» точек, то наибольший интерес представляют дисперсии сглаженных измерений.

Дисперсии сглаженных измерений. Погрешности статистического сглаживания результатов измерений характеризуются корреляционной матрицей

$$\mathbf{K}_r = \sigma^2 \mathbf{F}(\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T,$$

Откуда можно получить выражение для дисперсии сглаженных значений

$$D(r_n^*) = \sigma^2 \sum_{j=1}^m \frac{\varphi_j^2(t_n)}{\sum_{i=1}^N \varphi_i^2(t_n)}, n = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Очевидно, что в качестве «сжатой» точки на интервале сглаживания следует выбирать ту, дисперсия которой минимальна.

Исследуем выражение (4) при использовании в качестве сглаживающей функции полиномов различных степеней.

Полагая шаг измерений по времени τ постоянным, получаем аналитические выражения для дисперсии сглаживания данных:

1) в качестве сглаживающей функции используем полином первой степени

$$r_n^* = \beta_0^* + \beta_1^* \varphi_1(t_n),$$

тогда

$$D(r_n^*) = \sigma^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{12}{N(N^2-1)} \left(n^2 - \frac{N+1}{2} \right)^2 \right].$$

Найдем точку минимума дисперсии $D(r_n^*)$: $n_{\min} = \arg \min[D(r_n^*)] =$

$\frac{N+1}{2}$, то есть минимум достигается в середине интервала сглаживания. Дисперсия сглаженного значения в этой точке $D(r_n^*) = \frac{\sigma^2}{N}$;

2) в качестве сглаживающей функции используем полином второй степени

$$r_n^* = \beta_0^* + \beta_1^* \varphi_1(t_n) + \beta_2^* \varphi_2(t_n),$$

тогда

$$D(r_n^*) = \sigma^2 \left\{ \frac{1}{N} + \frac{12}{N(N^2-1)} \left(n^2 - \frac{N+1}{2} \right)^2 + \frac{180}{N(N^2-1)(N^2-4)} \left[\left(n^2 - \frac{N+1}{2} \right)^2 - \frac{N^2-1}{12} \right]^2 \right\}.$$

Третье слагаемое обращается в нуль при $n_{1,2} = \frac{N+1}{2} \pm \sqrt{\frac{N^2-1}{12}}$, то есть, в точках $n_{1,2}$ сглаживание полиномом второй степени совпадает со сглаживанием полиномом первой степени.

Минимум $D(r_n^*)$ достигается в точках

$$n_{\min} = \frac{N+1}{2} \pm \sqrt{\frac{N^2+1}{20}}.$$

Минимальная дисперсия сглаженного измерения составляет

$$D(r_n^*) = \frac{3}{5} \frac{(3N^2-2)}{N(N^2-1)} \sigma^2.$$

Для предельного случая, когда на фиксированном интервале $L = (N-1)\tau$, $N \rightarrow \infty$, $\tau \rightarrow 0$:

$$t_{\min} = \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{5} \right) L.$$

Таким образом, при сглаживании результатов измерений полиномом второй степени минимум достигается не в середине интервала, а в точках, расположенных симметрично относительно нее. Выигрыш в точности за счет оптимальной привязки сглаженного значения по сравнению с привязкой в середине интервала составляет 20-25% в зависимости от величины N :

$$\frac{D(r_n^*)}{D(r_{\text{ср}}^*)} = \frac{4}{5} \frac{(N^2-4)(3N^2-2)}{(N^2-1)(3N^2-7)}.$$

3) в качестве сглаживающей функции используем полином третьей степени

$$r_n^* = \beta_0^* + \beta_1^* \varphi_1(t_n) + \beta_2^* \varphi_2(t_n) + \beta_3^* \varphi_3(t_n),$$

тогда

$$D(r_n^*) = \sigma^2 \left\{ \frac{1}{N} + \frac{12}{N(N^2-1)} \left(n^2 - \frac{N+1}{2} \right)^2 + \frac{180}{N(N^2-1)(N^2-4)} \times \right. \\ \times \left[\left(n^2 - \frac{N+1}{2} \right)^2 - \frac{N^2-1}{12} \right]^2 + \frac{2800}{N(N^2-1)(N^2-4)(N^2-9)} \times \\ \left. \times \left(n - \frac{N+1}{2} \right)^2 \left[\left(n - \frac{N+1}{2} \right)^2 - \frac{3N^2-7}{20} \right]^2 \right\}.$$

Четвертое слагаемое обращается в нуль при $n_1 = \frac{N+1}{2}$, $n_{2,3} = \frac{N+1}{2} \pm \sqrt{\frac{(3N^2-7)}{20}}$, то есть, в точках n_1 и $n_{1,2}$ сглаживание полиномом третьей степени совпадает со сглаживанием полиномом второй степени.

Найдем точку минимума дисперсии $D(r_n^*)$:

$$n_{\min} = \arg \min[D(r_n^*)] = \frac{N+1}{2}.$$

Глобальный минимум дисперсии сглаживания достигается в середине интервала $n_{\min} = \arg \min[D(r_n^*)] = \frac{N+1}{2}$. Дисперсия сглаженного значения в этой точке

$$D(r_n^*) = \frac{3(3N^2-7)}{4N(N^2-4)}.$$

Локальные минимумы дисперсии сглаживания достигаются в точках

$$n_{\min(2,3)} = \frac{N+1}{2} \pm \sqrt{\frac{(33N^2-17)+2\sqrt{36N^4+507N^2-2579}}{420}},$$

а локальные максимумы дисперсии сглаживания в точках

$$n_{\max(1,2)} = \frac{N+1}{2} \pm \sqrt{\frac{(33N^2-17)-2\sqrt{36N^4+507N^2-2579}}{420}}.$$

В предельном случае ($N \rightarrow \infty, \tau \rightarrow 0$):

$$t_{\min} = L/2; t_{\min(2,3)} = \left(\frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{7}} \right) L; t_{\max(1,2)} = \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2\sqrt{5}} \right) L.$$

Глобальные максимумы дисперсии сглаживания достигаются в крайних точках интервала сглаживания. Дисперсию сглаживания в этих точках можно найти в явном виде из выражения (4) для полинома степени k :

$$D(r_N^*) = \sigma^2 \sum_{j=0}^k \frac{(2j+1)(N-1)(N-2)-(N-j)}{N(N+1)(N+2)-(N+j)}.$$

Зависимости дисперсии сглаживания от положения точки внутри интервала сглаживания для полиномов первой ($k = 1$), второй ($k = 2$) и третьей ($k = 3$) степени при количестве измерений $N = 21$ и среднеквадратическом отклонении единичного измерения $\sigma = 10$ см приведены на рисунок 1.

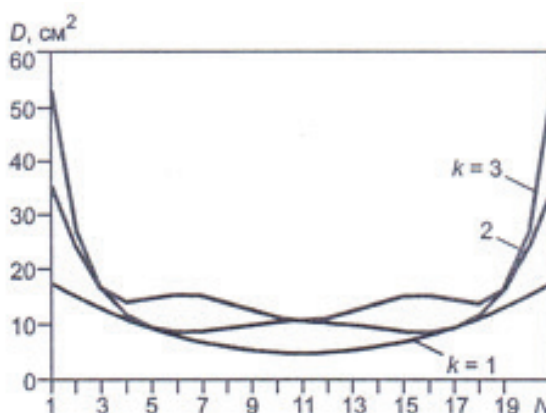


Рисунок 1 – Зависимость дисперсии сглаживания от положения точки внутри интервала сглаживания

Можно заметить, что точки локальных максимумов дисперсии сглаживания для полинома третьей степени в предельном случае совпадает с точками минимумов для полинома второй степени.

Как показали проведенные расчеты, аналогичное явление наблюдается и для пар полиномов более высоких степеней: пятой – четвертой, седьмой – шестой и т.д. Кроме того, данные точки совпадают с точками проведения измерений в задаче оптимального планирования измерений в задаче оптимального планирования регрессивного эксперимента. Конкретные значения определяются как решение задачи по максимизации значения функционала $|Z|^2 = \prod_{i < j} (x_i - x_j)^2$, причем $x_i, x_j \in [-1; 1]$.

Значения оптимальных точек проведения измерений (точек локальных максимумов дисперсии сглаживания) для полиномов некоторых степеней приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения точек локальных максимумов для различных степеней полиномов

Степень полинома	Точки локальных максимумов
1	-1; 1
2	-1; 0; 1
3	-1; -0,4472; 0,4472; 1
4	-1; -0,6547; 0; 0,6547; 1
5	-1; -0,7651; -0,2852; 0,2852; 0,7651; 1
6	-1; -0,8302; -0,4689; 0; 0,4689; 0,8302; 1

Таким образом, может быть предложена следующая методика определения точек оптимальной привязки:

для полиномов нечетных степеней: середина интервала сглаживания;

для полиномов четных степеней: по таблице планирования регрессивного эксперимента для полинома выбранной степени плюс единица отыскивается пара

точек, наиболее близких к нулю (в этих точках достигается глобальный минимум дисперсии сглаживания) $\pm a_1$, затем определяются точки оптимальной привязки по формуле

$$t_{\min} = \left(\frac{1}{2} \pm \frac{a_1}{2} \right) L.$$

Как отмечалось выше, особенностью измерений дальности с помощью квантово-оптических систем является неравномерное поступление измерений, главным образом из-за атмосферных условий. Наличие пропусков приводит к тому, что зависимость дисперсии сглаженных значений несколько изменяется по сравнению с изображенной на рисунке 1. Количество локальных максимумов и минимумов на интервале сглаживания остается постоянным, однако положение оптимальных точек привязки смещается в сторону более частого поступления измерений.

Как показали проведенные исследования, для полиномов нечетных степеней точкой оптимальной привязки является среднее арифметическое моментов проведения измерений

$$t_{\min} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i.$$

В общем случае для определения точек оптимальной привязки сглаженных значений при произвольной сетке измерений может быть предложена следующая методика:

- 1) по формуле (4) определить дисперсию сглаживания $D(r_i^*)$ в точках измерений t_i ;
- 2) определить коэффициенты интерполирующего полинома $D(t_i)$ степени $2m$, где m – степень полинома сглаживания $r^*(t_i)$;
- 3) найти точку глобального минимума $t_{\text{опт}}$ зависимости $D(t_i)$, для которой можно рассчитать $r^*(t_{\text{опт}})$. Данное значение можно использовать в качестве эталонного при проверке (аттестации) радиотехнических дальномерных измерительных средств.

Приведенные выше рассуждения полностью справедливы, если степень сглаживающего полинома совпадает со степенью полинома, описывающего изменение измеряемого параметра, и имеется достаточно большое число измерений на интервале сглаживания. На практике, поведение измеряемого параметра не всегда известно априори, а специфика измерений квантово-оптической системы такова, что не на каждый запросный импульс поступает ответ, что приводит к малому количеству на интервале сглаживания.

Выбор степени сглаживающего полинома по результатам измерений. Так как нас интересует оценка измеряемых параметров, в частности дальности до космического аппарата, то в качестве критерия целесообразно выбрать минимум квадрата ошибки сглаживания

$$\Delta^2 = \{D(r^*) + Sm(r^*)\} \rightarrow \min,$$

где $Sm(r^*)$ – квадрат смещения оценки параметра r , характеризующий динамическую погрешность метода сглаживания.

Известны два основных подхода к выбору степени сглаживающего полинома [1]. Первый из них ставит задачу найти такую степень сглаживающего полинома, при которой ожидается минимальная дисперсия сглаженных значений. Выражение для дисперсии совокупных сглаженных значений имеет вид

$$\Delta_n^2 = M[W_n^2] - [N - 2(n + 1)]\sigma^2,$$

где $M[W_n^2]$ – математическое ожидание суммы квадратов отклонений сглаженных значений от результатов измерений для полинома степени n ; N – число измерений.

Сумма квадратов отклонений при $n = k$ (k – степень полинома, описывающего изменение измеряемого параметра) представляет собой несмещенную оценку математического ожидания величины W_n^2 . Поэтому случайная величина

$$\Delta_n^{2*} = W_n^2 - [N - 2(n + 1)]\sigma^2 \quad (5)$$

является несмещенной оценкой дисперсии Δ_n^2 . Степень n_1 , при которой оценка (5) минимальна, можно считать наилучшей для сглаживания.

Второй подход к выбору сглаживающего полинома реализуется в форме проверки статистических гипотез о зависимости коэффициентов сглаживающего полинома. Проверка на значимость коэффициентов полинома степени выше n тождественна проверке гипотезы о том, что статистика W_n^2 имеет распределение $\sigma^2 \chi^2$ с $N - n - 1$ степенями свободы.

Выбор степени сглаживающего полинома по данной схеме осуществляется следующим образом. Результаты измерений $r(t)$ сглаживают полиномами возрастающей степени n , вычисляют статистику W_n^2 и проверяют каждый раз выполнение неравенства

$$W_n^2 < \sigma^2 \chi_p^2(N - n - 1), \quad (6)$$

где $\chi_p^2(N - n - 1)$ – табличное значение распределения χ^2 с $N - n - 1$ степенями свободы при доверительной вероятности P .

В качестве подходящего сглаживающего полинома принимают тот, при котором впервые будет выполняться условие (6).

Достоинство первого критерия в том, что он не имеет явной смещенности. Однако проверка статистических гипотез в этом случае производится, начиная с минимального числа степеней свободы, в то время как во втором случае – начиная с максимального их числа.

Недостатком второго критерия является его смещенность: при используемых обычно больших значениях доверительной вероятности критерий в среднем дает заниженную степень полинома. Однако второй критерий имеет большое преимущество, которое, оставаясь, по существу, техническим, тем не менее, очень важно.

Степень сглаживающих полиномов в практике статистической обработки

навигационных измерений квантово-оптической системы сравнительно невелики, в то время как количество измерений может быть достаточно большим. Если априорные сведения о спектре исследуемого процесса отсутствуют, то первый критерий требует проверки всех ортогональных полиномов до $(N - 1)$ -го порядка включительно. Вместе с тем, применение ортогональных полиномов высоких порядков весьма нежелательно, так как погрешности вычислений на ЭВМ быстро растут с увеличением степени полинома.

Статистика W_n^2 , на которой основан второй критерий, несет в себе информацию о всей оставшейся части спектра исследуемого процесса – от $r = k + 1$ до $r = N - 1$. При срабатывании второго критерия можно получить оценки относительно этой части спектра. Поэтому при выборе сглаживающего полинома по второму критерию практически не приходится вычислять полиномы очень высоких степеней.

Кроме описанных выше подходов, можно, имея некоторую априорную информацию, принимать решение о степени полинома на основании явных формул, описывающих величину Δ_n^2 .

Приведенные исследования показали, что несмотря на существенные различия дисперсии сглаженных значений, внутри интервала сглаживания тот полином, который имеет минимальный средний квадрат ошибки сглаживания на всем интервале – имеет минимальный квадрат ошибки сглаживания в каждой точке данного интервала.

Для полинома степени n квадрат ошибки сглаживания в некоторой точке внутри интервала определяется выражением

$$\Delta_{ni}^2 = D(r_{ni}^*) + S m_{ni}(r_{ni}^*) = \sigma^2 \sum_{j=0}^n \frac{\varphi_j^2(t_i)}{\sum_{m=1}^N \varphi_j^2(t_m)} + \left[\sum_{j=n+1}^k \beta_j \varphi_j(t_i) \right]^2,$$

где k – степень полинома, описывающего изменение измеряемого параметра.

Тогда, полагая, что $n_1 > n_2$, получим

$$\Delta_{n_1}^2 - \Delta_{n_2}^2 = \sigma^2 \sum_{j=n_2+1}^{n_1} \frac{\varphi_j^2(t_i)}{\sum_{m=1}^N \varphi_j^2(t_m)} - \left[\sum_{j=n_2+1}^{n_1} \beta_j \varphi_j(t_i) \right]^2 - \\ - 2 \sum_{m=n_1+1}^k \sum_{j=n_2+1}^{n_1} \beta_m \beta_j \varphi_m(t_i) \varphi_j(t_i).$$

Таким образом, если $\Delta_{n_1}^2 - \Delta_{n_2}^2 > 0$, то полином степени n_1 лучше, чем полином степени n_2 .

Наиболее наглядные выражение получаются, когда $n_1 = k$, $n_2 = k - 1$. В этом случае

$$\Delta_k^2 - \Delta_{k-1}^2 = \sigma^2 \frac{\varphi_k^2(t_i)}{\sum_{m=1}^N \varphi_k^2(t_m)} - \beta_k^2 \varphi_k^2(t_i) = \varphi_k^2(t_i) \left[\frac{\sigma^2}{\sum_{m=1}^N \varphi_k^2(t_m)} - \beta_k^2 \right],$$

$$\text{то есть } \Delta_{k-1}^2 < \Delta_k^2, \text{ если } \beta_k^2 < \frac{\sigma^2}{\sum_{m=1}^N \varphi_k^2(t_m)}.$$

В общем случае можно показать, что

$$\Delta_{k-1}^2 < \Delta_k^2, \text{ если } \beta_k^2 < \frac{\sigma}{T^k} \frac{2^k(2k-1)!!}{k!} \sqrt{\frac{2k+1}{N(N^2-1)(N^2-k^2)}}.$$

Величина выигрыша в точности сглаживания в зависимости от положения точки внутри интервала сглаживания определяется величиной $\varphi_k^2(t_m)$, то есть максимальный выигрыш будет в точках локальных максимумов полинома $\varphi_k^2(t_m)$ и на краях интервала.

В частности, при $k = 2$ точкой локального максимума является

$$m_m = \frac{N+1}{2}; \text{ при } k = 3 - m_{m,2} = \frac{N+1}{2} \pm \sqrt{\frac{3N^2-7}{60}}.$$

Приведенные выше критерии предполагают, что априори известна дисперсия ошибок измерений σ^2 . Если сведения об этой величине полностью отсутствуют, то решение вопроса о выборе степени полинома основывается на использовании статистики R_n , представляющей собой оценку коэффициента автокорреляции при единичном сдвиге для отклонений измеренных величин от их сглаженных полиномов степени n значений:

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} [r(t_i) - r_n^*(t_i)][r(t_{i+1}) - r_n^*(t_{i+1})]}{\sum_{i=1}^{N-1} [r(t_i) - r_n^*(t_i)]}.$$

Величина R_n определяет взаимную коррелированность отклонений, взятых из одной совокупности, а именно коррелированность всех пар соседних значений $[r(t_i) - r_n^*(t_i)]$.

В случае равноотстоящих измерений первые два момента распределения случайной величины R_n имеют вид

$$M[R_n] = -\frac{n+1}{N}; D[R_n] = -\frac{(N-n-2)^2(N+n+1)}{N^2(N-1)(N-n+1)}.$$

Если степень сглаживающего полинома $r^*(t)$ равна степени полинома измеряемого параметра $r(t)$, то есть $n = k$, то распределение статистики R_n не зависит от величины σ^2 . С увеличением числа степеней свободы $\mu = N - n - 1$ распределение R_n стремится к нормальному закону. Строя для статистики R_n доверительный интервал, как для нормального закона, можно проверять гипотезы о степени полинома измеряемого параметра.

Гипотеза $n = k$ принимается при выполнении условия

$$R_n > M[R_n] + u_p \sqrt{D[R_n]},$$

где u_p – квантиль нормального закона распределения при уровне вероятности P .

Исследования показали, что при высоком уровне доверительной вероятно-

сти P , данный критерий в среднем занижает значение степени истинного полинома. Величина σ_n^{*2} является несмещенной оценкой дисперсии ошибок измерений лишь при отсутствии методической ошибки сглаживания, то есть при $n = k$. Поэтому при использовании данного критерия получается в среднем завышенная оценка дисперсии σ^2 . Однако в условиях малой выборки наилучшим сглаживающим полиномом по критерию минимума среднего квадрата ошибок сглаживания чаще всего оказывается полином, степень которого меньше истинной, поэтому использование статистики R_n является оправданным.

Зависимость среднего квадрата ошибки сглаживания для точки оптимальной привязки от количества измерений, включенных в обработку, при использовании полиномов второй ($k = 2$), третьей ($k = 3$) и четвертой ($k = 4$) степени приведена на рисунке 2.

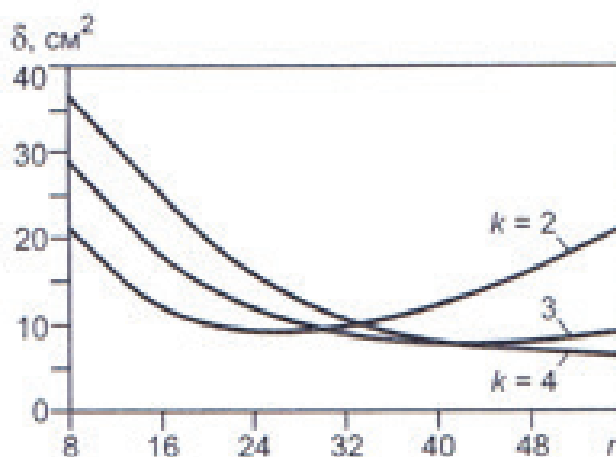


Рисунок 2 – Зависимость среднего квадрата ошибки сглаживания для точки оптимальной привязки от количества измерений, включенных в обработку

Заметим, что в качестве модели измеряемого параметра, при получении данных зависимостей, использовалось выражение (1).

Заключение. Таким образом, методика оценки погрешности измерений дальности запросных измерительных каналов радиотехнических систем с использованием измерений квантово-оптических систем сводится к следующему:

производится накопление и обработка не менее синхронных сеансов измерений радиотехнических систем и квантово-оптических систем по каждому выбранному навигационному аппарату;

вычисляются средние отклонения достоверных измерений каждого сеанса радиотехнической и квантово-оптической систем от расчетных аналогов, полученных с привлечением эталонных орбит;

определяются разности средних отклонений измерений этих систем в синхронных сеансах;

после отбраковки аномальных измерений вычисляются средние значения рассогласований для каждого навигационного космического аппарата, которые

являются оценками юстировочной поправки запросного дальномерного канала радиотехнической системы;

по каждому каналу навигационного космического аппарата вычисляется последовательность оценок систематической погрешности измерений достоверных сеансов с учетом ввода юстировочных поправок;

определяется максимальное по абсолютной величине значение оценки систематической погрешности для каждого навигационного аппарата;

если указанные значения для всех навигационных космических аппаратов не превышают погрешности запросных измерений радиотехнических систем, заданных в технических заданиях, то оцениваемый измерительный канал признается годным для применения с заданными точностными характеристиками.

Литература

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 2000. 480 с.
2. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Под ред. П.П. Дмитриева, В.С. Шебшаевича. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
3. Тихонравов М.К. Элементы теории полета и элементы проектирования искусственных спутников Земли. М.: Машиностроение, 1974. 331 с.

УДК 621.317.335.3

Погрешность измерений диэлектрических параметров электроизоляционных материалов методом вариации длины резонатора

Артем Владимирович Артюшенко, ассистент кафедры КЗ,
ФГБОУ ВО Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Мытищи, Московская область

Рассмотрена и проанализирована погрешность измерений диэлектрических параметров ε , $\operatorname{tg}\delta$ в цилиндрическом объемном резонаторе с колебанием H_{01p} методом вариации длины резонатора при неизменной резонансной частоте. Численно исследованы зависимости погрешности ε , $\operatorname{tg}\delta$ от электрической толщины исследуемого образца и его диэлектрической проницаемости ε .

Резонатор, диэлектрическая проницаемость, добротность, доверительная погрешность измерения.

Measurement error of dielectric parameters of electrical insulating materials by the method of resonator length variation

Artem Vladimirovich Artyushenko, assistant of the K3 department,
FSBEI HE Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University,
Mytishchi, Moscow region

The error of measurements of dielectric parameters ε , $\operatorname{tg}\delta$ in a cylindrical volume resonator with oscillation H_{01p} by the method of variation of the resonator length at a constant resonant frequency is considered and analyzed. The dependences of the error ε , $\operatorname{tg}\delta$ on the electrical thickness of the studied sample and its dielectric constant ε are numerically investigated.

Resonator, dielectric constant, quality factor, confidence interval of measurement.

Введение.

Как известно, цилиндрический объемный СВЧ-резонатор с колебанием H_{01p} широко применяется для измерений диэлектрических параметров материалов ε и $\operatorname{tg}\delta$ как в промышленности, так и в эталонных метрологических лабораториях [4-6]. Теория метода и примеры его конкретной технической реализации изложены в многочисленных публикациях, включая рекомендации МЭК [2] и отечественные нормативные документы [1].

В [3] показано, что существующие стандартные методики измерений с помощью резонатора данного типа [1, 2] содержат ряд допущений, приводящих к значительным погрешностям при измерении диэлектрических потерь слабо поглощающих материалов.

Изложенные в [1] требования к точности измерительной аппаратуры и

оценки точности конечных результатов измерений не содержат оценок, составляющих общей погрешности, что не позволяет выбрать оптимальные условия для повышения точности измерения.

Рассмотрим составляющие общей погрешности измерения ε и $\operatorname{tg}\delta$ и проанализируем возможности повышения точности измерения этих величин на примере резонатора с колебанием H_{014} .

Погрешности измерения ε и $\operatorname{tg}\delta$.

Для определения диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ используются ряд экспериментально измеряемых параметров, среди которых: геометрическая длина полого цилиндрического резонатора L , смещение подвижного поршня ΔL , и другие величины.

Погрешность измерения ε_1 и $\operatorname{tg}\delta$ зависят от коэффициента заполнения K_{1E} [3], равного отношению энергии электрического поля в образце к полной энергии резонатора с образцом. Диапазон измеряемых значений можно расширить применением образцов различной толщины [1], то есть изменением коэффициента заполнения.

Поскольку диэлектрическая проницаемость определяется косвенным методом, её значение вычисляется на основе совокупности измеренных величин с применением соответствующего аналитического выражения, выведенного из теории резонансных измерений

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{c}{2\pi f_0}\right)^2 \left[\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{v_{11}}{a}\right)^2\right],$$

где $c = 2,99792458 \times 10^{11}$ мм/с – скорость света; x – толщина, электрическая, образца (умноженное на 2π число длин волн в образце, рад), которая находится из трансцендентного уравнения

$$F(x, t, \Delta L, h_2) \equiv \frac{\operatorname{tg} x}{x} - \frac{\operatorname{tg}[h_2(t + \Delta L)]}{h_2 t} = 0, \quad (1)$$

где $h_2 = \sqrt{(2\pi f_0)^2 \frac{\varepsilon_2}{c^2} - \left(\frac{v_{11}}{a}\right)^2}$ – продольное волновое число в незаполненной части резонатора; ε_2 – значение резонаторной проницаемости; $v_{11} = 3,831706$ – корень функции Бесселя; $a = D/2$ (D – диаметр резонатора).

Доверительную погрешность U_{ε_1} измерения диэлектрической проницаемости можно найти, зная погрешности u_i величин $f, t, a, x, \varepsilon_2$.

При допущении равномерного распределения ошибок измерения, некоррелированности отдельных составляющих и при доверительной вероятности 0,95, обобщённая оценка погрешности может быть представлена в следующем виде:

$$U_{\varepsilon_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{i=1}^5 C_i^2 (\delta u_i)^2}.$$

Здесь $\delta u_i = \Delta u_i / u_i$ – задаваемая при расчете граница относительной погрешности i -й входной величины с коэффициентом влияния $C_i = \frac{u_i}{\varepsilon_1} \left(\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial u_i} \right)$.

Коэффициенты влияния определяются стандартным методом, с учетом функциональных зависимостей $x = x(\Delta L, t, h_2)$ и $h_2 = h_2(f_0, a, \varepsilon_2)$, неявно заданных уравнениями (1), включающими необходимые параметры. В связи с громоздкостью аналитических выражений, полные формулы коэффициентов влияния в данной работе не приводятся.

Для оценки погрешностей ε_1 и $\operatorname{tg}\delta$ далее используются следующие типичные значения относительной погрешностей входных величин:

$$\delta(\Delta L) = 5 \times 10^{-4}; \delta t = 4 \times 10^{-4}; \delta a = 4 \times 10^{-5}; \delta f_0 = 10^{-7};$$

$$\delta Q_\varepsilon = 2 \times 10^{-2}; \delta Q_0 = 2 \times 10^{-2}; \delta \eta = 10^{-2}; \delta \varepsilon_2 = 6 \times 10^{-5};$$

$$\delta L = 2 \times 10^{-4}; \delta K_{1E} = 10^{-2}.$$

Погрешность измерения ε_1 .

Результаты измерения ε_1 и значения коэффициентов влияния, для ряда образцов материалов толщиной, близкой к полуволновой, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

Материал	x	C_t	$C_{\Delta t}$	C_a	C_{ε_2}	C_f	ε_1	$U_{\varepsilon_1}, \%$
Керамика ВК-94-1	3,03	-0,021	-6,78	13,2	-11,0	20,0	9,19	0,3
Керамика ВК-100-1	3,116	-0,001	-7,11	13,8	-11,4	20,9	9,66	0,3
Полиэтилен высокого давлени- я	3,136	$-3,5 \times 10^{-5}$	-1,57	4,17	-3,87	5,74	2,282	0,1
Кварцевое стекло КВ	3,065	-0,008	-3,10	7,05	-6,07	10,1	3,807	0,2

Как видно, при толщине образцов $x \approx \pi$, наибольший вклад в суммарную погрешность вносят неопределённости в измерении определённых исходных параметров $\Delta L, a, \varepsilon_2$. Проведённое численное моделирование для образцов с толщиной, кратной половине длины волны, подтвердило устойчивость этой зависимости и для случаев, соответствующих $x = \pi n, n = 1, 2, \dots$.

В условиях, когда $x = \pi(2n + 1)/2, n = 0, 1, 2, \dots$, наибольшее влияние на итоговую погрешность определения диэлектрической проницаемости ε_1 оказывает ошибка в измерении геометрической толщины самого образца δt .

В рамках рассматриваемого метода, неопределённость $\delta(\Delta L)$, связанная с определением значения диэлектрической проницаемости, обусловлена исключительно точностью позиционирования подвижного элемента (поршня) и практически не зависит от добротности резонатора Q_{00} .

Неточность δf_0 , связанная с восстановлением резонансной частоты после введения образца, то есть при последующей высокоточной настройке резонатора $\delta f_0 \approx (10^{-2} \dots 10^{-3}) Q_\varepsilon^{-1} \approx 10^{-6} \dots 10^{-7}$.

Несмотря на то, что коэффициент чувствительности данной составляющей C_f может принимать значительные значения, абсолютная величина погрешности в определении резонансной частоты остаётся несущественной. В случае материалов с низкими диэлектрическими потерями $K_{1E} \operatorname{tg}\delta < 10^{-4}$ её влияние на итоговую точность измерений оказывается минимальным.

В целом, поведение функции погрешности определяется комплексным вкладом различных составляющих. Погрешность измерения толщины образца демонстрирует экстремумы, тогда как погрешности, связанные с добротностью резонатора и положением поршня, достигают максимумов и минимумов при четвертьволновых толщинах.

С увеличением толщины исследуемого образца амплитуда колебаний совокупной погрешности измерений демонстрирует тенденцию к снижению. Напротив, при возрастании диэлектрической проницаемости материала наблюдается рост амплитуды этих осцилляций, что указывает на повышенную чувствительность метода к данному параметру.

При приведённых выше значениях и других параметров, итоговая погрешность измерений не достигает минимально возможного значения. Соответствующая зависимость $U_{\varepsilon_1}(x, \varepsilon_1)$ (см. рисунок 1) демонстрирует наличие максимумов вблизи полуволновых толщин $x = \pi n$ и минимумов вблизи четвертьволновых $x = \pi(2n + 1)/2$, что указывает на доминирующее влияние погрешностей, связанных с измерением толщины образца и добротности резонатора, в то время как вклад ошибки определения резонансной частоты остаётся незначительным.

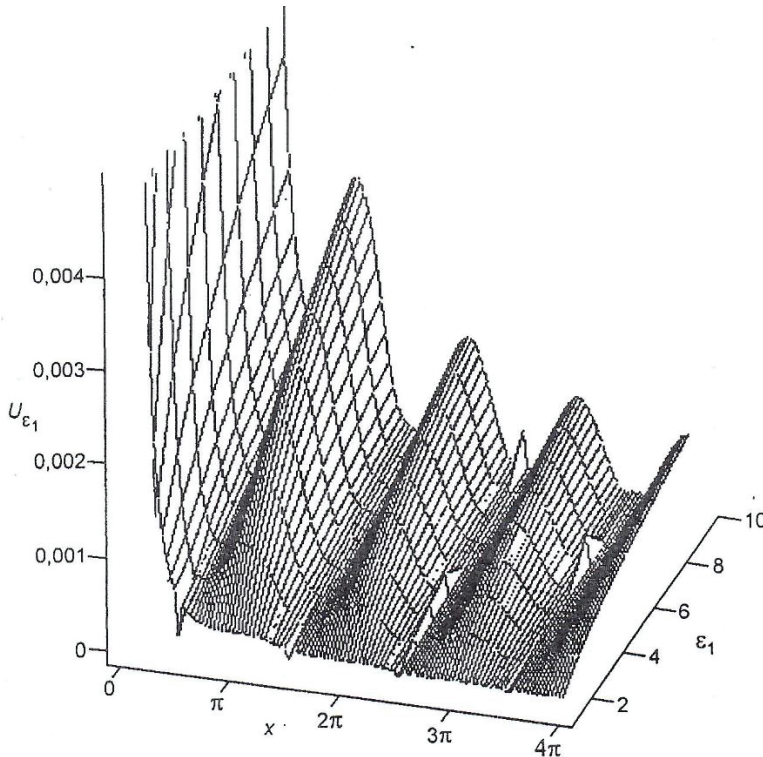


Рисунок 1 – Зависимость U_{ε_1} от электрической толщины образца и его диэлектрической проницаемости при $\Delta t = 0,003$ мм, $\Delta(\Delta L) = 0,01$ мм ($\delta t = 4 \times 10^{-4}$, $\delta(\Delta L) = 5 \times 10^{-4}$ при $x = \pi$, $\varepsilon_1 = 6$)

Зависимость $U_{\varepsilon_1}(x, \varepsilon_1)$, для преобладающего влияния δt , приведена на рисунке 2, где $\Delta t = 0,01$ мм, $\Delta(\Delta L) = 0,005$ мм.

Рассмотрим и проанализируем погрешность измерения $\text{tg}\delta$.

Погрешность измерения $\text{tg}\delta$.

Расчетная формула для $\text{tg}\delta$ имеет вид [3]:

$$\text{tg}\delta = K_{1E}^{-1} \left(\frac{1}{Q_{0\varepsilon}} - \frac{\eta}{Q_{00}} \right),$$

где η – параметр добротности резонатора с образцом.

Доверительная погрешность измерения равна 0,95 и выражается:

$$U_{\text{tg}\delta} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{i=1}^4 C_i^2 (\delta u_i)^2 - r_c C_c^2 \delta u_{Q_{00}} \delta u_{Q_{0\varepsilon}}} \quad (2)$$

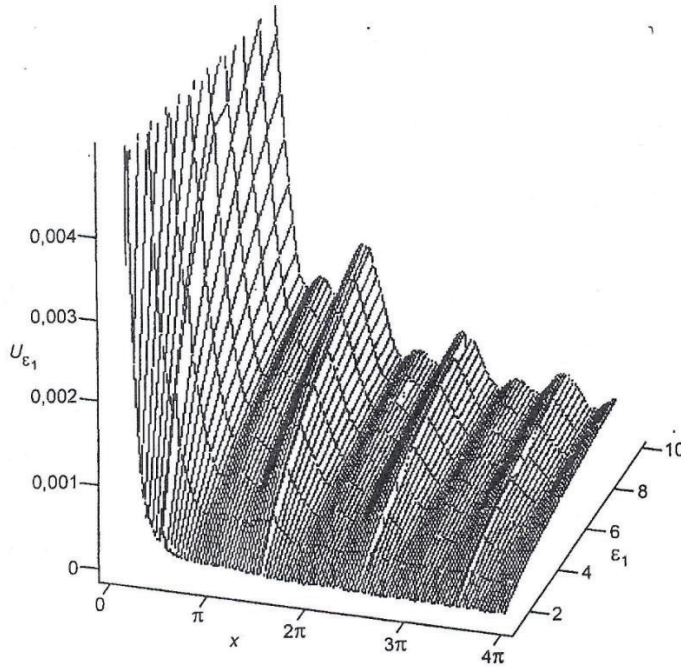


Рисунок 2 – Зависимость U_{ε_1} от электрической толщины образца и его диэлектрической проницаемости при $\Delta t = 0,01$ мм, $\Delta(\Delta L) = 0,005$ мм ($\delta t = 14,5 \times 10^{-4}$, $\delta(\Delta L) = 2,7 \times 10^{-4}$ при $x = \pi$, $\varepsilon_1 = 6$)

Здесь $\delta u_i = \Delta u_i / u_i$ – задаваемая при расчете граница относительной погрешности i -й входной величины с коэффициентом влияния $C_i = \frac{u_i}{\text{tg}\delta} \left(\frac{\partial(\text{tg}\delta)}{\partial u_i} \right)$; r_c – коэффициент корреляции между $\delta u_{Q_{00}}$, $\delta u_{Q_{0\varepsilon}}$; $C_c = \sqrt{\frac{Q_{0\varepsilon} Q_{00}}{\text{tg}^2 \delta} \left(\frac{\partial(\text{tg}\delta)}{\partial Q_{0\varepsilon}} \frac{\partial(\text{tg}\delta)}{\partial Q_{00}} \right)}$ – коэффициент влияния, определяемый коррелированными входными данными.

Коэффициент заполнения имеет вид:

$$K_{1E} = \left[1 + \xi \frac{(L_{\varepsilon} - t) \Phi_2}{\varepsilon t \Phi_1} \right]^{-1},$$

где $\xi = (A/B)^2$; A, B – нормированные амплитуды напряжения поля в образце и полость части резонатора; $L_{\varepsilon} = L - \Delta L$ – длина резонатора с образцом; $\varepsilon =$

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}; \Phi_1 = 1 - \frac{\sin 2x}{2x}, \Phi_2 = 1 - \frac{\sin[2h_2(L_\varepsilon - t)]}{2h_2(L_\varepsilon - t)}.$$

Результаты измерений $\operatorname{tg} \delta$ полуволновых образцов с оценкой доверительной погрешности по (2), и значения коэффициентов влияния приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений $\operatorname{tg} \delta$ полуволновых образцов

Материал	$C_{K1\varepsilon}$	$C_{Q0\varepsilon}$	C_{Q00}	C_η	C_c	$\operatorname{tg} \delta \times 10^{-4}$	$U_{\operatorname{tg} \delta}, \%$
Керамика ВК-94-1	-1	-1,87	0,87	-0,87	1,28	9,3	3,5
Керамика ВК-100-1	-1	-30,1	29,1	-29,1	29,6	0,3	68
Полиэтилен высокого давления	-1	-2,16	1,16	-1,16	1,58	2,6	4
Кварцевое стекло КВ	-1	-6,15	5,15	-5,15	5,63	0,9	13

Как видно погрешность $U_{\operatorname{tg} \delta}(x, \varepsilon_1)$ носит осциллирующий характер. При этом минимальные значения погрешностей наблюдаются при $x = \pi(2n + 1)/2$, а максимумы – при $x = \pi n$, при этом амплитуда колебаний погрешности уменьшается с увеличением n .

Осциллирующий характер $U_{\operatorname{tg} \delta}(x, \varepsilon_1)$, (см. рисунок 3) обусловлен осцилляциями (см. рисунок 4), возрастающими с ростом ε_1 .

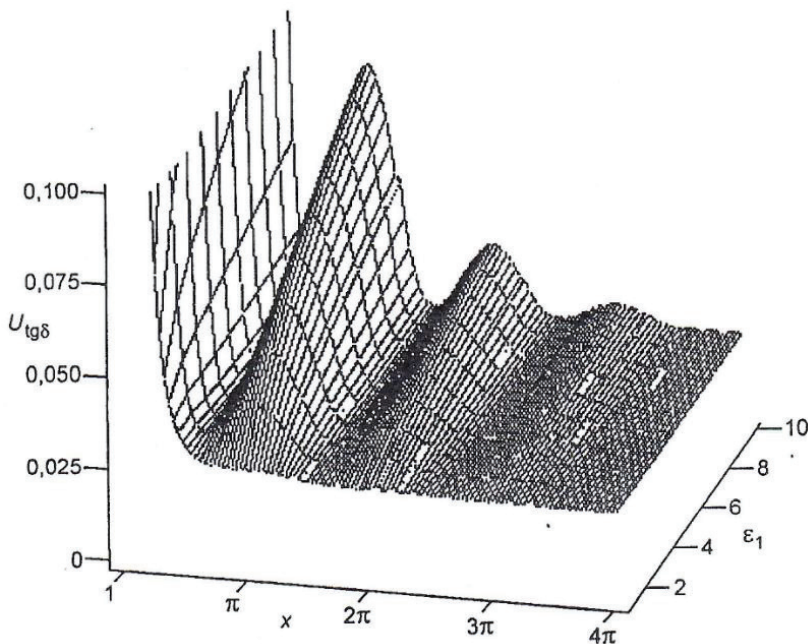


Рисунок 3 – Зависимость $U_{\operatorname{tg} \delta}$ от электрической толщины образца и его диэлектрической проницаемости

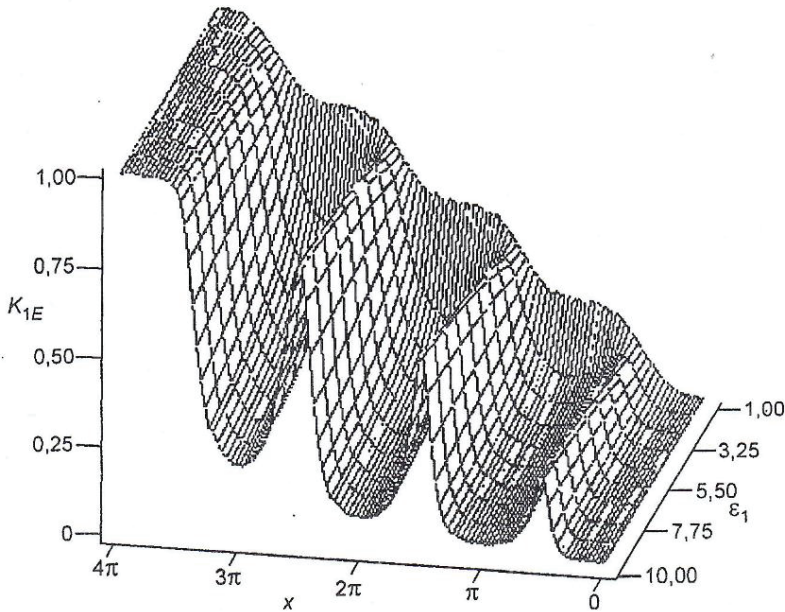


Рисунок 4 – Зависимость $U_{tg\delta}$ от электрической толщины образца и его диэлектрической проницаемости

Коэффициент заполнения играет ключевую роль в формировании общей погрешности. Его максимальные значения соответствуют минимумам погрешностей $U_{tg\delta}(x, \varepsilon_1)$ определения как диэлектрической проницаемости, так и тангенса угла диэлектрических потерь. Это связано с тем, что при высоком коэффициенте заполнения наблюдается значительная концентрация электромагнитной энергии в объеме образца, что, в свою очередь, приводит к более выраженным изменениям добротности резонатора по сравнению с режимами, соответствующими минимальным значениям коэффициента заполнения.

С уменьшением коэффициента заполнения наблюдается монотонное увеличение общей погрешности измерений, обусловленное снижением чувствительности системы к изменениям свойств образца.

Таким образом, наиболее благоприятные условия для высокоточного измерения малых значений диэлектрических потерь $tg\delta$ реализуются при электрической толщине образца, близкой к нечётному числу четвертей длины волны $x = \pi(2n + 1)/2$, что обеспечивает максимальное значение коэффициента заполнения.

В таблице 3 приведены результаты измерений ε_1 и $tg\delta$ образцов при двух значениях их электрической толщины $x = \pi$ и $x = 3\pi/2$.

Таблица 3 – Значения измерений ε_1 и $tg\delta$ исследуемых материалов

Материал	$x = \pi$		$x = 3\pi/2$	
	ε_1	$tg\delta \times 10^{-4}$	ε_1	$tg\delta \times 10^{-4}$
Фторопласт 4 ПН	2,08	2,0	2,049	1,9
Полиэтилен высокого давления	2,282	2,4	2,287	2,2

На начальном этапе образцы имели электрическую толщину, соответствующую $x = 3\pi/2$ при которой были выполнены первичные измерения их электрофизических характеристик. Впоследствии образцы были доработаны до толщины, соответствующей $x = \pi$, и измерения были повторены.

Полученные значения составляющих погрешности, в частности по параметру $\text{tg}\delta$, заметно отличаются от ранее представленных в литературе. Это расхождение объясняется колебательным характером зависимости коэффициента заполнения резонатора от электрической толщины образца, как видно на рисунке 4. Подобная осцилляционная зависимость приводит к чередованию режимов с высокой и низкой чувствительностью измерительной системы.

Анализ также показал, что точность измерения параметров резонаторной системы – в частности, внутреннего диаметра D и длины резонатора без образца L , а также знание диэлектрической проницаемости заполняющей среды ε_2 – оказывает прямое влияние на точность определения искомых характеристик образца.

Следует отметить, что высокоточное прямое измерение внутреннего диаметра цилиндрического резонатора представляет собой технически трудоёмкую задачу. Более надёжным и точным подходом является определение резонаторных параметров D , L , ε_2 косвенным методом – на основе анализа спектра собственных резонансных частот резонатора с колебанием $H_{0,mp}$, заполненного средой с известными относительными параметрами $\mu_2 = 1$, ε_2 :

$$f_{0,mp} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_2}} \sqrt{\left(\frac{\rho\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{2v_{1m}}{D}\right)^2}. \quad (3)$$

Определение трёх и более резонансных частот предоставляет возможность восстановления неизвестных параметров резонаторной системы – в частности, внутреннего диаметра, длины и диэлектрической проницаемости заполняющей среды – путём решения системы уравнений, вытекающих из выражения (3). В связи с этим, в дальнейшем анализе целесообразно ограничиться рассмотрением только одного типа колебаний – H_{01p} , поскольку он обеспечивает необходимую информативность для целей текущего исследования.

Практическая потребность в точном значении ε_2 возникает лишь при проектировании резонатора с заданными геометрическими параметрами. Как правило, на практике принимают $\varepsilon_2 = 1,00058$.

Опуская промежуточные преобразования (3), можно получить выражение для отношения $D/L = z$ в следующем виде:

$$z_k = \frac{2v_{11}}{\pi} \sqrt{\frac{1 - [f(p_i)/f(p_j)]^2}{p_j^2 [f(p_i)/f(p_j)]^2 - p_i^2}}, \quad (4)$$

где $f(p_i)$, $f(p_j)$ – резонансные частоты H_{01p} -колебаний с продольными индексами p_i и p_j .

При N резонансных частот получаем $M = N(N - 1)/2$ различных сочетаний резонансных частот в (4) и столько же значений z_k , $k = 1, 2, 3, \dots M$. Величина D/L принимается в виде среднего арифметического по всем полученным комбинациям, что минимизирует влияние случайных погрешностей.

Значение диаметра для каждой резонансной частоты, определяем из (3)

$$D_i = \frac{c}{f(p_i)\sqrt{\varepsilon_z}} \sqrt{\frac{p_i^2}{2} z^2 + \left(\frac{v_{11}}{\pi}\right)^2}$$

Подвижный поршень резонатора имеет ход не менее полуволны и обеспечивает на данной частоте возможность перехода на колебание с уменьшенным (увеличенным) на единицу числом полуволн p .

Для такого укороченного (удлиненного) резонатора повторяется процедура определения диаметра. Различие средних значений диаметра для двух длин резонатора указывает на конусность резонансной полости, которую можно учесть зависящей от смещения поршня поправкой к среднему диаметру.

Экспериментально измеренное среднее значение внутреннего диаметра резонатора составляет $D = 50,0822$ мм, при этом среднеквадратическое отклонение результата не превышает 0,0006 мм. Длина резонатора без образца непосредственно входит в выражения для параметров, существенно влияя на точность их определения, и определяется как $L = D/z$.

Особое внимание уделяется погрешностям измерения добротностей резонатора в состоянии с образцом и без него, поскольку именно эти составляющие вносят наибольший вклад в общую неопределённость параметра $\text{tg}\delta$. Измерение добротности сводится к оценке нагруженной добротности системы и коэффициентов связи резонатора с измерительным трактом.

Заключение.

Среди основных факторов, ограничивающих точность измерения нагруженной добротности в характерном для данного метода интервале $5 \times 10^3 - 5 \times 10^4$, наибольшее значение имеет погрешность установки уровня мощности (по показаниям СВЧ-детектора), при котором измеряют полосу пропускания резонатора, кратковременную нестабильность частоты СВЧ-генератора, частотную зависимость его выходной мощности в пределах резонансной кривой и частотную зависимость коэффициента передачи СВЧ-тракта, включая детектор. Применение калибраторного (поляризационного) аттенюатора для установки необходимого уровня на резонансной кривой (обычно 3,01 дБ) при измерении полосы пропускания резонатора позволяет исключить погрешность из-за неквадратичности СВЧ-детектора. Уменьшить погрешность измерения добротности можно путем измерения полосы пропускания на нескольких уровнях резонансной кривой, устанавливаемых аттенюатором, то есть при различных значениях обобщенной рас тройки резонатора $\beta = 2Q_H(f - f_0)/f_0$. Один из возможных вариантов такого способа состоит в измерении полосы пропускания резонатора при значениях, обобщенной расстройки $\beta = 0,707; 1,0; 1,5; 2,0$, что соответствует уровням на резонансной кривой

-1,761; -3,01; -5,12; -6,99 дБ. Полученные значения нагруженной добротности полого резонатора с колебанием H_{014} на частоте 9,365 ГГц усредняли, что дало $Q_H = 40540$.

Литература

1. ГОСТ 8.544-86. ГСИ. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь твердых диэлектриков. Методика выполнения измерений в диапазоне частот 10^9 - 10^{10} Гц.

2. МЭК 377-2-77 (ГОСТ 27496.2-87). Материалы электроизоляционные. Методы определения диэлектрических свойств на частотах свыше 300 МГц. Резонансные методы.
3. Никольский В.В., Никольский Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989.
4. Cook R.J. // Proc. Conf. «IPC Sci. and Techn». 1973. P. 12.
5. Ni E., Stumper U. // Proc. IEEE. 1985. V. 132. Pt. 4. № 1.
6. Vanzura E.J., Geyer R.G., Janezic M.D. // NIST Techn. Note 1354. 1993. P. 236.

УДК 674.815

Применение МКЭ с масштабируемыми границами для расчета 3D конструкций с трещинами

Борис Леонидович Спирин, старший преподаватель
кафедры механики и инженерной графики,
Сергей Владимирович Фролов, кандидат физико-математических наук,
заведующий кафедрой механики и инженерной графики,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Академия ГПС МЧС России», г. Москва

В данной статье рассмотрено применение семейства МКЭ с масштабируемыми границами, которые хорошо зарекомендовали себя при использовании конечно элементного моделирования для расчета 3D конструкций. Поскольку различные пазы и трещины встречаются практически во всех деталях, то эти нарушения структуры приводят к концентрации напряжений в различных точках. Также рассмотрены случаи, когда нарушения структуры пересекаются и образуют точки сингулярности. Для правильного расчета таких конструкций и предложен метод МКЭ с масштабируемыми границами. Рассмотрены его достоинства и недостатки по сравнению с другими МКЭ.

Метод конечных элементов, трещины, точки концентрации напряжений, комбинированный режим разрушения.

Application of FEM with scalable boundaries for the analysis of 3D structures with cracks

Boris Leonidovich Spirin, Senior Lecturer of the Department
of Mechanics and Engineering Graphics,
Sergei Vladimirovich Frolov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia», Moscow

This article discusses the use of FEM with scalable boundaries, which have proven themselves well when using finite element modeling to calculate 3D structures. Since various grooves and cracks are found in almost all parts, these structural violations lead to stress concentrations at various points. Also considered are cases where structural violations intersect and form singularity points. To correctly calculate such structures, the FEM method with scalable boundaries is proposed. Its advantages and disadvantages are considered in comparison with other FEM.

Finite element method, cracks, stress concentration points, combined fracture mode.

Вводная часть

Для расчетов на прочность трехмерных конструкций с различными отверстиями, а также с трещинами, которые могут иметь разную геометрию и, кроме того, пересекаться, используются различные вычислительные методы. В настоящее время все большее значение приобретают методы конечных элементов (МКЭ). Среди большого разнообразия методов МКЭ в статье рассматривается реализация МКЭ с масштабируемыми границами (scaled boundary finite element method SBFEM). Наиболее подробно данный метод рассмотрен в книге «Конечно-элементное моделирование неограниченных структур» (Вольф и Сонг) [10]. Также более поздняя модернизация метода содержится в монографии «Масштабированный граничный метод конечных элементов» (Вольф) [12]. Метод SBFEM основывается на математических формулировках традиционного метода конечных элементов, больше связанных с методом перемещений, поэтому обладает всеми преимуществами МКЭ, но требует меньше времени на расчеты, поскольку сокращает одну размерность при моделировании элементов конструкций. Это позволяет моделировать трехмерные структуры с помощью обычных конечных элементов одного параметра на основе метода перемещений в его аналитической форме в радиальном направлении. Поскольку при данном подходе не требуется применение объемных элементов для 3D структур (что необходимо в исходном МКЭ) и достаточно только 2D структур (поверхностные элементы), то это приводит к упрощению задачи в области использования метода для механики разрушений [6].

В большинстве деталей применяемых конструкций встречаются различные пазы и отверстия, предусмотренные техническими условиями, а также в процессе изготовления и эксплуатации в них могут появляться произвольной формы и размеров трещины, возможно ещё и пересекающиеся между собой. Эти нарушения однородности структуры приводят к концентрации напряжений, значениях которых могут значительно превосходить величину напряжений в однородной среде детали. Следовательно, наличие расчетных методов, позволяющих правильно оценить влияние трещин и отверстий на прочность деталей, имеет первостепенное значение.

Данный метод обеспечивает достаточно точное прогнозирование поведения, элементов, имеющих в своем составе выемки и трещины, при этом универсальность данного метода находится на достаточно высоком уровне [4]. К недостаткам метода можно отнести то, что он требует возможности масштабирования конструкции относительно некоторой базовой точки, называемой обычно центром подобия [2]. Также конструкции должна иметь возможность дискретизации (как и в остальных МКЭ это должно соблюдаться только на поверхности структуры). Для применения масштабируемости требуется произвести разделение координат таким образом, чтобы в направлении масштабирования границы это приводило к простым дифференциальным уравнениям, которые допускают аналитическое решение [7]. Следовательно, в этом методе может быть применен полуаналитический подход.

Для демонстрации данного метода далее будет рассмотрено несколько двух- и трехмерных случаев конструкций с взаимно пересекающимися трещинами.

Поскольку при расчете реальных конструкций постоянно возникают ситуации, требующие учета точек концентрации напряжений, различными авторами достаточно подробно рассматривались разные аспекты этой проблемы. Проводились аналитические и численные моделирования поведения трещин в двумерных структурах в материалах, обладающих свойствами линейной упругости (D. Leguillon and E. Sanchez-Palencia [14]. Традиционный метод конечных элементов также широко применялся при анализе двумерных трещин [17]. Помимо трещин, другими факторами, влияющим на прочность конструкции, являются болтовые, шлицевые, клеевые, сварные соединения, широко используемые в технике [16]. Эти соединения также могут выступать в роли концентратора напряжений и являться причиной появления сингулярностей. Достаточно подробно данные вопросы рассмотрены у (Delale, 1984; Ding and Kumosa, 1994; Sator, 2010; Mittelstedt and Becker, 2005) [15], [16], [18].

В приведенной выше литературе по механике разрушения указывается, что для получения достаточно точных результатов требуется применение очень мелкой сетки для анализа поведения трещин [3]. Это приводит к огромным затратам вычислительной мощности и времени, которое в значительной мере тратится нерационально на расчет участков, не имеющих трещин и отверстий, для которых такая мелкая сетка является избыточной [7]. Для исправления данной ситуации при расчете точек концентрации и был разработан МКЭ с масштабируемыми границами (SBFEM), основанный на полуаналитических алгоритмах. Для изучения поведения двумерных структур можно рассматривать следующих авторов (Wolf, Song, Lehmann, Deeks) [13]. Распространение данного метода на 3D структуры встречаются реже. Можно упомянуть (Mittelstedt and Becker, 2005) [1], [15].

В настоящее время расчеты на основе метода активно развиваются и находят новое применение. Метод конечных элементов с масштабируемыми границами можно назвать полуаналитическим методом, который сочетает в себе преимущества метода граничных элементов (BEM) [11] и метода конечных элементов [14].

Краткое описание метода:

В основе метода граничных элементов с масштабируемыми границами (SBFEM) лежат преимущества аналитических методов решения обычных дифференциальных уравнений. Если в основе МКЭ лежит преобразование системы уравнений в частных производных в систему линейных уравнений, то SBFEM сводит систему в частных производных к системе линейных дифференциальных уравнений, которые могут быть решены аналитическими методами. Упрощение здесь достигается за счет введения функций 2D формы на поверхности и аналитических преобразований в радиальном направлении. Если граница имеет сложную или дискретную форму, то целесообразно провести ее дискретизацию.

Линейная задача упругости – это краевая задача, в основе которой лежит 3 группы уравнений: уравнения деформации или перемещения, уравнения равновесия и граничные условия. Для того, чтобы получить приближенное решение данной задачи (аналитическое за редким исключением сложно или даже невозможно) используют различные численные методы.

Уравнения упругости записываются в следующем виде:

$$\begin{cases} [L]^T \{\sigma\} + \{\bar{f}\} = 0 \\ \{\varepsilon\} = [L]\{u\} \\ \{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][L]\{u\} \end{cases} \quad [L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

здесь σ – напряжения, ε – деформации структуры $[D]$ – матрица жесткости, u – неизвестное перемещение, $[L]$ – дифференциальный оператор.

При решении задач SBFEM используются две координатные системы: Декартова система (обозначения x, y, z), а вторая называемая иногда нормализованной координатной системой (ξ, η, ζ). Через ξ обозначается нормальная ось, проходящая через центр масштабирования и нулевую отметку, η и ζ соответственно касательные оси. Переход от Декартовой системы координат к системе FEM осуществляется так:

$$\begin{aligned} x(\xi, \eta, \zeta) &= \xi x(\eta, \zeta) \\ y(\xi, \eta, \zeta) &= \xi y(\eta, \zeta) \\ z(\xi, \eta, \zeta) &= \xi z(\eta, \zeta) \end{aligned} \quad (2)$$

Для 2D задач координата z не используется.

Для задания геометрических характеристик элемента на границе требуется произвести интерполяцию узловой координаты x с использованием локальных касательных η и ζ .

$$x(\eta, \zeta) = \sum N_i(\eta, \zeta) x_i \quad (3)$$

N – функция отображения $N = N(\eta, \zeta) = N[N_1, N_2]$. Координаты точки в рабочей области $x(\xi, \eta, \zeta)$ получаются масштабированием соответствующей точки $x(\eta, \zeta)$ на границе.

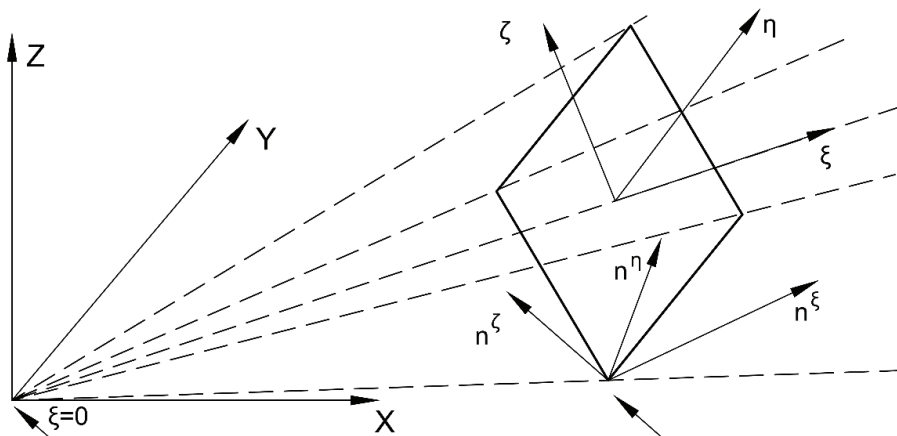
$$x(\xi, \eta, \zeta) = \xi x(\eta, \zeta) = \xi \sum N_i(\eta, \zeta) x_i \quad (4)$$

С масштабным коэффициентом $\xi = 1$ на границе и $\xi = 0$ в центре масштабирования. Для преобразования оператора $[L]$ в систему координат (ξ, η, ζ) требуется матрица Якоби:

$$J(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} x_\xi & y_\xi & z_\xi \\ x_\eta & y_\eta & z_\eta \\ x_\zeta & y_\zeta & z_\zeta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Частные производные для указанных величин вычисляются через (3) и (4) с соответствующим образом определёнными матрицами $[N]$ и массивом $\{x\}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} x_\eta(\xi, \eta, \zeta) &= \xi x_\eta(\eta, \zeta) = \xi [N_\eta] \{x\} \\ x_\xi(\xi, \eta, \zeta) &= \xi x_\xi(\eta, \zeta) = \xi [N_\xi] \{x\} \end{aligned} \quad (6)$$



Точка масштабирования Граничная поверхность
Рисунок 1 – Масштабирование границы (преобразование) для 3D.
Определение нормали к поверхности

Матрица Якоби записывается в следующем виде:

$$J(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} x & y & z \\ \xi x_\eta & \xi y_\eta & \xi z_\eta \\ \xi x_\zeta & \xi y_\zeta & \xi z_\zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \xi & \\ & & \xi \end{bmatrix} J(\eta, \zeta) \quad (7)$$

Производные, определенные по координатам x , y и z , соответственно могут быть преобразованы соответственно к координатам ξ , η , ζ следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{bmatrix} = J^{-1}(\xi, \eta, \zeta) \begin{bmatrix} \partial/\partial \xi \\ \partial/\partial \eta \\ \partial/\partial \zeta \end{bmatrix} = J^{-1}(\eta, \zeta) \begin{bmatrix} \partial/\partial \xi \\ 1/\xi \partial/\partial \eta \\ 1/\xi \partial/\partial \zeta \end{bmatrix} \quad (8)$$

Подставляя (8) в (1), получаем для нормализованной системы координат запись для оператора $[L]$:

$$[L(\eta, \zeta)] = \frac{\partial}{\partial \xi} [b^1(\eta, \zeta)] + \frac{1}{\xi} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} [b^2(\eta, \zeta)] + \frac{\partial}{\partial \zeta} [b^3(\eta, \zeta)] \right] \quad (9)$$

где $[b^1(\eta, \zeta)], [b^2(\eta, \zeta)], [b^3(\eta, \zeta)]$ зависят только от геометрических характеристик элемента.

Для определения перемещений воспользуемся формулировками виртуальной работы. Величина перемещения конечного элемента, находящегося на границе области зависит от функции формы элемента N , которая в свою очередь определяется вектором перемещения $u(\xi)$ для всей поверхности Γ^ξ

$$u(\xi, \eta, \zeta) = N(\eta, \zeta) u(\xi) \quad (10)$$

Закон Гука для деформации и напряжений в случае масштабирования границ, с учетом (10) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) &= [B_1] u(\xi)_\xi + 1/\xi [[B_2] u(\xi)] \\ \sigma(\xi, \eta, \zeta) &= [D] \{ \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) \} = [D] \left([B_1] u(\xi)_\xi + 1/\xi [[B_2] u(\xi)] \right) \end{aligned} \quad (11)$$

здесь

$$\begin{aligned} [B_1(\eta, \zeta)] &= [b^1] N(\eta, \zeta) \\ [B_2(\eta, \zeta)] &= [b^2] N(\eta, \zeta)_\eta + [b^3] N(\eta, \zeta)_\zeta \end{aligned}$$

Поле виртуальных перемещений получается интерполированием узловых значений функции формы, исходя из этого:

$$\delta u(\xi, \eta, \zeta) = N(\eta, \zeta) \delta u(\xi) \quad (12)$$

Здесь символом δ обозначается виртуальное состояние. Для получения соответствующих виртуальных деформаций нужно:

$$\delta \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) = [B_1] \delta u(\xi)_\xi + \frac{1}{\xi} [B_2] \delta u(\xi) \quad (13)$$

Исходя из вышесказанного для определения виртуальной работы:

$$\int_V \delta \varepsilon(\xi, \eta, \zeta)^T \sigma(\xi, \eta, \zeta) dV - \int_\Gamma \delta u(\xi, \eta, \zeta)^T t(\eta, \zeta) d\Gamma \quad (14)$$

Первое выражение – работа внутренних сил, второе – внешних.

Подставляя сюда (11), окончательно получаем:

$$I_1 = \int_V \delta \varepsilon(\xi, \eta, \zeta)^T \sigma(\xi, \eta, \zeta) = \\ = \int_V \left[[B_1] \delta u(\xi)_{\xi} + \frac{1}{\xi} [B_2] \delta u(\xi) \right]^T [D] \left[[B_1] u(\xi)_{\xi} + \frac{1}{\xi} [B_2] u(\xi) \right] \quad (15)$$

Запишем матрицы коэффициентов, которые определяются также, как и матрицы жесткости в обычном FEM, после поэлементного вычисления соответствующих интегралов.

$$\begin{aligned} [E^0] &= \int_{\Gamma} [B_1]^T [D] [B_1] |J| d\Gamma \\ [E^1] &= \int_{\Gamma} [B_2]^T [D] [B_1] |J| d\Gamma \\ [E^2] &= \int_{\Gamma} [B_2]^T [D] [B_2] |J| d\Gamma \end{aligned} \quad (16)$$

С учетом (16) перепишем (15) в следующем виде:

$$I_1 = \delta u^T_{\xi=1} \left\{ [E^0] u_{\xi=1} + [E^1]^T u_{\xi=1} \right\} - \\ - \int_0^1 \delta u^T \left\{ [E^0] \xi^2 u_{\xi\xi} + \left\{ 2[E^0] - [E^1] + [E^1]^T \right\} \xi u_{\xi} + \left\{ [E^1]^T - [E^2] \right\} u \right\} d\xi \quad (17)$$

Подставляя выражения (12), (14) получим для виртуальной работы внешних сил:

$$\int_{\Gamma} \delta u(\xi, \eta, \zeta)^T t(\eta, \zeta) d\Gamma = \left\{ \delta u(\eta, \zeta)^T \right\} \int_{\Gamma} [N(\eta, \zeta)]^T \{t(\eta, \zeta)\} d\Gamma \quad (18)$$

Данное выражение дает связь между узловыми силами и граничной нагрузкой (напряжениями). А значит для виртуальной работы можно записать

$$\delta u^T \left\{ [E^0] u_{\xi} + [E^1]^T u \right\} - \left\{ \delta u^T \right\} \{P\} - \\ - \int_0^1 \delta u^T \left\{ [E^0] \xi^2 u_{\xi\xi} + \left\{ 2[E^0] - [E^1] + [E^1]^T \right\} \xi u_{\xi} + \left\{ [E^1]^T - [E^2] \right\} u \right\} d\xi \quad (19)$$

Уравнение (19) должно выполняться при всех значениях $\{\delta u(\xi)\}$. А значит должны выполняться следующие уравнения равновесия в радиальном и граничном направлениях.

$$\{P\} = [E^0] \{u_{\xi}\} + [E^1] \{u\} \quad (20)$$

$$[E^0] \xi^2 u_{\xi\xi} + \left\{ 2[E^0] - [E^1] + [E^1]^T \right\} \xi u_{\xi} + \left\{ [E^1]^T - [E^2] \right\} u = 0 \quad (21)$$

Выражение (21) это уравнение SBFEM для перемещений в виде уравнения Эйлера-Коши. Все матрицы, входящие в него, заполняются аналогично FEM. Его можно свести к обычному дифференциальному уравнению первого порядка сделав следующую замену:

$$\{X(\xi)\} = \begin{Bmatrix} \xi^{+0.5} \{u(\xi)\} \\ \xi^{-0.5} \{R(\xi)\} \end{Bmatrix} \rightarrow \xi [X(\xi)]_{,\xi} = -[Z][X(\xi)] \quad (22)$$

Здесь $[Z]$ – матрица Гамильтона:

$$[Z] = \begin{bmatrix} \left([E^0]^{-1}[E^1]^T - 0.5[I]\right) & -[E^0]^{-1} \\ -\left([E^2] + [E^1][E^0][E^1]^T\right) & -\left([E^1][E^0]^{-1} - 0.5[I]\right) \end{bmatrix}$$

Тогда решение задачи на собственные значения:

$$[Z] \begin{bmatrix} [\phi_{11}] & [\phi_{12}] \\ [\phi_{21}] & [\phi_{22}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\phi_{11}] & [\phi_{12}] \\ [\phi_{21}] & [\phi_{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\lambda] & \\ & -[\lambda] \end{bmatrix}$$

Только компоненты с действительными неположительными компонентами $[\lambda]$, находящиеся в заданной области могут привести к смещению, относительно центра масштабирования $\xi=0$ [6]. Таким образом обобщенное смещение для равнодействующей сил, приложенных к узлу, можно записать в виде:

$$\{u(\xi)\} = \xi^{-0.5} \left([\phi_{11}] \xi^{[-\lambda]} \{c_1\} + [\phi_{12}] \xi^{[\lambda]} \{c_2\} \right) \quad (23)$$

$$\{R(\xi)\} = \xi^{+0.5} \left([\phi_{21}] \xi^{[-\lambda]} \{c_1\} + [\phi_{22}] \xi^{[\lambda]} \{c_2\} \right) \quad (24)$$

Для определения матрицы жесткости $[K^b]$ внутри границы элемента $\xi=l$ можно записать:

$$[K^b] = [\phi_{21}][\phi_{11}]^{-1} \quad (25)$$

Исходя из этого, уравнение равновесия для элемента может быть записано в виде:

$$[K^b]\{u\} - \{P\} = 0 \quad (26)$$

Также, как и в обычном FEM для решения требуются граничные условия для $\{u\}$ и $\{P\}$, однако в отличие от обычного здесь рассматриваются только граничные степени свободы, а для них выражение может быть переписано в таком виде, где константа интегрирования на границе определяется при ($\xi=l$):

$$\{u_{\xi=l}\} = [\phi_{11}]\{c_1\}, \xrightarrow{\xi=l} \{c_1\} = [\phi_{11}]^{-1}\{u\} \quad (27)$$

После использования (27) напряжения и деформации в любой точке области можно определить исходя из (11).

Примеры применения метода 2D объекты:

Рассмотрим несколько примеров применения метода SBFEM для задач, достаточно подробно рассмотренных в литературе [6], [9], [10], результаты для которых были получены на основе классической механики разрушения.

В первом случае рассмотрим 2D изотропную пластину с прямой трещиной длины $2a$. Это широко известная задача моделирования трещины Гриффитса. Вследствие симметрии задачи моделирование будет проведено только для поло-

вины с размещением центра симметрии в основании трещины (рисунок 2а). Результат расчета приведен в таблице 1а, где показана быстрая сходимость метода.

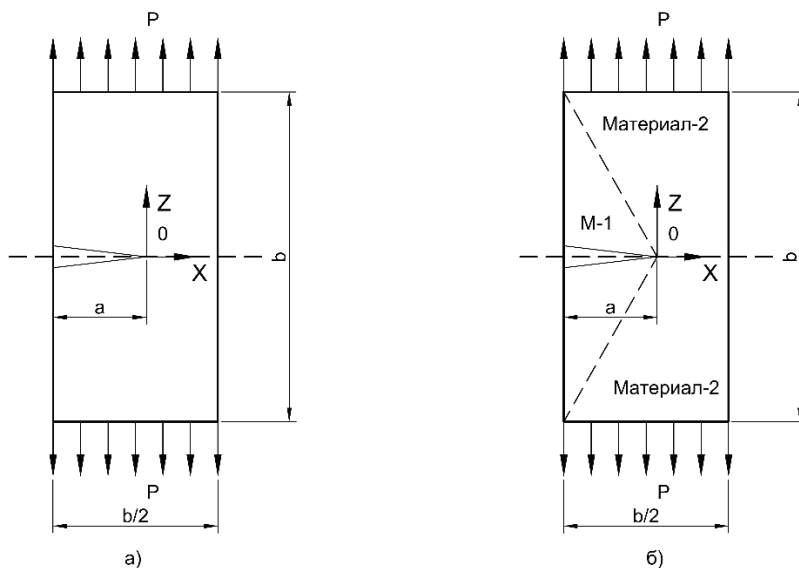


Рисунок 2 – Расчетная схема 2D плиты с трещиной
а) изотропная плита; б) композитный материал

Композитные материалы очень часто используются в современной индустрии, имея широчайшее применение от строительства жилых зданий до аэрокосмической промышленности. В примере (2) рассмотрен простейший композиционный элемент, состоящий из двух материалов. Центр масштабирования также выбран на вершине трещины. В данном случае аналитическое решение [Сатор 2010] дает высокую степень сингулярности. Результат расчетов приведен в таблице 1б.

Как следует из таблицы параметры материалов в вершине трещины, оказывают большое влияние на поле сингулярности, и для композитов порядок сингулярности значительно превосходит такой же для обычных изотропных материалов. Однако при применении методов SBFEM вычислительные затраты незначительно повышаются по сравнению с предыдущим случаем.

Таблица 1а – Сингулярность напряжений 2D изотропная плита с краевой трещиной (рисунок 2а)

Метод	Ст. свободы	Mode-I
Аналитическое решение	-	-0.5
SBFEM	12	-0.534
SBFEM	24	-0.506
SBFEM	36	-0.501
SBFEM	48	-0.5

Таблица 1б – Сингулярность напряжений 2D композитная плита с краевой трещиной (рисунок 2б)

Метод	Ст. свободы	E_1/E_2	Mode-I
Аналит. решение	-	10^4	-0.98
SBFEM	48	10	-0.772
SBFEM	48	100	-0.900
SBFEM	48	10^3	-0.969
SBFEM	48	10^4	-0.987

Примеры применения метода 3D объекты:

Для данного случая рассматривался только симметричный режим сингулярности (режим 1), в котором трещина проходила по границе соединения двух материалов композита (сфера с трещиной 270°). Аналитического решения для данного 3D случая не существует [8]. Поэтому здесь происходило сравнение результатов, полученных разными методами (чистый МКЭ и SBFEM). Также происходило варьирование физико-механических свойств материала (Модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν). В таблице 2 представлены результаты расчетов для разных материалов и различных параметров трещины.

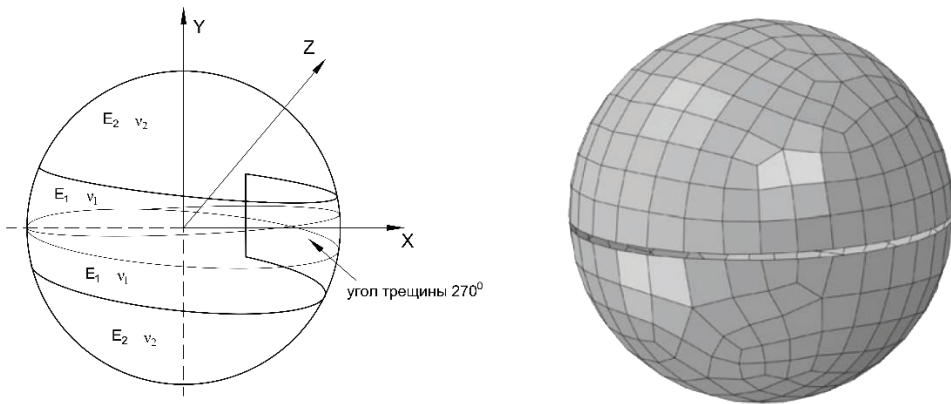


Рисунок 3 – 3D концентрация напряжений. Сфера с трещиной на границе раздела

Было рассмотрено несколько способов размещения упругого материала. Один условно «тонкий», когда материал располагается под углом $\sim 10^\circ$ к центру сферы от горизонтальной плоскости (обычно слои берутся в этом диапазоне над и под трещиной). Вторая условно названа «толстой», и она обычно представляет комбинацию нескольких «тонких» слоев. В таблице показано влияние размещения материала на величину сингулярности. Как следует из таблицы – отношение модуля Юнга более твердого материала к остальной части в области трещины оказывает наиболее значительный эффект.

Таблица 2 – Сингулярность напряжений 2D изотропная плита с краевой трещиной (рисунок 3)

Метод	E_1/E_2	ν	$[\lambda^R]$	$[\lambda^R] - 1$ Режим-1
МКЭ	1	0.1	0.3	-0.71
МКЭ	1	0.3	0.26	-0.75

SBFEM	1	0.1	0.283	-0.71
SBFEM	1	0.3	0.268	-0.73
SBFEM	1	0.5	0.252	-0.74

Основные преимущества метода SBFEM:

Повышение точности там, где это наиболее критично, без лишнего расходования вычислительных ресурсов для всей конструкции.

Улучшение устойчивости решения за счёт локальной адаптации сетки и граничных условий.

Гибкость в моделировании сложных зон с высоким градиентом полей деформаций и напряжений. Также стоит упомянуть связь с другими методами, таким как метод адаптивной деформационной сетки (hp-адаптивность, p- и h-адаптивность) и с методами локального аппроксимирования.

В рамках задач разрушений может быть сопряжён с методами расширенной размерности (X-МКЭ) для моделирования трещин без явного аппроксимирования по всей сетке.

Выводы:

Метод SBFEM – это метод решения задач механики деформируемого твердого тела преимущественно для случаев, когда локальные явления (неоднородности, трещины) требуют резкого повышения разрешающей способности вычислительного алгоритма вдоль границ очень узкой области. Он позволяет адаптивно управлять границами во время моделирования физической задачи, позволяя перемещать или изменять форму границы в зависимости от погрешности вычислений, улучшая сходимость метода, обусловленность матрицы жесткости, сокращая вычислительные ресурсы на те детали, которые не требуют точного решения.

Его можно рассматривать как достаточно точный и быстрый полуаналитический метод, который может быть применен при расчетах как замкнутых, так и не замкнутых объектов. Основным преимуществом является сокращение физической размерности, что позволяет свести расчет 3D объекта только к расчету по поверхности. В случае не сплошной структуры (выемки, пазы, трещины), центр, относительно которого происходит масштабирование, можно поместить в точку особенности (сингулярности). Тогда методом SBFEM обеспечивается правильный расчет поля упругих деформаций с необходимой точностью. Для 2D поверхности достаточно проводить моделирование простыми линейными элементами, для 3D объектов достаточно проводить моделирование граничной поверхности двухмерными элементами. Метод хорошо подходит для изучения распространения трещин, позволяя динамически изменять границы вокруг зоны ее распространения, чтобы зафиксировать новые участки ее распространения и новые участки высокой концентрации напряжений. Метод применим для изучения зоны контакта слоев в композите, чтобы точнее моделировать свойства в зоне перехода, а также для модели с большим диапазоном размеров, когда часть модели имеет микроразмеры, другая часть макроразмеры, масштабируемые границы позволяют сосредоточиться на критических областях.

Литература

1. Аннин Б.Д., Черепанов Г.П. Упруго-пластическая задача. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
2. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.
3. Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1984. 428 с.
4. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
5. Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д. Математическая теория пластичности. М.: Физматлит, 2001. 704 с.
6. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с.
7. Митчелл Э. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными. М.: Владос, 2020. 402 с.
8. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
9. Саврук М.П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. Киев: Наук. думка, 1981. 324 с.
10. Старостина Ж.А. Расчет конструкций методом конечных элементов с использованием приложения APM FEM: учебно-метод. пособие. М.: МАДИ, 2022. 102 с.
11. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 590 с.
12. Bathe K.J. The Finite Element Method. Fourth Edition. Boston: Butterworth-Heinemann, 2014. 600 p.
13. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Cardew H., Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4th edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2002. 400 с.
14. Leguillon D., Sanchez-Palencia E. Computation of Singular Solutions in Elliptic Problems and Elasticity. Paris: Masson, 1988. 200 с.
15. Logan D.L. A First Course in the Finite Element Method, 6th edition. Boston: Cengage Learning, 2011. 432 с.
16. Müller A., Johansson P. Scalable boundary conditions for FEM in complex geometries. Amsterdam: Elsevier, 2018. 284 p.
17. Phillips W.A., Smith J.D. Scalable boundary conditions for finite element simulations. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 256 p.
18. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 7th edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2013. 768 с.

УДК 004.021

Практика применения композитных материалов в благоустройстве территорий производственных предприятий

Сергей Николаевич Шульженко, доктор технических наук,
профессор кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова» –
филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии»,
г. Королев, Московская область,

Николай Антонович Шульженко, доктор технических наук,
профессор кафедры «Финансы и менеджмент»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула

В статье приведены общие сведения о композитных материалах, их характеристиках и некоторых наиболее распространённых разновидностях. В настоящее время особое внимание уделяется использованию веществ, обладающих улучшенными физико-механическими показателями по сравнению с традиционными материалами. Область применения композиционных материалов в современной технике весьма широка и определяется их структурными особенностями, а также сочетанием свойств, которые дают возможность эффективно решать сложные эксплуатационные задачи, в том числе при использовании этих материалов при благоустройстве территорий производственных предприятий. Отмечена важность использования различных типов композитов и обозначены перспективные направления развития данной отрасли.

Композитный материал, стеклопластик, углепластик, базальтопластик, производственное предприятие.

The practice of using composite materials in the improvement of industrial enterprises

Sergey Nikolaevich Shulzhenko, doctor of Technical Sciences,
professor of the department of information technologies and control systems,
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov» –
Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow State University of Geodesy and Cartography», Korolev, Moscow region,
Nikolai Antonovich Shulzhenko, doctor of technical sciences,
professor of the department of finance and management,
Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education
«Tula state university», Tula

The article provides general information about composite materials, their characteristics, and some of the most common types. Currently, there is a focus on using materials with improved physical and mechanical properties compared to traditional materials. The application of composite materials in modern technology is diverse and depends on their structural features and the combination of properties that allow for effective solutions to complex operational challenges. The article highlights the importance of using various types of composites and identifies promising areas for the development of this industry.

Composite material, fiberglass, carbon fiber, basalt fiber, manufacturing enterprise.

Введение

В последние десятилетия материалы нового поколения становятся основой для повышения эффективности инженерных решений в различных отраслях. Современная наука о материалах сосредоточена на улучшении конструкционных и функциональных характеристик путём создания и совершенствования композиционных систем различной природы. Существенный прогресс достигнут в разработке полимерных, металлосодержащих и неорганических композитов на основе цемента, гипса и других вяжущих веществ.

Особый интерес представляют металломатричные композиционные материалы, в структуру которых введены высокомодульные армирующие компоненты – частицы и волокна. Их использование позволяет существенно повысить жёсткость, прочностные характеристики и теплопроводность композита при сохранении эксплуатационной стабильности. Такие материалы обладают высоким потенциалом для применения в ответственных узлах конструкций и при решении сложных технологических задач [2].

Несмотря на накопленный объём экспериментальных данных, дальнейшее развитие данной области требует углублённого анализа фазовых взаимодействий, уточнения морфологии компонентов и изучения структурных особенностей получаемых композитов. Актуальной задачей остаётся разработка эффективных методов синтеза и модификации, обеспечивающих воспроизводимость свойств и контроль над микроструктурой. Эти направления представляют ключевое значение для создания конкурентоспособных материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Ключевой задачей является снижение себестоимости производства при одновременном упрочнении за счёт введения наночастиц, что делает данное направление особенно актуальным как с научной, так и с практической точки зрения.

Опыт практического применения показывает, что традиционные конструкционные материалы быстро утрачивают свои первоначальные характеристики под воздействием эксплуатационных нагрузок и внешних факторов. Их физико-механические свойства зачастую не соответствуют требованиям, предъявляемым к современным инженерным системам, особенно в условиях экстремальных температур и нагрузок. В этом контексте композитные материалы нового поколения демонстрируют существенно более высокий потенциал, обеспечивая расширенные функциональные возможности и устойчивость к внешним воздействиям.

В последнее время возрастает интерес к исследованию теплофизических

характеристик композитов, в частности, температуропроводности – параметра, отражающего способность материала к передаче теплового импульса. Температуропроводность рассматривается как одно из ключевых транспортных свойств, наряду с теплопроводностью и диффузионной подвижностью, и определяется комплексным вкладом фононных и электронных механизмов переноса. Анализ этого параметра позволяет не только глубже понять микрофизику процессов теплопередачи в композитных структурах, но и целенаправленно модифицировать их состав и архитектуру для достижения требуемых эксплуатационных характеристик.

В наноструктурированных композитах уменьшение размеров кристаллов и возрастание роли их границ приводят к более эффективному рассеянию фононов и электронов, что положительно сказывается на тепловых характеристиках. Именно поэтому композиты в этом отношении демонстрируют преимущества перед традиционными материалами [5].

Постановка задачи

Композитные материалы представляют собой гетерогенные системы, в которых достигается синергетический эффект за счёт рационального сочетания компонентов с различной природой и физико-химическими свойствами. Повышенные прочностные и жёсткостные характеристики таких материалов обусловлены формированием межфазных взаимодействий и новых типов структурных связей, возникающих на границе раздела фаз. Это обеспечивает широкий потенциал их применения в технологически и механически нагруженных системах.

Ключевой задачей при разработке композитов остаётся создание высокоэффективной архитектуры материала, в которой каждый компонент не просто сохраняет свои индивидуальные свойства, но и вносит функциональный вклад в усиление совокупных эксплуатационных характеристик. С этой целью особое внимание уделяется выбору и взаимодействию двух основных структурных составляющих: матрицы (связующего) и армирующего элемента [3].

Матрица, как правило, формируется из полимерных, термореактивных или термопластичных веществ и отвечает за интеграцию системы, обеспечивая необходимый уровень пластичности, термической устойчивости и сопротивления внешним воздействиям. Армирующий компонент вводится в виде волокон, пластинчатых или порошковых частиц, в том числе с наноструктурированной организацией, что позволяет существенно увеличить прочность, модуль упругости и стойкость к разрушению. Использование наноструктурированных армирующих элементов, в частности волоконного или слоистого типа, обеспечивает создание направленной структуры с заданными анизотропными свойствами, что критически важно для инженерных применений.

Опыт эксплуатации традиционных покрытий на промышленных территориях, например, асфальтобетонных, показывает их преждевременное разрушение. Основная причина заключается в недостаточной анизотропии, которая не учитывает кручение, изгиб и сжатие при динамических нагрузках, воздействующих на поверхность.

Применение интегрированного подхода, сочетающего технологии склеивания слоёв с контролем ориентации армирующих волокон, позволяет значи-

тельно повысить эксплуатационные характеристики композитных материалов, используемых в дорожных покрытиях, тротуарах и промышленных площадках. Такой метод формирования многослойной структуры способствует созданию квазиизотропного материала с равномерно распределёнными механическими свойствами, аналогичными тем, что наблюдаются в металлических сплавах и конструкционных металлах. Иллюстрацией данного эффекта служат результаты, представленные на рисунке 1.

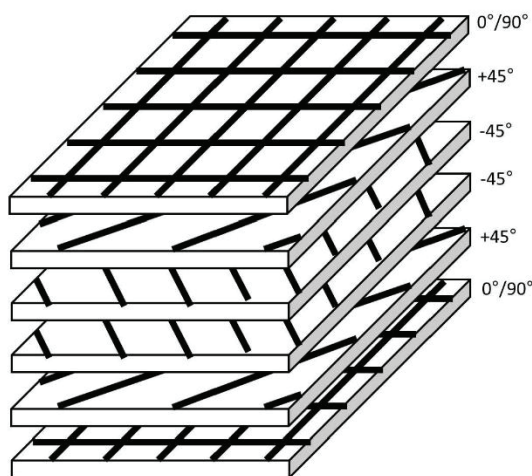


Рисунок 1 – Квазизотропная кладочная конструкция покрытия территории производственного предприятия

На завершающем этапе изготовления композитного материала, предназначенного для использования в зонах благоустройства промышленных территорий, формируется техническая документация, включающая паспорт качества. В данном документе фиксируются ключевые эксплуатационные и технологические параметры, отражающие такие характеристики, как прочность, жёсткость и долговечность изделия [1].

Методы решения

В рамках математического моделирования процесса формирования композиционного материала выделяют два основных подхода к описанию взаимодействия компонентов:

а) Структурно-зависимые модели, учитывающие влияние пористости и пространственного распределения армирующих частиц и волокон. Эти модели основаны на формализации через диаграммы состояния и законы диффузии, что позволяет количественно оценить внутренние структурные связи и их влияние на свойства материала.

б) Концентрационные модели, которые описывают зависимость механических характеристик композита от объёмной доли армирующих волокон. В частности, такие модели выражают изменение напряжений и деформаций при растяжении в зависимости от концентрации отдельных волокон в матрице:

$$\sigma_{ув\ p} = \frac{\sigma_{тв\ p}}{K_{\sigma}} \quad (1)$$

При этом:

$$K^{\sigma} = \frac{1 - V_f \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)}{1 - \left(4 \frac{V_f}{\pi}\right)^{0,5} - \frac{E_m}{E_f}} \quad (2)$$

Где:

'р – растягивающий коэффициент напряжения;

V_f – доля по волокну;

E_m, E_f – соответствующие модули Юнга

$\sigma_{\text{тв р}}$ – значение прочности при растяжении

в) условие соотношения значений прочности матрицы и волокна:

$$\sigma_{\text{уд.матр.}} < \sigma_{\text{уд.волокна}} \quad (3)$$

г) другие композитные технологии [4].

В контексте создания квазитропных покрытий, применяемых для благоустройства территорий и площадок на промышленных объектах, основное внимание сосредоточено на развитии и внедрении композитных материалов, обладающих комплексным набором эксплуатационных характеристик. На сегодняшний день выделяются три ключевых класса базовых структур, которые продолжают совершенствоваться и адаптироваться под специфические требования отрасли.

Стеклокомпозиты на стекловолокнах на основе активных вяжущих смол и термопластов на основе поликарбонатов. Эти композиты отличаются удельным весом в диапазоне 1,4-2, что при сохранении диэлектрических свойств обеспечивает их востребованность, например, в зонах с интенсивным движением тяжёлой техники и в авиационных инфраструктурах. Стеклокомпозиты демонстрируют высокую устойчивость к коррозии и обладают низкой теплопроводностью, что способствует их долговечности и функциональной стабильности.

Углепластики характеризуются наличием нескольких слоёв, включающих углеродные волокна и специализированные смолы. Благодаря низкой плотности и значительной прочности они обеспечивают повышенную износостойкость и термостойкость, а также обладают огнестойкими и диэлектрическими свойствами. Эти материалы находят широкое применение в конструкциях, где необходима высокая механическая надёжность при минимальном весе.

Базальтопластики – композиты, формируемые на основе базальтовых жгутов. Базальтопластики демонстрируют химическую инертность, отличную адгезию с бетонными матрицами и значительную деформационную устойчивость, что делает их перспективными для применения в промышленных зонах.

Внедрение лёгких композитных покрытий в производственные зоны способствует значительному сокращению времени и затрат на строительные и монтажные работы за счёт снижения машинозатрат и трудоёмкости, при этом сохраняя основные механические свойства конструкций. Дополнительно учитывается стойкость материалов к агрессивным химическим средам, что существенно повышает надёжность и срок службы покрытий [6].

Особое значение приобретает замена традиционных компонентов железобетона – арматуры и бетона – на современные композитные аналоги. В современных материалах армирующими элементами выступают углеродные и стеклянные нити, а в качестве связующего используются сложные полимерные смеси.

Следует подчеркнуть, что отдельные компоненты композитов не обладают

высокими механическими свойствами сами по себе. Высокая прочность и долговечность обеспечиваются только благодаря комплексному взаимодействию всех составляющих, где матрица играет роль связующего звена, обеспечивая однородность и прочность структуры. Такая синергия компонентов значительно улучшает эксплуатационные характеристики покрытий, используемых для благоустройства промышленных территорий, а также дорожных и пешеходных зон.

Описание результатов

В результате комплексного сочетания композитных элементов формируется материал, обладающий высокой прочностью, пластичностью и долговечностью, а также улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Такой материал находит широкое применение при благоустройстве промышленных территорий, а также в дорожных и пешеходных покрытиях.

Существенным преимуществом данного квазиизотропного покрытия является возможность гибкой настройки технологии его производства под конкретные инженерные и производственные задачи. Особенно значимым фактором становится использование полимерных связующих, поскольку в условиях промышленных территорий и транспортной инфраструктуры покрытия подвергаются интенсивному воздействию природно-климатических и эксплуатационных факторов. В качестве наиболее эффективных связующих компонентов применяются эпоксидные, полиамидные и фенольные смолы, которые в составе модифицированных матриц обеспечивают адаптацию к различным режимам эксплуатации и функциональному назначению. Это делает покрытия универсальными и пригодными для использования в разнообразных климатических зонах страны [9].

Наряду с техническими характеристиками важным аспектом применения композитных материалов выступает экономическая составляющая. Сегодня рынок квазиизотропных покрытий активно развивается в различных отраслях, а их использование при обустройстве проездов, подъездных путей промышленных зон, разворотных площадок и аналогичных объектов демонстрирует высокую экономическую эффективность. При этом учитывается не только снижение затрат, но и значительное увеличение срока службы, что особенно важно в условиях повышенных нагрузок и интенсивного износа.

Увеличение производственных возможностей в области разработки данных материалов создаёт предпосылки для их более широкого внедрения [14].

Тенденции отражены на рисунке 2.

Сфера применения

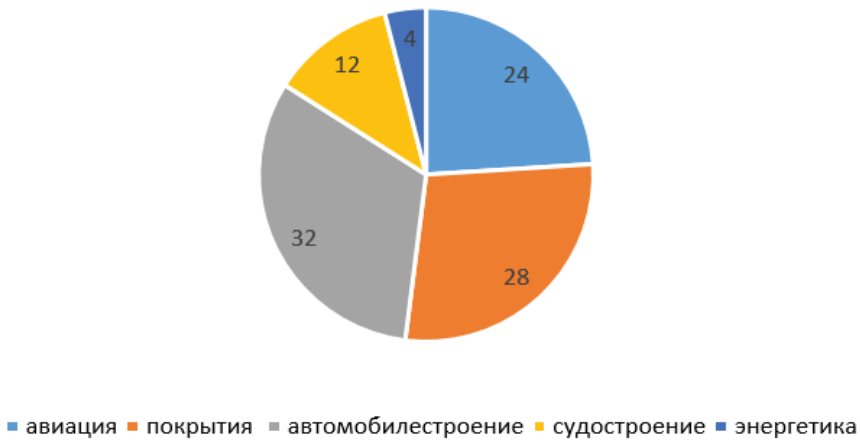


Рисунок 2 – Статистика прогноза по сферам применения до 2030 г.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время Россия значительно уступает ведущим мировым странам в сфере разработки и внедрения композитных материалов. Несмотря на постепенное внедрение инновационных технологий в отечественное производство и постепенное вытеснение традиционных методов, доля российских композитов на глобальном рынке остаётся минимальной – порядка 1%. В количественном выражении это отражается в существенной разнице: при среднемировом показателе потребления композитов около 7,5 кг на одного жителя, в России данный показатель составляет менее 0,5 кг на человека.

Хотя в стране наблюдается динамичное развитие композитной отрасли, реализуются программы импортозамещения и стимулируются отечественные инновационные проекты, зависимость от зарубежных производителей оборудования и комплектующих остаётся значительной. Кроме того, спектр и номенклатура выпускаемых материалов пока остаются ограниченными, что препятствует масштабному развитию и конкурентоспособности российского сектора композитных технологий [8].

Вместе с тем при проведении математических расчётов и научных исследований используется международный опыт и признанные мировые подходы. Данные методы используются для оптимизации соотношения компонентов в композиционных материалах и изучения их взаимного влияния на механические свойства.

$$\sigma_{\text{вкм}} = \sigma_{\text{вф}} V_f + \frac{\sigma_{\text{вм}}}{1 - V_f} \quad (4)$$

$$E = E_m \left(1 + V_f * n \frac{L_{\text{кр}}}{d_f} \right) * (1 - n * V_f) \quad (5)$$

$$n = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \frac{L_{\text{кр}}}{d_f}} \quad (6)$$

где E_m , E_f – модули Юнга.

Формулы (4)-(6) универсально применимы в расчетах концентрации армирующих волокон [7].

Следует подчеркнуть высокую скорость монтажа композитных сооружений, например, реконструкция разрушенного путепровода на заводе, представленного на рисунке 3 была выполнена всего за 4 месяца [16].

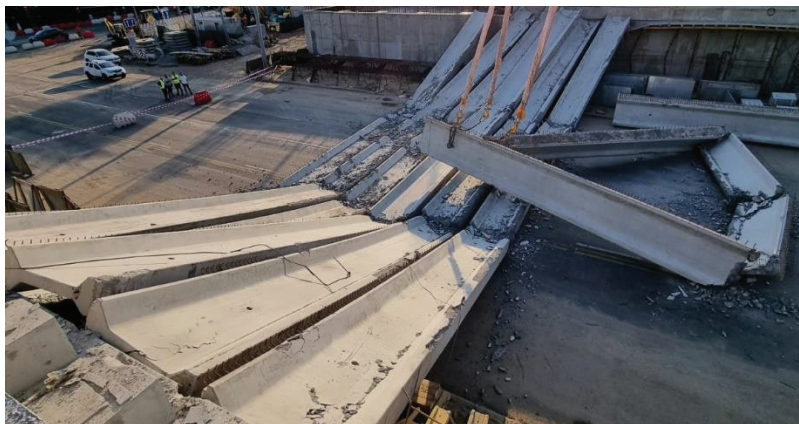


Рисунок 3 – Обрушение путепровода промзоны



Рисунок 4 – Возведение нового путепровода из композитных материалов

В рамках рассматриваемой задачи благоустройства промышленных территорий была реализована замена традиционных покрытий, включая дорожные и пешеходные зоны (см. рисунок 5), на модернизированные покрытия, изготовленные из высокопрочных композитных материалов [11] (см. рисунок 6).



Рисунок 5 – Разрушенное покрытие территории благоустройства промышленной зоны территории Обидимского кирпичного завода



Рисунок 6 – Обновленное покрытие из композитных материалов территории завода

В числе перспективных направлений развития композитных технологий остаются малоизученными вопросы интеграции наносеток с ультрадисперсной ячеистой структурой на основе оптических волокон в состав покрытий [15].

В перспективе широкое использование композитных материалов будет способствовать значительному повышению надёжности объектов, требующих специализированных покрытий. При этом развитие отечественного производства полного спектра композитных материалов и снижение их производственных затрат создадут условия для масштабного внедрения таких покрытий в разнообразные строительные и инфраструктурные проекты.

Для отечественной промышленности одной из приоритетных задач является активизация научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также создание условий для гибкой интеграции научной базы и экспериментальных разработок в действующую законодательную и нормативную систему. Данная стратегия позволит оптимизировать процессы проектирования и производства композитных конструкций, соответствующих приоритетным направлениям экономического развития.

Важным аспектом реализации этих целей является сопровождение научных исследований разработкой новых патентов, стандартов и технических регламентов. Такой комплексный подход обеспечит переход к серийному производству инновационных изделий и конструкций на базе современных композитных материалов с обновлённой номенклатурой для различных отраслей промышленности.

Выводы

Установлено, что на долю композитных технологий в нашей стране приходится всего около 1% от общего объема производства. В связи с этим требуется активное внедрение таких технологий в промышленный сектор, особенно в условиях расширения политики импортозамещения и модернизации законодательной и нормативной базы.

Отмечена необходимость расширения номенклатурного перечня и серийного ассортимента продукции данного направления.

Согласно прогнозному анализу на период 2024-2030 годов, в связи с увеличением использования квазитропных композитных материалов в ряде отраслей, ожидается, что темпы реконструкции и модернизации транспортной инфраструктуры, а также обустройства территорий промышленных предприятий при активном росте производства, достигнут показателя в 28%.

Композиты устойчивы к агрессивным средам, влаге, ультрафиолетовому излучению, коррозии и механическим повреждениям. Это особенно актуально на промышленных площадках, где воздействие химикатов, температурных перепадов и вибраций – обычное дело.

Следует учесть еще то, что композитные материалы легко формуруются в сложные формы и окрашиваются в массу, что открывает широкие возможности для проектирования промышленных зон.

Таким образом, применение композитных материалов в благоустройстве промышленных предприятий может значительно повысить эффективность, безопасность и экологичность этих территорий. В перспективе это приведёт к снижению эксплуатационных расходов, улучшению условий труда и внешнего облика производственных зон.

Литература

1. Гавриленко В.А. Композиты 21 века: возможности и реальность. Опубликовано в журнале [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://imga2ine.neftgaz.ru/articles/pererabotka/504745-kompozity-21-veka-vozmozhnosti-i-realnost> (Дата обращения: 07.10.2023).
2. Гребенкин А.В. Бизнес-планирование в предпринимательской деятельности: учебное пособие. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2022. 172 с.

3. Колосова А.С., Пикапов Е.С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 10. С. 54-67.
4. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на основе древесного сырья // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 3. С. 66-77.
5. Кордюкова А.П. Перспективные направления развития полимерных связующих и полимерных композиционных материалов на их основе // Молодой ученый. 2022. № 30(425). С. 1-4.
6. Кузнецов А.А. В России создадут крупнейший композитный кластер [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kp.ru/daily/26795/3830106/> (Дата обращения: 26.06.2023).
7. Купцова Е.В. Бизнес-планирование: учебник для высшего образования. М.: Юрайт, 2020. 436 с.
8. Лопарева А.М. Бизнес-планирование: учебник для высшего образования. М.: Юрайт, 2020. 274 с.
9. Лопарева А.М. Бизнес-планирование: учебник для высшего образования. М.: Юрайт, 2023. 272 с.
10. Марценюк В.В. Многослойные материалы для теплозащиты // Композиты и наноструктуры. 2020. Т. 12. № 1(45). С. 14-20.
11. Опыт инновационной деятельности в зарубежных странах и в России [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://swdopedia.ru/21_118819_opit-innovatsionnoy-deyatelnosti-v-zarubegnih-stranah-i-v-rossii.html (Дата обращения: 07.10.2023).
12. Орлова П.И. Бизнес-планирование: учебник для бакалавров. М.: Дашков и К, 2020. 284 с.
13. Павлычева С.А., Пикапов Е.С. Характеристика современных материалов для облицовки фасадов и цоколей зданий и сооружений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 4. С. 55-61.
14. Пушилина Ю.Н., Шульженко С.Н., Шульженко Н.А. Развитие предприятий малого и среднего бизнеса в строительном комплексе Тульской области // Инженерный вестник Дона. 2022. № 12(96). С. 660-668.
15. Тихомирова В.В., Смирнова П.С. Полимерные композиционные материалы с древесными наполнителями и перспективы использования отходов при их производстве. 2022. № 12. С. 98-102.
16. Фокин И.В., Стуров А.А., Иванов Ю.Н. Перспективы развития композиционных материалов в XXI веке // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири. 2021. С. 208-211.

Адрес редакции:
141070, Королев,
ул.. Октябрьская, 10а
Тел.: +7 (495) 543-34-30 (доб. 138)

www.unitech-mo.ru

Формат 100х70/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.-печ. л. 7,625. Тираж 500 экз.
Заказ № 4890.

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов П.И.
394086, г. Воронеж, ул. Любы Шевцовой, 34,
тел.: +7 995 494-84-77, www.strokivrn.ru