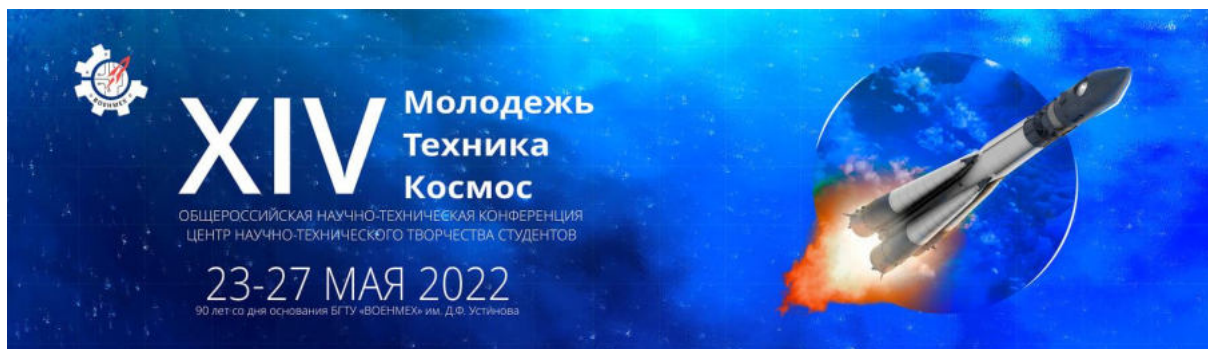


Министерство науки и образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»
Российская академия ракетных и артиллерийских наук (РАРАН)
Российская академия космонавтики им. К. Э. Циолковского (РАКЦ)
Санкт-Петербургское отделение



МОЛОДЕЖЬ. ТЕХНИКА. КОСМОС

Труды четырнадцатой общероссийской
молодежной научно-технической конференции

Том 2

Санкт-Петербург, Россия
23 – 27 мая 2022 года

Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 87

Санкт-Петербург
2022

УДК 629.78 : 623.4

M75

M75

Молодежь. Техника. Космос: труды четырнадцатой общерос. молодежн. науч.-техн. конф. В 4 т. Т. 2. СПб., Издательство Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 2022. – 283 с. – Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 87.

Публикуются статьи и доклады, представленные на XIV общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», прошедшей в Балтийском государственном техническом университете «Военмех» им. Д. Ф. Устинова в мае 2022 года. В четвертый том сборника вошли материалы секций «Современные технологии в авиа- и ракетостроении», «Системы управления и информационные технологии, радиотехника и схемотехника».

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

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

УДК 629.78 : 623.4

Редакционный совет: д-р техн. наук, проф. *К. М. Иванов* (председатель), д-р техн. наук, проф. *В. А. Бородавкин*, канд. техн. наук, доц. *С. А. Матвеев*, канд. техн. наук, доц. *А. А. Левихин*, канд. ист. наук, доц. *М. Н. Охочинский*, нач. ЦНГТС *В. А. Толстая*, д-р техн. наук, доц. *А. Е. Шашурин*, д-р экон. наук, проф. *А. Д. Шматко*, канд. техн. наук, доц. *Л. П. Юнаков*, ст. преп. *С. А. Чириков*

Публикуется в авторской редакции

© БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 2022

© Авторы, 2022

Оглавление

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТЕЛЕЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ	6
ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ СМЕШИВАНИЯ В КАНАЛЕ	9
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНА	12
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО И ПОДВОДНОГО КРЫЛА	16
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ ОБРАЗЦОВ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ-159 (ХН58МБЮ)	20
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА БРНХК 2,5-0,7-0,6 С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУЖИН	24
ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ К ВНЕШНИМ ВИБРАЦИОННЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА ПРИ ПОМОЩИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ	29
ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ РЕЗАНИЕМ ЛИНЕЙНОГО ПОЛИАМИДА И АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ	31
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СПЛАВЛЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ	36
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ	39
ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ПР-ХН52К11МТЮ	42
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ НА КАЧЕСТВО ИМИТАЦИИ АКСЕЛЕРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	45
МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТАЛИ «РАМА» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	48
МОДЕРНИЗАЦИЯ АВИАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА	52
НАНОМЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОЁМКОСТНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	55
НАПЫЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОПОГЛАЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ	60
НАХОЖДЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛА ДЛЯ БОЛЬШИХ ЧИСЕЛ МАХА С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА <i>FLOW SIMULATION</i> САПР <i>SOLIDWORKS</i>	64
ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ	68
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ПРИСУТСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА НА МАРСЕ	72
ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПРУЖИН В СУДОВОЙ И ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЕ ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ	77
ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ	79
ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ГИБКИХ ВОЛНОВОДОВ ИЗ МЕДНОГО СПЛАВА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ	81
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ИЗДЕЛИЙ РКТ	84
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОРСУНКИ МЕТОДАМИ ПОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТИ	86
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПЛОТНЕНИЙ ГИДРОЦИЛИНДРА	88
УЧЕТ РАЗБРОСА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ	96
ЦИФРОВОЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ	100
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ТОПЛИВА	103
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ СОПЛА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА <i>FLUENT ANSYS</i>	108
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БЛОЧНЫХ СТРУЯХ	112
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СТУПЕНИ ТУРБОМАШИНЫ	114
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОРОШКА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ	118
«BUILDER» – СИСТЕМА СБОРКИ ZIP ПАКЕТОВ ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ «© ОРБИКРАФТ СПУТНИК»	121
ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ	123
ВОЗМОЖНОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СПАК-2	126
ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ	130
ДИСКРЕТНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ТИПА НЕСУЩИЙ КОРПУС	133

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ	138
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ КАНАЛА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ.....	140
ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ	148
ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛЕЙ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ОБЗОРЕ	151
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫ И СИГНАЛА БОРТОВОЙ РЛС НА КАЧЕСТВО РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ.....	153
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В МЕДИЦИНЕ И СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ.....	158
ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ.....	160
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТРА ПРИЕМНОГО ТЕЛЕСКОПА ТЕРМИНАЛА ЛАЗЕРНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ.....	163
МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ СЛОЖНОЙ ЗАДАЧИ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ РАСКРОЯ И УПАКОВКИ	167
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЯГИ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ	170
НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ	174
ОБЗОР МЕТОДОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ФАЗЗИНГ-ТЕСТИРОВАНИЯ.....	176
ОБЩИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ОБЛАСТЕЙ ДОСТИЖИМОСТИ.....	179
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТА НАГРУЗКИ НА СИЛОВОЙ ГИРОСКОП ОТ ВРАЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА	183
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ	186
ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ДАННЫХ В СПЕЦИАЛЬНОМ МАТЕМАТИЧЕСКОМ И ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ СИСТЕМ АНАЛИЗА, ОПТИМИЗАЦИИ, УПРАВЛЕНИЯ, ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ	189
ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ СЕРВИСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ТЕРРИТОРИИ АЭРОДРОМА	192
ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ВЫСШИХ ТИПОВ В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ.....	196
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СМЕЩЕНИЯ ЛУЧА АНТЕННЫ НА РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ В КОСМИЧЕСКОЙ РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ МАРШРУТНОГО РЕЖИМА ОБЗОРА	199
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ И ПОРОГОВЫЙ АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	205
ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ, РЕКОНСТРУИРУЮЩЕЙ ТРЕХМЕРНУЮ ФОРМУ ОБЪЕКТОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ	209
ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	212
ПРОГРАММНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ПО РАСПОЗНАНИЮ И КОНВЕРТАЦИИ МУЗЫКАЛЬНЫХ ФРАГМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....	217
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА ЭТАПЕ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ	222
РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ СКРИНИНГОВ.....	225
РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ АНТРОПОЛОГОВ	228
РАЗРАБОТКА МАКЕТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ФРАГМЕНТА КРУПНОГАБАРИТНОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ АНТЕННЫ.....	231
РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ ЭКСПЕРИМЕНТОМ «ПЫЛЬ-УФ».....	233
РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ "ГАЗОАНАЛИЗАТОР-ФС"	237
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА МОРСКОГО ДНА	240
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ДЕТЕКТИРОВАНИИ ВЗРЫВНЫХ УСТРОЙСТВ	242
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ФОРМАЦИИ МАЛЫХ СПУТНИКОВ	245
РАСЧЕТ ФИЛЬТРУЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ	249
РЕАЛИЗАЦИЯ УДАЛЁННОГО МОНИТОРИНГА АКТИВНОГО СЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ ОТСЛЕЖИВАНИЯ СТАТУСОВ "ZAVVIX" ПОСРЕДСТВОМ ПРОТОКОЛА SNMPV3	252
СИСТЕМА РАДИОСВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ.....	256
СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	259
СОЗДАНИЕ ИГРОВОГО ПРИЛОЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМЫМИ СИГНАЛАМИ МОЗГОВОГО РИТМА.....	261
СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ ДАННЫХ ЛИДАРА И КАМЕРЫ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕЙ	263

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ СЛУЖБ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТОВ	267
СРАВНЕНИЕ УКРЕПЛЕНИЙ ПАТРУБКОВ В СОСУДАХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ.....	269
УСТРОЙСТВО АВТОНОМНОЙ РЕГИСТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АМПУЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА	273
ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЕВАНТНОЙ ВЫДАЧИ НА ОСНОВЕ ПОИСКА ПО ГРУППЕ СЛОВАРЕЙ.....	276
ЦЕНТР УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТАМИ. ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГРУЗКИ КОНТЕНТА.	280

УДК 621.914.5.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТЕЛЕЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

П. А. Иванов, А. А. Чуйкин, К.Н. Шония

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

В современных подъемно – транспортных устройствах вспомогательных систем аэрокосмической отрасли, кроме гидравлических устройств широко применяются всевозможные редуктора содержащие зубчатые зацепления. Данные зубчатые зацепления чаще всего представляют пару зубчатое колесо – шестерня. Как правило подобные пары предназначены для передачи больших крутящих моментов и имеют модуль зуба от 5 до 12 мм. В большинстве они имеют прямой или косой зуб. Изготовление подобных зубчатых колес и шестерен представляет ряд проблем в первую очередь связанных с организационной формой и типом серийности производства. Изделия в состав которых входят силовые зубчатые зацепления как правило единичны или составляют до десятка штук в год определенные партии выпуска. Поэтому применение широко известных методов нарезания зубчатого венца методом обкатывания или копирования на традиционно используемом для этих целей оборудовании не представляется экономически целесообразным [1]. Поэтому актуально использование новых, прогрессивных методов, рационально сочетающих в себе возможности современных пяти- или шести- координатных станков с ЧПУ (обрабатывающих центров), инновационных пакетов прикладных программ (встроенных сопроцессоров в ЧПУ) и уникальных возможностей новых инструментальных материалов для режущего инструмента.

Использование станков с ЧПУ и инновационных режущих инструментальных материалов полученных методом порошковой металлургии позволяю получить следующие преимущества: высокая производительность производства, большая гибкость по отношению к номенклатуре обрабатываемых заготовок деталей, быстрая адаптация и подбор режимов обработки для конкретной пары инструментальной – обрабатываемый материал.

Современное, прогрессивное зубофрезерование на станках с ЧПУ предлагает сравнительно небольшое количество компаний. Одной из таких компаний является шведская компания Sandvik Coromant. Она предлагает инновационный способ фрезерования зубчатых колес - технология Invomilling, представленной на рис.1.



Рис. 1. Обработка зубчатых колес по технологии Invomilling: а – схема обработки профиля зуба и впадины; б, в – фреза для черновой и чистовой обработки профиля зуба Sandvik Coromant

Главные отличительные черты этой технологии – гибкость и универсальность. С точки зрения кинематики данный метод относится к методам огибания с тем лишь отличием, что имитируется не зацепление, а инструмент «обкатывает» каждую впадину зубчатого колеса за счет возможности непрерывной обработки на токарно-фрезерном 5-осевом центре. Кадр управляющей программы по технологии Invomilling, представлен на рис. 2.

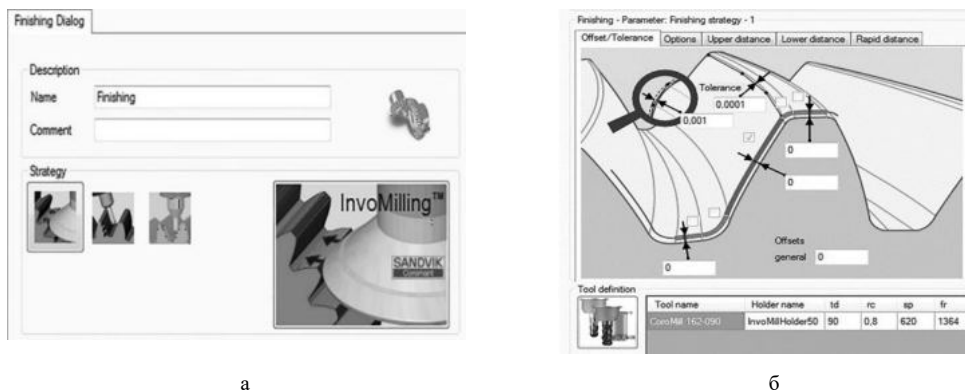


Рис. 2. Кадр управляющей программы сопроцессора Invomilling при отладке траектории движения режущих инструментов: концевой и дисковой фрезы: а – обращение к управляющей программе; б – визуализация и уточнение, отладка траектории инструмента

Простота наладки и программирования, малая номенклатура инструмента и возможность с малыми нагрузками произвести обработку зуба с модулем до 12 мм делает данный метод идеальным решением для мелкосерийного или единичного производства. Метод Invomilling может быть с высокой эффективностью реализован на токарно-фрезерных обрабатывающих центрах Okuma Multus U.

Технологию Invomilling уместно применять на универсальных пяти -координатных обрабатывающих центрах в условиях единичного и мелкосерийного производства, в общем машиностроении, при производстве опытных единичных образцов и экспериментальном производстве, а также в ремонтных цехах и учебных центрах. Нарезание зубчатого венца на станках ЧПУ позволяет существенно сократить цикл всей обработки. В частности, подобный цикл может исключить время, связанное с дополнительной транспортировкой внутри цеха, снятием и установкой на станке и обработкой зубчатого венца по традиционной схеме. Таким образом весь процесс производства детали с зубчатым зацеплением можно представить в виде схемы, представленной на рис. 3.



Рис. 3. Технологическая схема обработки зубчатых колес с использованием станков с ЧПУ

Однако, полученная таким методом заготовка нуждается в дальнейшей финишной обработке: абразивным инструментом если заготовка детали подвергается закалке или шевером в случае если зубчатый венец не термообрабатывается. Окончательная обработка необходима для увеличения точности зубьев, в первую очередь геометрии профиля эвольвенты и получения заданных параметров шероховатости, представленных на рис.4. Отделочная операция может быть исполнена, такими методами как шевингование, высокоскоростное однопроходное шлифование (в случаи, если деталь является, составляющим специального инструмента, деталью особо точных механизмов и приборов, инструментов, и т.п.), высокоскоростного шлифования.

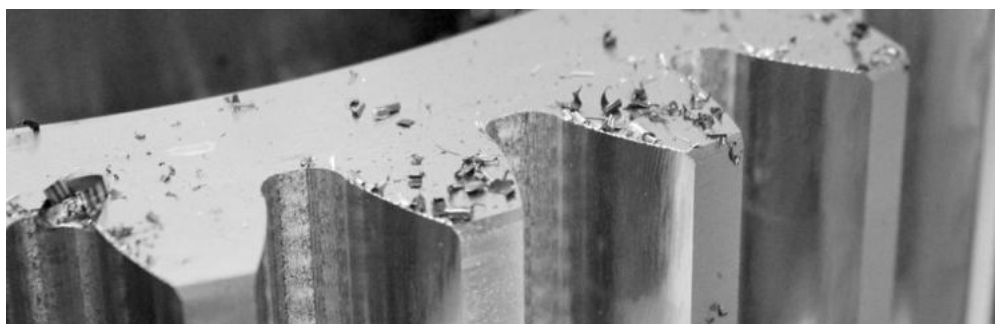


Рис. 4. Вид поверхности профиля зуба после фрезерования по технологии Invomilling. На поверхности видны характерные следы в виде «строчек» от траектории движения инструмента

Шевингование – это технология, применяемая на заключительном этапе производства. Для такого типа обработки используют зубошевинговальные станки. Этот вид обработки используется до закалки заготовки. Иначе шевер не сможет обработать заготовку. После окончания обработки зубья имеют правильную форму и их поверхность получается механически прочной и упругой. Вследствие чего, уровень шума при эксплуатации меньше, а точность передачи больше. В связи с характеристиками некоторых сплавов обработка шлифованием не всегда возможна, в таких случаях используют шевингование.

Высокоскоростное шлифование используется для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов, разных по форме [2]. Скорость вращения круга при высокоскоростном шлифовании составляет 60..100м/с. Столь существенное увеличение скорости влияет и на подачу. Это позволяет повысить подачу в 2-4 раза. Что благоприятно влияет на время обработки и шероховатость. Смысл этого процесса заключается в том, что обработка происходит на узком участке длиной 1 мм. Это обеспечивает максимальную скорость при минимальной удельной энергии шлифования.

Для обработки резанием на современных пяти – координатных станках ЧПУ используются различные инструментальные материалы. Чаще всего используют твердые сплавы, реже быстрорежущие стали, для изготовления режущего инструмента. Твердые сплавы изготавливают методом порошковой металлургии из металлических твердых

металлов (например: карбидов) и из вязких металлов группы сталей, которые выступают в качестве основы. В качестве твердых материалов выступают карбид вольфрама (WC как основной компонент), карбид титана (TiC), карбид тантала (TaC), карбид ниобия (NbC). В качестве связующего металла выступает кобальт (Co) [3].

При изготовлении быстрорежущих сталей, традиционным методом появляются сложности в получении однородной структуры. В структуре быстрорежущей стали появляется карбидная неоднородность. Поэтому наблюдается ухудшение динамической прочности литых сталей. Использование метода порошковой металлургии, позволяет избежать неоднородности. Что ведет к более высоким физико-механическим свойствам материала, из-за возможности исключить образование крупных угловатых карбидов, кроме этого метод получения заготовок достаточно точный, поэтому отпадает необходимости дополнительной механической обработки.

Основываясь, в первую очередь на опыте промышленного использования различного режущего инструмента из порошковых быстрорежущих сталей, можно сделать вывод, что наиболее частыми причинами потерь инструментами своих изначальных свойств является износ и скалывание рабочей части. Более того, количество инструмента, вышедшего из строя в результате выкрашивания, гораздо больше чем от износа. Данная особенность характерна, в первую очередь, для инструмента, испытывающего ударные нагрузки. Например: ASP 2030 – высоколегированная быстрорежущая сталь (см. таблица 1), содержащая в качестве связки до 8,5 % кобальта. Она изготавливается методом порошковой металлургии с использованием процесса ASP. Сущность процесса ASP заключается в распыление металла мощными струями азота на мельчайшие капли, которые затвердевают с очень высокой скоростью [4-7]. Данный порошок собирается в стальной капсуле, которая заваривается и затем следует на прессовку порошка при помощи метода горячего изостатического прессования.

Таблица 1

Состав быстрорежущей стали ASP 2030

C, %	Cr, %	Mo, %	W, %	V, %	Co, %
1.28	4.2	5.0	6.4	3.1	8.5

В результате получается однородная сталь с рядом уникальных характеристик. Однородная структура ASP 2030 усиливает стабильность размеров и устойчивость формы во время термической обработки, а также повышает шлифуемость и прочность. Распределение карбидов и химический анализ образцов в исходном состоянии представлен на рис. 5.

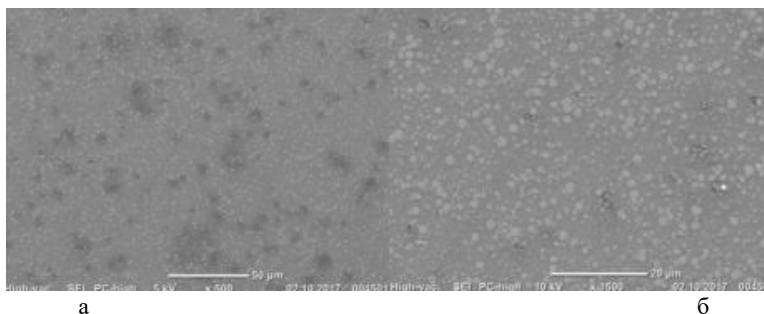


Рис. 5. Распределение карбидов в металлической основе материала в состоянии поставки при увеличении: а – $\times 500$; б – $\times 1500$

Одним из наиболее перспективных направлений, для использования порошковых сталей, является зубообработка. Используя преимущества данного материала возможно изготовление и использование следующих типов инструмента: различные червячные фрезы; дисковые модульные фрезы для шлицевых соединений; дисковые, чашечные, хвостовые долбяки; зуборезные рейки; шеверы дисковые для параллельного, врезного, диагонального и тангенциального шевингования; различного вида накатники для обработки фасок зубьев шестерен;

Разработанная технология Invomilling, основываясь на пяти –координатных станках фирмы Okuma, активно продвигает метод комплексной обработки, для изготовления деталей с зубчатым зацеплением, не указывая, однако необходимость дополнительной абразивной обработки до того, как заготовка будет подвержена термической обработке.

В целом, для современного машиностроения характерно повышение требований к точности зубчатых передач, использование передовых решений обработки на конечном этапе, помогает ещё больше увеличить точность изделия, обеспечивает необходимую шероховатость на зубьях, увеличивая тем самым суммарное пятно контакта зацепления. Увеличение точности зубчатых элементов особенно важно в таких изделиях как, газовые, паровые турбины и авиационные двигатели, измерительные колеса и прочих изделиях ответственного назначения. Причем шероховатость рабочих поверхностей зубьев, зачастую, не должна превышать значений Ra 0,20 мкм. Особенно актуально проблема точности зубчатых элементов стоит в авиа - космической отрасли и судостроении.

Использование порошковых быстрорежущих сталей после специальной термообработки для современных зуборезных инструментов позволит существенно повысить производительность механической обработки, уровень контроля над технологическим процессом, увеличить срок службы инструмента, обеспечить требуемую точность и качество обработки зубчатого профиля.

Библиографический список

1. С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган и др. — Под общ. ред. Б.А. Тайца. Справочник. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990. — 464 с.:
2. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. М.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. — 248 с.: ил.
3. Баранчиков В.И. Жаринов А.В. Юдина Н.В. Садыхов А.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов. Справочник. М., Машиностроение, 1990. - 400 с.: ил

4. Далис Е. Д. Быстрорежущие инструментальные стали, полученные методом порошковой металлургии // Порошковая металлургия материалов специального назначения / Е. Д. Далис. Москва : Машиностроение, 1977. 300 с.
5. Гуревич Ю. Г. Термическая обработка порошковых сталей / Ю. Г. Гуревич, В. И. Рахманов. Москва : Металлургия, 1985. 80 с.
6. Термообработка порошковых сталей / С. И. Богодухов [и др.]. Москва : Вестник ОГУ 5, 2004. С. 150–153
7. Курганов А. В. Оценка влияния предварительной термической обработки на структуру порошковой быстрорежущей стали типа ASP 2030 / А. В. Курганов, Н. В. Юршева // Материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых. Екатеринбург, 21-23 ноября 2017. — Екатеринбург : УрФУ, 2017. — С. 81-85.

УДК 621.45.034

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ СМЕШИВАНИЯ В КАНАЛЕ

К.К. Григорьева, Е.М. Шаронов

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

В современном мире все большую значимость приобретают исследования конструкции и процесса горения в камерах энергоустановок. В данной направлении эксперименты, как правило, связаны с большим количеством технических трудностей и требованием финансовых затрат.

При изучении термогазодинамики потока и горения топлива в нем следует учесть множество физико-химических и термогазодинамических процессов. Необходимо отметить правильность описания процессов горения, что ставит перед нами цель подбора и глубокого анализа моделей химической кинетики. Так же известно, что время, доступное для впрыска топлива, смешения с воздухом, воспламенения и сгорания очень мало, и как никогда остро стоит проблема подбора условий для интенсивного сжигания, которым должны удовлетворять не только само топливо, но и геометрия камеры сгорания.

Одним из самых простых методов, который используется для облегчения смешивания топлива с воздухом и дальнейшего сгорания, является поперечный впрыск в воздуховод. При взаимодействии топливной струи со сверхзвуковым поперечным потоком возникает ударная волна. В зоне отрыва происходит смешивание топлива с воздухом, воспламенение и сгорание. Область, образуемая за скачком уплотнения способствует перемешиванию. Минусом является то, что при таком методе происходят большие потери давления на торможение из-за сильной ударной волны, создаваемой поперечной струей [1-5].

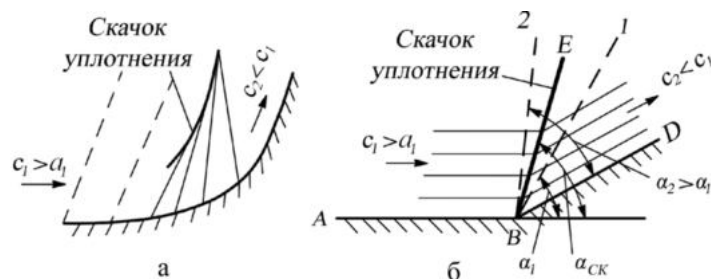


Рисунок 1 - Схема обтекания сверхзвуковым потоком различной геометрии

Рассмотрим картину течения при вдуве воздуха из каверны, имеющей скругление с правой стороны (Рисунок 2). Проанализируем как влияет геометрия обтекаемого тела на смешивание в камере (Рисунок 1).

Уравнения Навье-Стокса могут широко использоваться для изучения многофазных потоков и моделирования горения.

Ниже представлена система уравнений (1), состоящая из осредненных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого совершенного газа (знаки осреднения опущены). Она включает в себя уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Так же рассматривается уравнение состояния:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0; \\ \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_m + \tau_t); \\ \rho = \frac{p}{RT}. \end{cases} \quad (1)$$

Величины молекулярных составляющих тензора напряжений и вектора плотности теплового потока в системе уравнений (1) определяются с помощью реологического закона Ньютона и закона Фурье:

$$\begin{aligned} \tau_m &= 2\mu(T) \left(S - \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{u} \right), \\ \vec{q}_m &= -\lambda(T) \nabla T, \end{aligned} \quad (2)$$

Величины турбулентных составляющих тензора напряжений и вектора плотности теплового потока в системе уравнений (1) определяются с помощью гипотезы Буссинеска и закона Фурье:

$$\begin{aligned} \tau_t &= 2\mu_t \left(S - \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{u} \right) + \frac{2}{3} kI, \\ \vec{q}_t &= -\lambda_t \nabla T, \end{aligned} \quad (3)$$

Турбулентная теплопроводность может быть выражена через турбулентную вязкость:

$$\lambda_t = \frac{C_p \mu_t}{Pr_t}, \quad (4)$$

где $Pr_t = 0,9$ является турбулентным аналогом числа Прандтля.

В начальный момент времени в действующую камеру, состоящую из прямоугольного канала длиной 72 мм, начинается подача струи из нижней стенки каверны, с со скоростью 10 м/с. Глубина каверны, имеющей закругление с правой стороны, равна 3 мм.

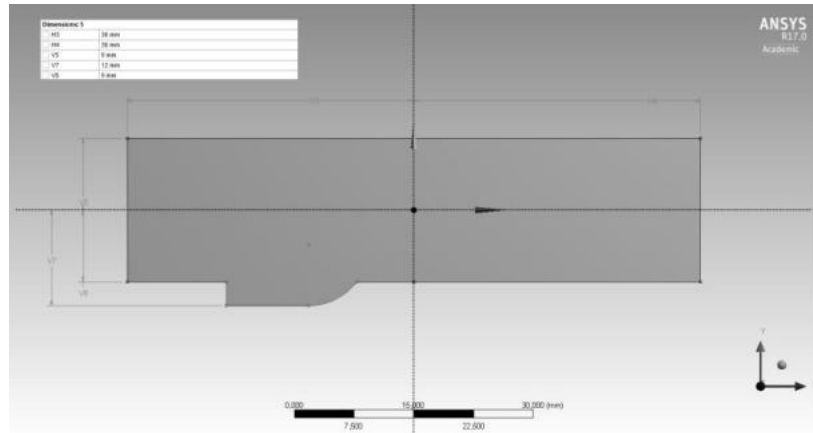


Рисунок 2 - Геометрия

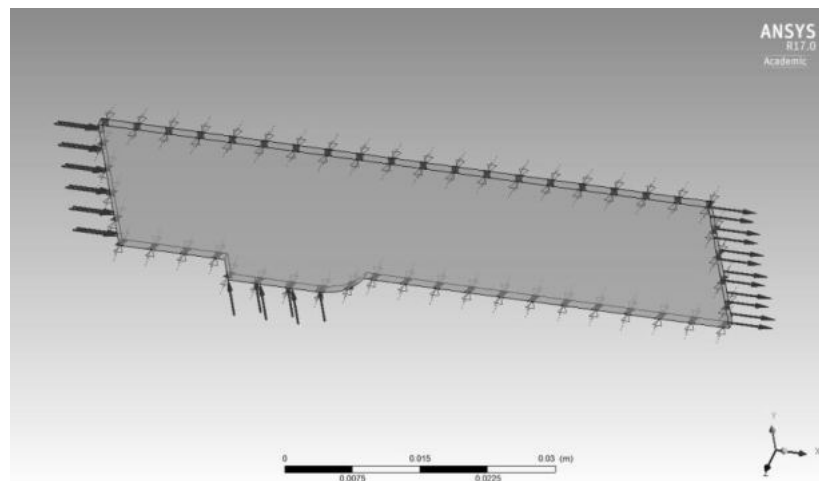


Рисунок 3 - Плоская модель

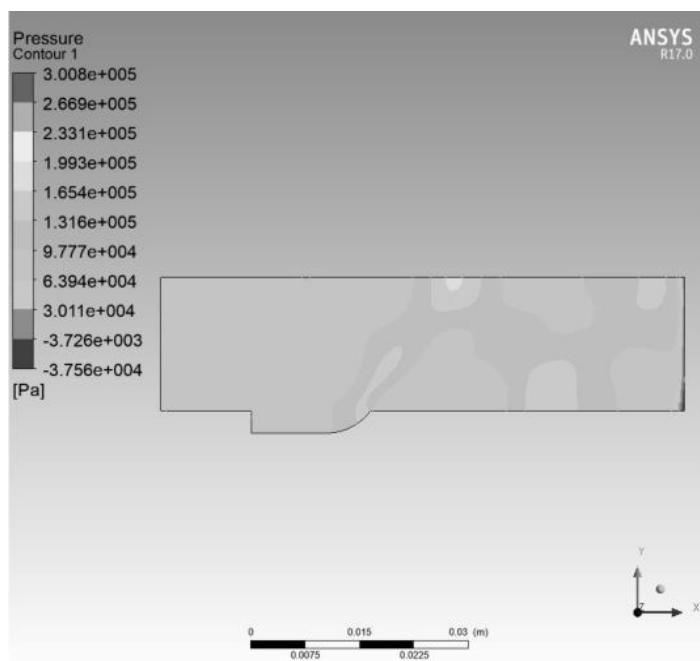


Рисунок 4 - Поле давления

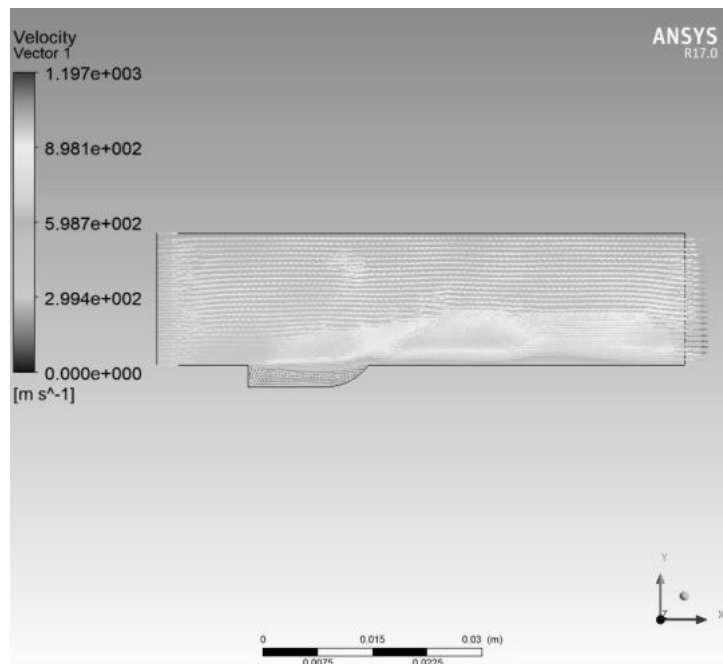


Рисунок 5 - Поле скорости

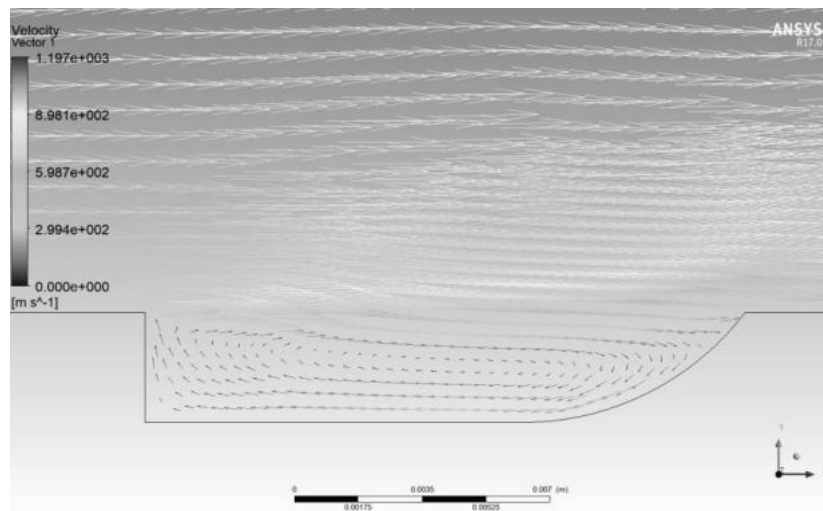


Рисунок 6 - Поле скорости в камере

Было сделано предположение о новом методе поперечного впрыска топлива, который облегчит смешивание топлива с воздухом в камере.

Уже на начальном этапе при малой скорости впрыска видны результаты выдвинутых предположений, течение вниз по потоку начало колебаться. В будущей перспективе будут подбираться и рассматриваться условия, которые покажут наглядную картину течения более приближенную к возможности дальнейшего применения данного метода в реальной жизни.

Библиографический список

1. Everett, D.E.; Woodmansee, M.A.; Dutton, J.C.; Morris, M.J. Wall Pressure Measurements for a Sonic Jet Injected Transversely into a Supersonic Crossflow. *J. Propuls. Power* 1998, 14, 861–868.
2. VanLerberghe, W.M.; Santiago, J.G.; Dutton, J.C.; Lucht, R.P. Mixing of a Sonic Transverse Jet Injected into a Supersonic Flow. *AIAA J.* 2000, 38, 470–479.
3. Ben-Yakar, A.; Hanson, R.K. Experimental Investigation of Flame-Holding Capability of Hydrogen Transverse Jet in Supersonic Cross-Flow. In *Twenty-Seventh International Symposium on Combustion*; The Combustion Institute: Pittsburgh, PA, USA, 1998; pp. 2173–2180.
4. Ben-Yakar, A.; Hanson, R.K. Cavity Flame-Holders for Ignition and Flame Stabilization in Scramjets: An Overview. *J. Propuls. Power* 2001, 17, 869–877.
5. Gruber, M.R.; Nejad, A.S.; Goss, L.P. Surface Pressure Measurements in Supersonic Transverse Injection Flowfields. In *Proceedings of the 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Seattle, WA, USA, 6–9 July 1997.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНА

А.С. Александров, М.А. Кальнина, А.Д. Лазуто, Н.Д. Мишин

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

Технологический прогресс не стоит на месте: с каждым годом мы находим новые и более совершенные технологические процессы. Такой метод обработки металлов, как электроэрозия стал известен относительно недавно в исторической перспективе, ему менее 100 лет, а потому имеет наибольшие перспективы развития в сравнении с традиционными видами обработки металлов: такими как точение или фрезерование.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) - обработка, принцип которой заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности электропроводящей заготовки под действием электрических разрядов, возникающих между заготовкой и электродом-инструментом. Данный вид обработки металлов основан на способности электродов к эрозии при воздействии на них импульсного электричества. Во время проведения электроэрозионной обработки между электродами проходит разряд, который может появиться только при определенной среде. Для этого пространство между электродами заполняют диэлектрической жидкостью, например, керосином, минеральным маслом или дистиллированной водой. Поскольку электроды имеют разные потенциалы, то эта разница образует ионизированное пространство и обеспечивает проводимость для электроэнергии. При таких физических процессах поверхность обрабатываемой заготовки нагревается до 12 тысяч градусов по Цельсию и металл мгновенно плавится, образуя лунку. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока из поля действия электродов не исчезнет весь металл. Если же лунка должна быть шире, то в процессе непрерывной подачи электричества электроды нужно сдвигать до необходимого расстояния. В современном производстве за мерой сближения электродов следит специальная программа.

Различают два вида электроэрозионной обработки: электродом и проволокой, в данном случае использовался второй вариант обработки. Его схема представлена ниже (рис. 1) [1].

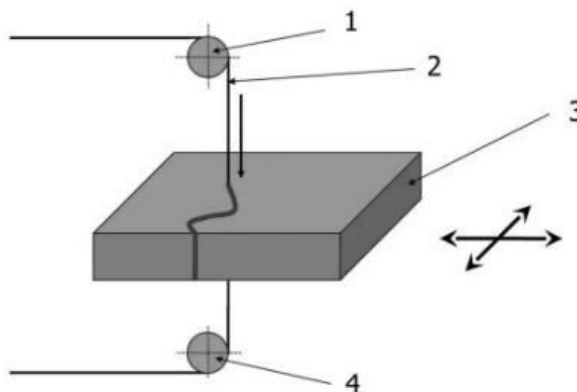


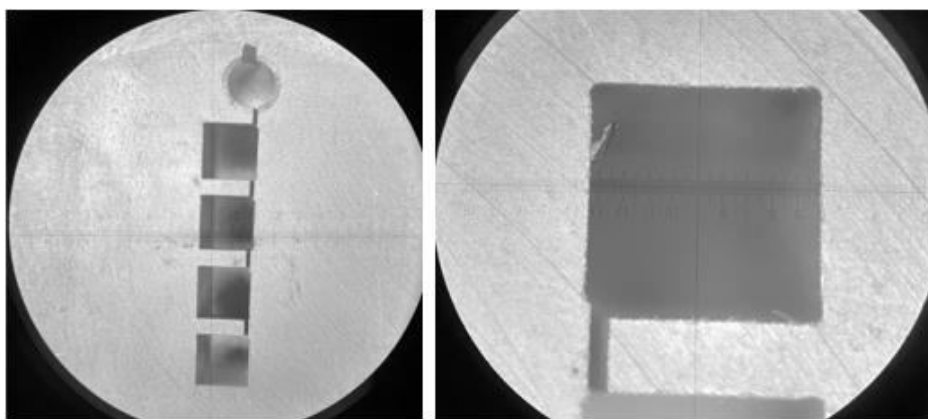
Рис.1 Схема электроэрозионной обработки проволокой

1 - подающая катушка, 2 - проволока, 3 - деталь, 4 - принимающая катушка

Электроэрозионная обработка используется в основном в двух случаях: если материалы являются труднообрабатываемыми или необрабатываемыми классическими методами, как например, вольфрамы, титанокарбидные сплавы, магнитные сплавы, алмаз, закаленные стали, либо же в случаях с профилями, недостижимыми или труднодостижимыми на традиционном оборудовании: пазы, узкие щели, полости и глухие отверстия сложной формы.

В данном случае обрабатываемый материал - титан марки ВТ-1. Данный материал благодаря таким свойствам как легкость, прочность, стабильный перенос агрессивных сред и отсутствие магнетизма, является одним из самых востребованных в российском сегменте производства металлообработки. Из него изготавливают широкий сортамент изделий: трубы, листы, прутки, квадрат и т.д. В основном ВТ-1 применяют в ракетном и оборонно-промышленном комплексах.

При обработке титанов электроэрозионным способом могут образовываться, так называемые “усы” (рис. 2) - оксидные образования, получившиеся из металла, испаренного, расплавленного материала, выброшенного из лунки электрода. Такие “усы” являются токопроводящим материалом, вследствие чего сокращается фактическая величина межэлектродного промежутка, что в свою очередь приводит к повышению доли рабочих импульсов при тех же режимах обработки, и как следствие, происходит повышение интенсивности процесса эрозии с одновременным повышением температуры электродов [6]. Так же могут образовываться прижоги в следствии обрыва проволоки (рис.4).

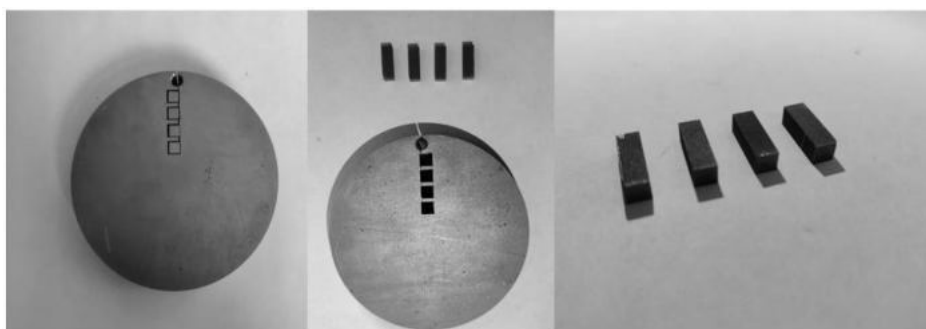


а)

б)

Рис.2 Места оксидных образований
а) Двукратное увеличение (x2); б) Семикратное увеличение (x7)

В данном случае производился подбор режимов электроэрозионной обработки материала ВТ-1 с точки зрения обеспечения требуемых параметров шероховатости. В качестве эксперимента были вырезаны четыре образца (рис.3) при различных режимах обработки (режимы обработки – таблица 1, варьируемые параметры – таблица 2).



а)

б)

в)

Рис.3 Плита и образцы
а) Образцы и плита; б) Плита без образцов, в) Исследуемые образцы

Полный перечень параметров режимов резания представлен в таблице 1. Наибольшее влияние на качество поверхности и параметры шероховатости оказывают характеристики “ВО ВРЕМЯ (ON)” и “ВНЕ ВРЕМЕНИ (OFF)”.

Таблица 1 Режимы обработки

ПРОХОД № (NUM)	1	КОНТ. МОЩН. В (WP1B)	8
РЕЖИМ РЕЗАНИЯ (PM)	20	ОТК. КОНТ. МОЩН. А (WP2A)	4
ЗАГР. ОТСУТ. (VS)	3	ОТК. КОНТ. МОЩН. В (WP2B)	10
КОНТР. ТОКА (CC)	211	НАТЯЖЕН. (Т)	1300
ВЫРЕЗКА (VM)	34	ПОДАЧА ПРОВ. (WF)	12
ВО ВРЕМЯ (ON)	2	ПОТОК ВОДЫ (FR)	16
ВНЕ ВРЕМЕНИ (OFF)	42	КОНТР. ВОДЫ (FC)	0
ПЕРЕМ. /ПОСТ. (AC)	1	СКОР. ВЫРЕЗКИ (SPD)	10.04
СЕРВОРЕЖИМ (SVM)	2	SKIM PLS SNT (SPC)	-
СЕРВОНАПР. (SV)	7	Corner cnt. (AIC)	20101
СЕРВОУСИЛ. (SVG)	58	РЕГУЛ. ПРЯМОЛ. (STOFST)	0.004
КОНТ. МОЩН. А (WP1A)	18	СДВИГ (OFST)	0.14

Из всех вышеперечисленных режимов обработки изменению подвергались только параметры “ВО ВРЕМЯ (ON)” и “ВНЕ ВРЕМ. (OFF)”, изменения представлены в таблице 2.

Таблица 2 Варьируемые параметры

Ток	№ образца			
	1	2	3	4
ВО ВРЕМЯ (ON), мс	2	3	6	7
ВНЕ ВРЕМ. (OFF), мс	42	35	47	52

Данные характеристики являются основными при назначении режимов обработки в случае работы с электроэрозионным станком. Характеристика ON означает время, в течении которого ток подается на электрод-инструмент, OFF - время отсутствия подачи тока.

В данной работе использовался станок FANUC ROBOCUT α -C400iB. Этот современный электроэрозионный станок с большим средним временем наработки между отказами, с низкими затратами на техническое обслуживание и довольно долгим временем безотказной работы разработаны, чтобы экономить время и снизить себестоимость производства, а также поддерживать высокую точность и эффективность резки. В качестве электрода-инструмента была выбрана латунная проволока $\varnothing 0.25\text{мм}$ ($\sigma=980\text{Н/мм}^2$).

Производился визуальный контроль образцов (рис.4) с помощью микроскопа МБС-10.

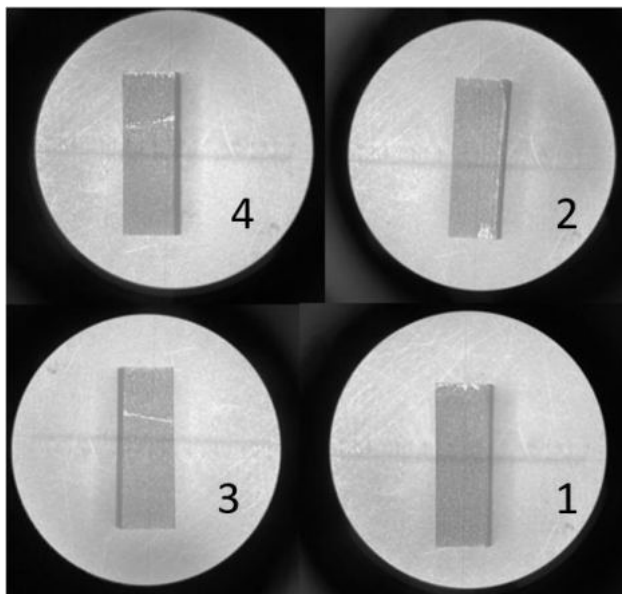


Рис.4 Образцы (увеличение $\times 7$)

Измерения шероховатости производились профилометром TR-200. На профилометре были выставлены следующие настройки: базовая длина 0,8мм, длина оценки: 4мм, стандарт DIN, диапазон ± 20 микрон и фильтр Гаусса DIN4777. Первоначально производилась калибровка профилометра по эталону с 1,67Ra. Измерения производились следующим образом: на каждой грани образца было произведено по три измерения. Полученные данные занесены в таблицу 3.

Таблица 3
Значения шероховатости

Сторона образца/ Параметр шероховатости	Тип значения	Ra, мкм	Rq, мкм	Rz, мкм	Ry, мкм	Rmax, мкм	Rs, мм	Rsm, мм
Образец 1 / сторона 1	1	3,476	4,340	21,62	27,93	27,93	0,055	0,0864
	2	3,190	3,972	19,25	21,70	21,70	0,047	
	3	3,136	3,848	17,94	21,53	21,53	7	
	Ср. арифм.	3,267	4,053	19,60	23,72	23,72	0,042	
				3	0	0	6	
Образец 1 / сторона 2	1	3,625	4,560	22,97	26,97	26,97	0,056	0,0820
	2	3,364	4,210	20,85	25,04	25,04	0,050	
	3	3,314	4,157	20,14	24,73	24,73	7	
	Ср. арифм.	3,434	4,309	21,32	25,58	25,58	0,054	
				0	0	0	2	
Образец 1 / сторона 3	1	3,142	3,940	19,60	25,53	25,53	0,051	0,0800
	2	3,115	3,902	18,55	20,34	20,34	6	
	3	3,081	3,887	17,85	22,50	22,50	0,047	
	Ср. арифм.	3,113	3,910	18,66	22,79	22,79	0	
				7	0	0	4	
Образец 1 / сторона 4	1	3,896	4,764	21,79	26,95	26,95	0,051	0,0800
	2	3,336	4,133	21,37	28,10	28,10	0,0592	
	3	3,551	4,513	23,98	27,87	27,87	0,0571	
	Ср. арифм.	3,594	4,470	22,380	27,640	27,640	0,0571	
							0	

Таблица 3 продолжение

Сторона образца/ Параметр шероховатости	Тип значения	Ra, мкм	Rq, мкм	Rz, мкм	Ry, мкм	Rmax, мкм	Rs, мм	Rsm, мм
Образец 2 / сторона 1	1	3,357	4,276	21,700	27,380	27,380	0,0524	0,0761
	2	3,215	4,067	21,200	26,380	26,380	0,0533	0,0800
	3	3,763	4,610	21,460	28,480	28,480	0,0507	0,0888
	Ср. арифм.	3,500	4,346	21,617	27,413	27,413	0,0521	0,0816
Образец 2 / сторона 2	1	3,763	4,610	21,460	28,48	28,48	0,0507	0,0888
	2	3,215	4,067	21,200	26,380	26,380	0,0533	0,0800
	3	3,357	4,276	21,700	27,380	27,38	0,0761	0,0761
	Ср. арифм.	3,476	4,340	20,730	25,840	25,840	0,0600	0,0816
Образец 2 / сторона 3	1	3,139	4,112	21,670	26,570	26,570	0,0492	0,0653
	2	3,587	4,533	22,380	24,930	24,930	0,0507	0,0800
	3	3,153	4,000	19,520	24,140	24,140	0,0477	0,0666
	Ср. арифм.	3,293	4,215	21,190	25,213	25,213	0,0492	0,0706
Образец 2 / сторона 4	1	3,763	4,610	21,460	28,480	28,480	0,0507	0,0888
	2	3,215	4,067	21,200	26,380	26,380	0,0533	0,0800
	3	3,357	4,276	21,700	27,380	27,380	0,0524	0,0761
	Ср. арифм.	3,445	4,318	21,453	27,413	27,413	0,0521	0,0816
Образец 3 / сторона 1	1	3,827	4,684	22,65	25,44	25,44	0,0484	0,0842
	2	3,825	4,684	21,34	24,75	24,75	0,0524	0,0864
	3	3,293	4,240	22,54	29,21	29,21	0,0592	0,0761
	Ср. арифм.	3,648	4,536	22,17	26,46	26,467	0,0533	0,0822
Образец 3 / сторона 2	1	3,449	4,499	23,46	28,62	28,62	0,0615	0,0864
	2	3,178	3,946	19,18	22,68	22,68	0,0492	0,0666
	3	3,639	4,511	20,51	22,84	22,84	0,0492	0,0711
	Ср. арифм.	3,422	4,319	21,050	24,71	24,71	0,0533	0,0747
Образец 3 / сторона 3	1	3,334	4,227	21,32	25,17	25,17	0,0542	0,0820
	2	3,091	3,929	19,05	21,27	21,27	0,0448	0,0666
	3	3,287	4,050	19,72	24,87	24,87	0,0581	0,0820
	Ср. арифм.	3,237	4,069	20,03	23,77	23,77	0,0524	0,0769
Образец 3 / сторона 4	1	3,510	4,359	20,04	22,55	22,55	0,0492	0,0761
	2	3,708	4,468	21,03	25,90	25,90	0,0542	0,0800
	3	3,492	4,226	18,96	21,30	21,30	0,0450	0,0744
	Ср. арифм.	3,570	4,351	20,01	23,25	23,25	0,0495	0,0768
Образец 4 / сторона 1	1	3,235	4,140	24,64	23,79	23,79	0,0477	0,0727
	2	3,310	4,129	20,48	23,15	23,15	0,0470	0,0744
	3	3,367	4,350	22,22	28,68	28,68	0,0653	0,0969
	Ср. арифм.	3,304	4,206	21,44	25,20	25,20	0,0533	0,0813
Образец 4 / сторона 2	1	3,277	4,153	21,15	28,62	28,62	0,0524	0,0864
	2	3,938	4,947	24,34	26,39	26,39	0,0500	0,0914
	3	3,494	4,252	19,41	23,28	23,28	0,0492	0,0820
	Ср. арифм.	3,570	4,451	21,63	26,09	26,09	0,0505	0,0866
Образец 4 / сторона 3	1	3,969	4,956	23,41	30,95	30,95	0,0571	0,0864
	2	3,348	4,158	19,61	25,05	25,05	0,0507	0,0800
	3	3,562	4,425	21,25	25,12	25,12	0,0484	0,0780
	Ср. арифм.	3,626	4,513	21,423	27,040	27,040	0,0521	0,0815
Образец 4 / сторона 4	1	3,711	4,520	20,75	24,64	24,64	0,0516	0,0888
	2	3,128	3,825	17,65	19,53	19,53	0,0421	0,0653
	3	3,496	4,271	20,29	23,67	23,67	0,0492	0,0711
	Ср. арифм.	3,445	4,205	19,563	22,613	22,613	0,0476	0,0751

Вышеуказанные данные были проанализированы и из них получена таблица 4, где представлена средняя шероховатость каждого образца.

Таблица 4
Средняя шероховатость каждого образца

	Ra, мкм	Rq, мкм	Rz, мкм	Ry, мкм	Rmax, мкм	Rs, мм	Rsm, мм
Образец 1	3,352	4,186	20,493	24,933	24,933	0,052	0,149
Образец 2	3,429	4,305	21,248	26,361	26,361	0,055	0,079
Образец 3	3,469	4,319	20,815	24,548	24,550	0,052	0,078
Образец 4	3,486	4,344	21,017	25,239	25,239	0,051	0,081

С точки зрения параметров Ra, Rq и Rz первый образец обладает наименьшей шероховатостью. По параметру Ry, Rmax и Rsm наименьшей шероховатостью обладает третий образец. По параметру Rs наименьшей шероховатостью обладает четвертый образец. Так как параметр Ra является предпочтительным по ГОСТ 2789-73. Преимуществом данного параметра заключается в том, что он обеспечен надежными средствами измерений.

Библиографический список

1. Станки Эксперт [электронный ресурс] // URL: <https://stankiexpert.ru/stanki/stanki-dlya-rezki/ehlektroehroziionnaya-obrabotka.html> (Дата обращения: 5.04.2022).
2. Александров А.С., Васильков Д.В., Голикова В.В., Кочеткова Т.П. Шероховатость поверхности: учебное пособие - СПб, : НИЦ АРТ, 2021.
3. Федоров А. А., Полонянкин Д.А., Блесман А. И., Н. В. Бобков, А.В. Линовский, Ю.О. Бредгауэр, Ю.Е. Жданова Исследование влияния режимов резания проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на трещинообразование и морфологию поверхностного слоя титанового сплава ВТЗ-1 // Омский научный вестник №2 (170) 2022.
4. Федоров А. А., Блесман А. И., Полонянкин Д. А. [и др.]. Влияние режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на морфологию и шероховатость поверхности титанового сплава ВТЗ-1 // Россия молодая: передовые технологии — в промышленность! 2017 №. 1 С. 62–66.
5. Жданова Ю. Е., Федоров А. А., Блесман А. И. [и др.]. Исследование поверхности образцов титанового сплава ВТЗ-1, изготовленных с помощью электроэрозионной обработки // Россия молодая: передовые технологии — в промышленность! 2019 №. 1 С. 5–10. DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-5-10.
6. Сариллов М.Ю., Сарилова О.А., Будениц С.В. Повышение эффективности электроэрозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов на основе исследований процессов в межэлектродном промежутке // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 6. – С. 74-79.

УДК 629.112

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО И ПОДВОДНОГО КРЫЛА

Д. А. Иванов, М. С. Григорьев, А. К. Костиков

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

В статье рассматривается исследование возможности совмещения подводного и аэродинамического крыла в целях уменьшения расхода топлива, увеличения грузоподъемности и экономического потенциала судов на подводных крыльях и летательных аппаратов.

Ключевые слова: аэродинамическое крыло, подводное крыло, экранный эффект, суда, экранопланы

На сегодняшний день проблема передвижения людей в восточной стороне России поднимается во многих транспортных ведомствах. Ещё одной проблемой, является большая трата топлива во время взлёта на гидропланах и экранопланах. Данная работа рассмотрит вопрос повышения экономического потенциала судов на подводных крыльях и гидропланов с экранопланами, путём создания системы из подводного и аэродинамического крыла.

Цель работы: предложить способы совмещения аэродинамического и подводных крыльев и выведение формул их зависимости.

Задачи:

- Выведение коэффициента прироста подъёмной силы у профилей разного типа, получение графиков зависимости подъёмной силы от высоты профиля относительно поверхности
- Выведение формул совмещающих силы, действующие на аэродинамические и гидродинамические поверхности

- Рассмотрение компоновок судов на подводных крыльях а также аэродинамических компоновок

Во времена СССР, проблему передвижения людей в восточной стороне страны решали суда на подводных крыльях (СПК), которые позволяли перемещаться людям с высокой скоростью из одной точки в другую по рекам. Но у СПК есть существенный минус, из-за которого смена старых образцов на новые затруднена. Это экономичность и требовательность к обслуживанию. Экранопланы схожи с судами на подводных крыльях. Учитывая и так невысокую экономичность данного ЛА существуют возможности её увеличения.

Данная работа рассмотрит вопрос повышения экономического потенциала судов на подводных крыльях и экранопланов, путём добавления в конструкцию СПК аэродинамических поверхностей, создающих экранный эффект, а в летательных аппаратах (ЛА) – шасси в виде подводных крыльев.

Внедрение в СПК экранного эффекта позволит увеличить грузоподъемность, что может существенно повлиять на стоимость перевозок, что только положительно скажется на потенциале их использования для гражданских нужд. Основная идея заключается в том, чтобы увеличить грузоподъемность СПК, применяя экранный эффект, при этом не меняя никаких других характеристик СПК.

Для начала были выбраны исследуемые профили. В качестве первого образца был взят высоконесущий профиль 35-А, который используется в разработке индивидуального водного средства передвижения (ИВСП) «Скат».

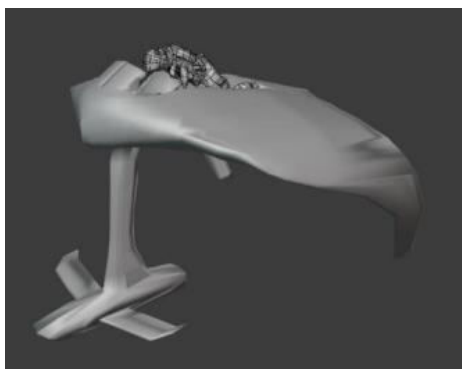


Рисунок 1 ИВСП "Скат"

Профиль 35А

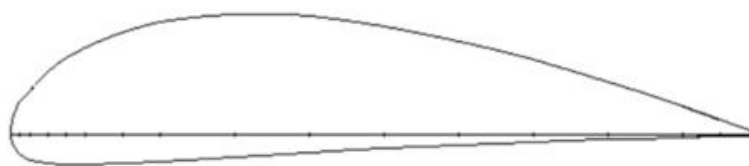


Рисунок 2 Профиль аэродинамического крыла ИВСП "Скат"

Выбранный профиль был исследован на высотах 0,1, 0,5, 1 и 1,5 метра. В ходе изучения литературы было выявлено соотношение высоты полета и длины средней аэродинамической хорды (САХ), которое обеспечивает наиболее эффективный полет. Высота должна быть меньше либо равна половине САХ. После проведения ряда экспериментов на представленных высотах, был получен график зависимости подъемной силы от высоты полета.

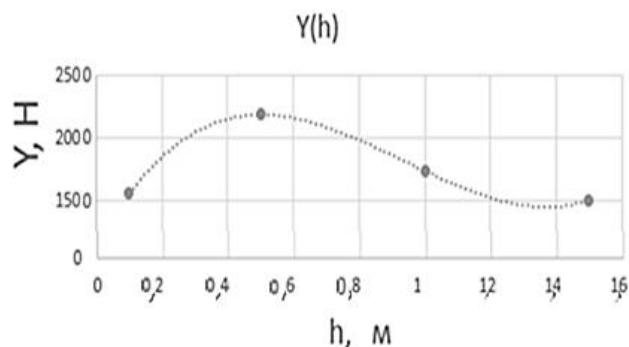


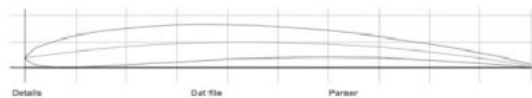
Рисунок 3 Зависимость подъёмной силы от высоты над водой для профиля 35-А

По итогу исследований данного профиля наиболее эффективной высотой оказалась высота 0,5 м, на данной высоте прирост подъемной силы составляет 45%.

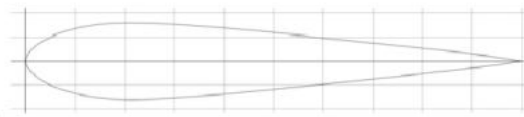
Далее было принято решение о исследовании других типов профилей, для получения данных о приросте подъемной силы на них и как следствие вывода формулы отражающей зависимость подводного и аэродинамического крыла. Следующими профилями были выпукло-вогнутый А18, симметричный EPPLER E473, S-образный FAUVEL 14%. Данные профили исследовались на высотах $h_1 = 0$, $h_2 = \frac{1}{4}b$, $h_3 = \frac{1}{2}b$, $h_4 = \frac{3}{4}b$, $h_5 = b$, где b – длина САХ. Все исследования проводились на нулевом угле атаки.

После проведенных расчетов для указанных выше профилей также были получены графики соотношения подъемной силы к высоте полета над поверхностью экрана.

A18 (original) (a18-il)
A18 (original) - Archer A18 F1C free flight airfoil(original)



EPPLER 473 AIRFOIL (e473-il)
EPPLER 473 AIRFOIL - Eppler E473 aerobatic aircraft airfoil



FAUVEL 14% AIRFOIL (fauvel-il)
FAUVEL 14% AIRFOIL - Fauvel 14% flying wing airfoil



Рисунок 4 Выбранные профили

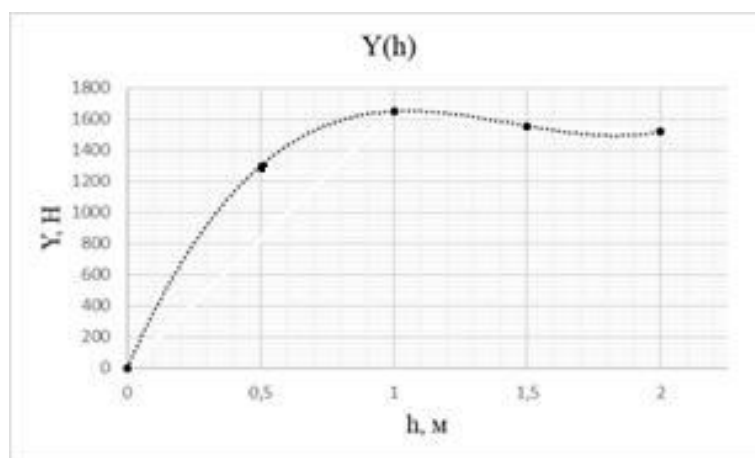


Рисунок 5 График зависимости подъемной силы от высоты полета для профиля A18

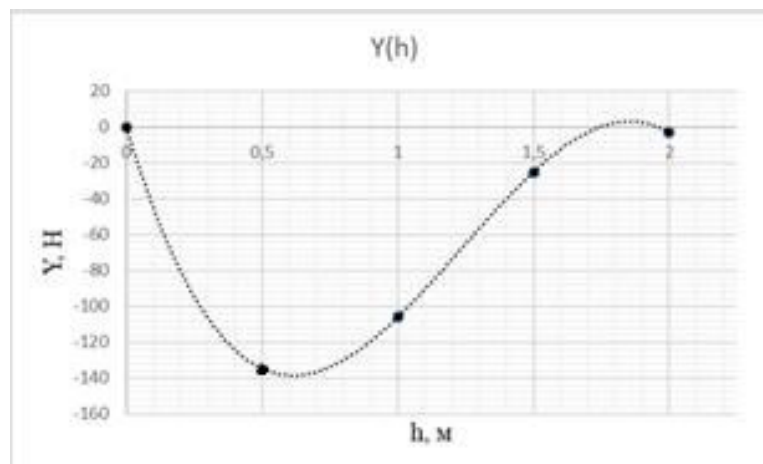


Рисунок 6 График зависимости подъемной силы от высоты полета для профиля EPPLER E473

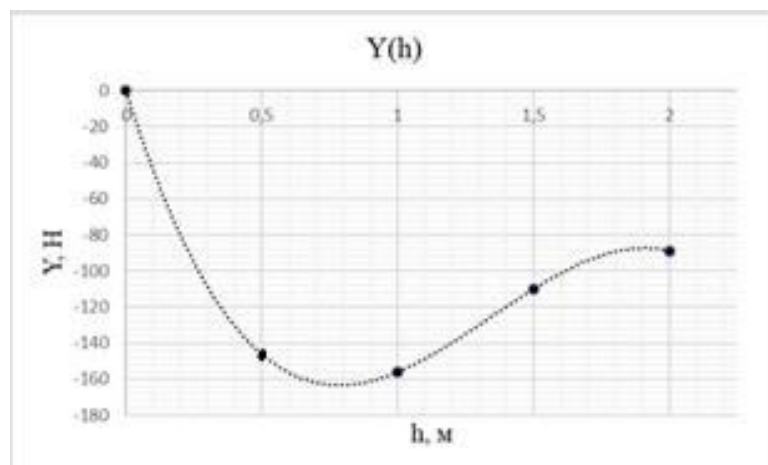


Рисунок 7 График зависимости подъемной силы от высоты полета для профиля Fauvel 14%

По полученным графикам можно определить максимальную подъемную силу. Также исходя из графиков видно, что симметричный профиль EPPLER E473 и S-образный профиль на данном угле атаки неэффективны.

Далее был исследован плоско-выгнутый профиль подводного крыла, который также используется в ИВСП «Скат». Данный профиль исследовался на высотах $h_1 = 1.08$ и $h_2 = 1.330$ м и углах атаки -5, 0 и 15 градусов.

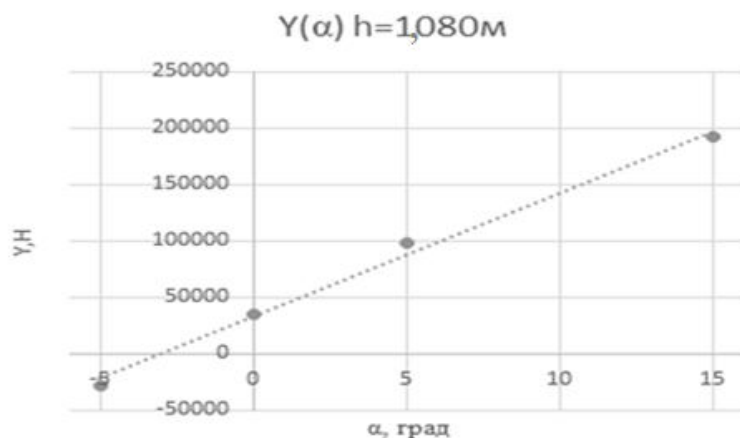


Рисунок 8 График зависимости подъемной силы подводного крыла от его угла атаки на глубине 1,08 м

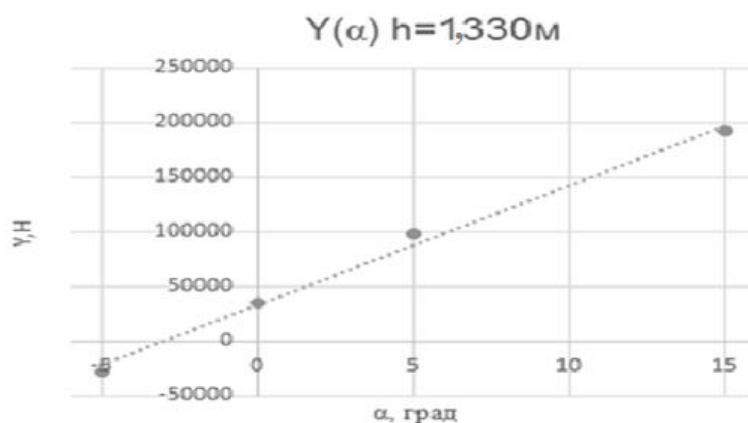


Рисунок 9 График зависимости подъемной силы подводного крыла от его угла атаки на глубине 1,33 м

Таким образом исходя из результатов экспериментов получаем, что коэффициент прироста подъемной силы k лежит в промежутке от 1 до 1.6. Общая формула подъемной силы аппарата будет состоять из аэродинамической и подводной подъемной силы и на данном этапе формула будет принимать следующий вид: $Y_{\text{общ}} = k \left(C_y S \frac{\rho V^2}{2} \right) + \sum_{i=1}^n \left(C_{y_i} S_i \frac{\rho(V+V_i)^2}{2} \right) \cos \varphi_i$, где C_y – коэффициент подъемной силы крыла, ρ – плотность воздуха, ρ_v – плотность воды, S – площадь аэродинамического крыла, S_i – площадь консоли подводного крыльцевого устройства (ПКУ), $\cos(\varphi_i)$ – косинус угла наклона консолей ПКУ относительно поперечной оси аппарата, V – скорость набегающего потока, V_i – скорость течения воды под влиянием экранного эффекта, k – коэффициент прироста аэродинамической подъемной силы под влиянием экранного эффекта. Формула лобового сопротивления принимает следующий вид: $X =$

$(C_x S \frac{\rho V^2}{2}) + R_x + C_{xвол}$, где R_x – гидродинамическая сила лобового сопротивления, $C_{xвол}$ – волновое сопротивление погруженной части аппарата, C_x – коэффициент аэродинамического лобового сопротивления.

Формула 1 Волновое сопротивление

$$C_{xвол} = \frac{C_y^2}{2Fr^2} e^{-\frac{2h_{cp}}{Fr^2}} \left(1 - \frac{2\pi}{Fr^2} e^{-\frac{2h_{cp}}{Fr^2}} \right), Fr = \frac{V}{\sqrt{gb_{cp}}}$$

Таким образом в ходе данной работы получен первый вид формулы совмещающей силы, действующие на аэродинамические и гидродинамические поверхности. Стоит отметить, что вывод данной формулы еще не завершен, так как она не учитывает некоторые важные моменты, такие как изменение углов. В дальнейшем планируется выявить закономерность изменения коэффициента прироста подъемной силы для его математической оценки и расчетов не на основе моделирований и экспериментов, а также составление системы зависимости моментов, действующих на аэродинамическое и подводное крыло в целях описания стабильного движения данной системы.

Научный руководитель – С. А. Чириков.

Библиографический список

1. Что такое фойлборд [Электронный ресурс] // Вода-Берег - яхты, страны, путешествия, lifestyle: [сайт]. URL: <https://vodabereg.ru/lifestyle/chto-takoe-foilbord/> (дата обращения: 29.01.2021).
2. Серфинг с подводным крылом. SUP FOIL и foil surfing [Электронный ресурс] // - яхты, страны, путешествия, lifestyle: [сайт]. URL: <https://sup-shop.ru/blog/sup-foil-i-foil-surfing/> (дата обращения: 29.01.2021).
3. Белафин, Н. И. Экранопланы (по данным зарубежной печати). — 2-е изд. — Л. : Судостроение, 1977. — 232 с. 2. Богданов, А. И. Разработка первых международных требований к безопасности экранопланов // Морской вестник : журнал. — 2005. — № 1. — С. 69—82.
4. Дементьев, В. А. Методологические аспекты создания экранопланов [Текст] : учеб. пособие / В. А. Дементьев, В. В. Крапивин. - Н. Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т им. П. Е. Алексеева, 2012. - 78 с. : ил. - Библиогр.: с. 71-78.

УДК 620.172.242

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ ОБРАЗЦОВ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ-159 (ХН58МБЮ)

Р. Р. Кяримов, А. И. Хаймович

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

Аддитивное производство (АП) обеспечило эффективные подходы и разработало технические приемы в получении прочных конструкций со сложной геометрии, средством автоматизированного проектирования. Селективное лазерное сплавление (СЛС) является одной из наиболее перспективных технологий АП. На сегодняшний день СЛС стало широко использоваться для авиационной промышленности. Это направление признано приоритетным в области развития материалов и технологий во всем мире [1-2]. Развитие отечественных аддитивных технологий в данный момент напрямую связано с разработкой собственных материалов, имеющих более высокие механические или эксплуатационные характеристики по сравнению с предлагаемой зарубежной номенклатурой материалов. В производстве узлов двигателя все больше находят применение жаропрочные сплавы на основе никеля. Конструкция современных газотурбинных двигателей состоит на 40 – 50 % из подобных сплавов. В современном производстве одной из тенденций развития, как эффективного метода снижения себестоимости, является создание неразъемных соединений путем сплавления при изготовлении деталей сборочных единиц.

Стремление увеличить показатели жаропрочности никелевых сплавов приводит к ухудшению их свариваемости, то есть уменьшается сопротивляемость металла образованию трещин при сварке и последующей термической обработке. В связи с этим к данным сплавам предъявляют особые требования по созданию качественных неразъемных соединений. Согласно определению (ГОСТ 29273-92) свариваемость должна обеспечивать металлическую целостность изделия при соответствующим технологическим процессом так, чтобы свариваемые детали отвечали техническим требованиям, как в отношении их собственных качеств, так и в отношении их влияния на конструкцию, которую они образуют. Учитывая сложность ГТД, к сварным соединениям предъявляется комплекс повышенных требований по обеспечению параметров структуры и гарантированного запаса физико-механических свойств.

При изготовлении ГТД, конкретных конструктивных элементов, например камер сгорания методом СЛС, в силу ограниченности габаритных размеров установок аддитивного производства встает вопрос о производстве таких изделия из нескольких компонентов, далее эти компоненты необходимо соединить между собой наиболее эффективным способом, избегая при этом зазоров, трещин, непроплавов, обеспечивая общую целостность. В связи с этим актуальными становятся задачи по применению инновационных технологических методов соединения между собой деталей, изготовленных методом СЛС из жаропрочных сплавов, применяемых при производстве деталей горячей части ГТД, обеспечивающей повышенные требования к параметрам структуры и гарантированному запасу физико-механических свойств. Целью исследования является выявление наиболее эффективного типа сварного соединения импульсной лазерной сваркой элементов конструкции или деталей изготовленных методом СЛС из жаропрочных сплавов.

Одним из инновационных современных способов соединения (скрепление) конструктивных элементов, а также повышения сопротивляемости к трещинообразованию является импульсная лазерная сварка за счет высокой концентрации энергии и меньшего тепловложения. Особенностью лазерной сварки является вариативность режимов в широком диапазоне, что обеспечивает не только возможность сварки различных материалов толщиной от десятых долей до десятков миллиметров, но и осуществление принципиально различных механизмов проплавления.

Одним из наиболее известных и часто применяемых материалов в технологии СЛС, является жаропрочный сплав марки ВЖ-159 (ХН58МБЮ). Данный материал представляет большой интерес в связи с высоким комплексом механических свойств и лучшей технологичности и свариваемости, что предотвращает появление микротрещин в

процессе синтеза на установках СЛС, а также обеспечивает возможность значительного увеличения скорости построения деталей [3-7].

Для выращивания пластинчатых образцов технологией СЛС, и дальнейшего их сваривания лазерной сваркой, был проведен микроструктурный анализ на электронном микроскопе, с целью входного контроля качества металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ-159. Общий вид частиц порошка представлен на рисунке 1. Химический состав порошка представлен в таблице 1. По итогам контроля было выявлено, что средний диаметр частиц порошка ВЖ-159 варьирует в диапазоне 10...50 мкм, что благоприятным образом отразится на изготовлении образцов методом СЛС.

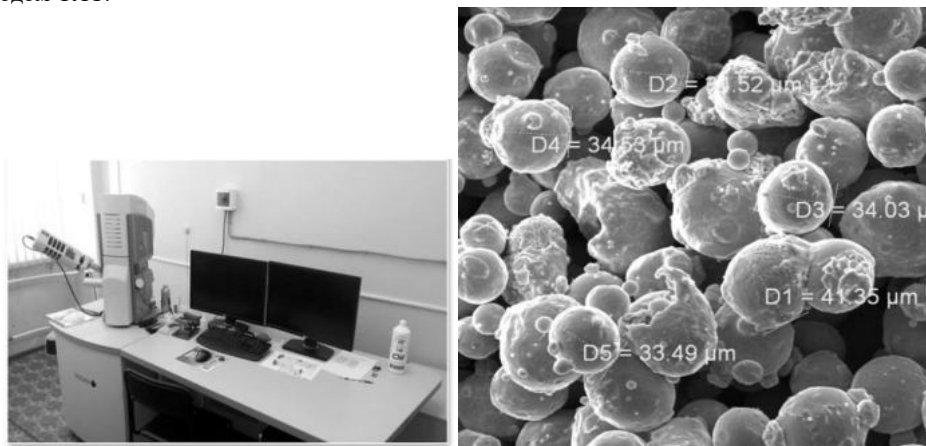


Рисунок 1 – Средний диаметр частиц металлического порошка ВЖ-159

Таблица 1 – Химический состав порошка ВЖ-159

Содержание элементов, %					
Al	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
1,51	27,95	0,63	60,43	2,53	6,95

Образцы для механических испытаний были изготовлены на установке селективного лазерного сплавления SLM 280 HL, состоявшие из 2-х частей (половинок) размерностью 3x30x180 мм., с целью их сварки, после изготовления, на лазерной установке тремя различными видами, а именно: встык, внахлест, внаклеп. Схемы видов сварки пластинчатых образцов представлены на рисунке 2. Для технологии изготовления изделий методом СЛС необходимо установить следующие параметры: шаг сканирования, скорость сканирования, мощность лазерного излучения, и толщину слоя металлического порошка, на котором будут сплавляться изделия. Параметрам процесса СЛС изготовления пластинчатых образцов соответствуют следующим значениям: мощность лазера – 250 Вт, скорость сканирования – 600 мм/с, шаг сканирования – 120 мкм, толщина слоя – 50 мкм.

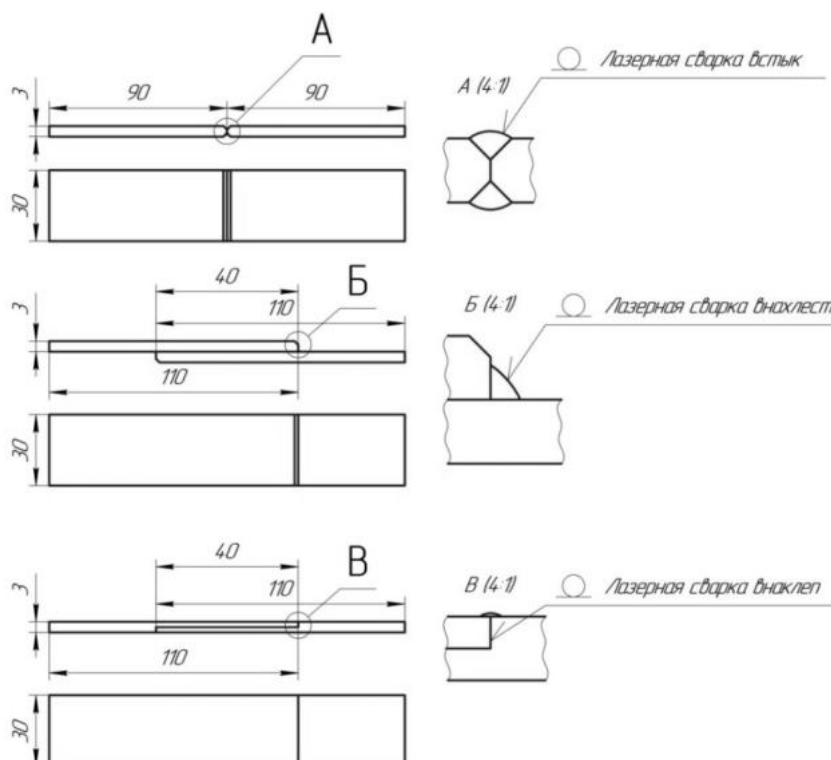


Рисунок 2 – Схема образцов для сварки встык, внахлест, внаклеп

Сварка образцов выполненная методом СЛС была осуществлена на лазерной установке HTS-300 Mobile (рисунок 3). Принцип работы установки: тонкий, сфокусированный луч лазера – источник потока высокой энергии, точно нагревающий металл до температуры плавления на стыке двух отдельных деталей. По мере охлаждения полученный расплав кристаллизуется с образованием прочного сварного соединения высокого качества. Точная фокусировка обеспечивает повышенную плотность лазерного излучения, что позволяет мгновенно достигать высоких температур без образования окислов. Работы выполняются в атмосферных условиях, не требуя вакуума или среды инертных газов. Также лазерная сварка требует предварительного удаления с поверхности изделий следов различных загрязнений, к примеру, масла и другой смазки, лакокрасочных покрытий, окиси. Это обязательное условие получения прочного и долговечного соединения. Для осуществления импульсной лазерной сварки необходимо установить следующие параметры: рабочее напряжение, длительность импульса, частота импульса. Сварка была осуществлена при следующих параметрах: рабочее напряжение – 295 В., длительность импульса – 7,5 мс, частота импульса – 7 Гц.

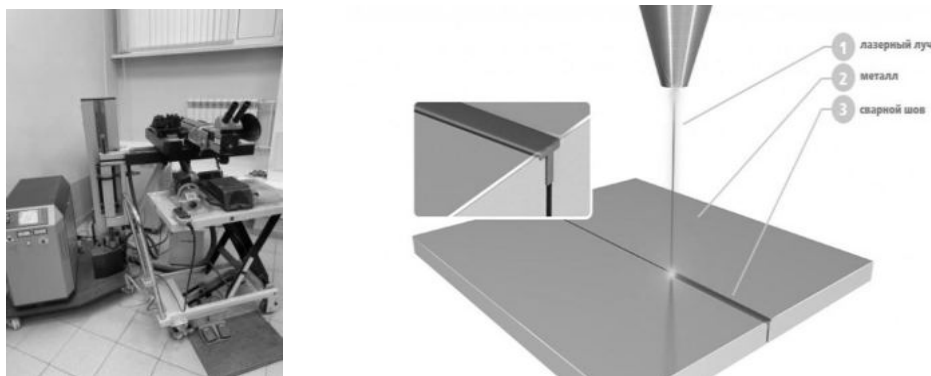


Рисунок 3 – Установка импульсной лазерной сварки

После сварки образцы были подвержены механическим испытаниям. Испытания проводились на универсальной электромеханической разрывной машине Tira test 28300. Нагрузка, примененная к образцам, была в диапазоне от 100 до 15000 кг. Было испытано на разрыв по 3 образца по каждому виду сварного соединения, встык, внахлест, внаклеп. Дополнительно испытанию подверглись образцы без сварки, также изготовленные методом СЛС. На рисунке 4 изображены изготовленные образцы методом СЛС, сваренные импульсной лазерной сваркой. Результаты испытаний сведены в таблицу 2.

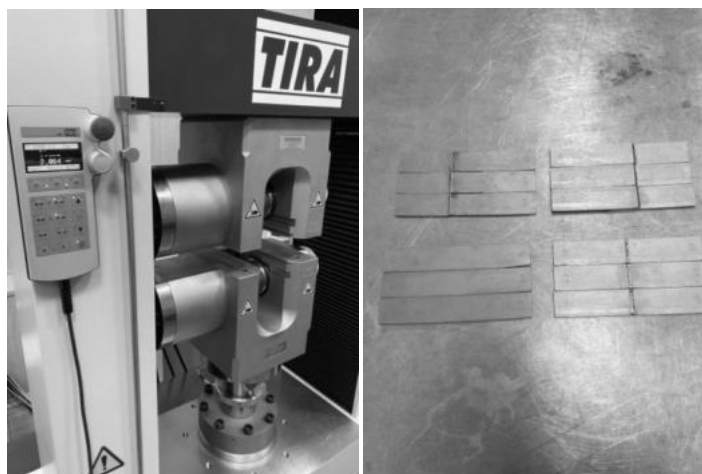


Рисунок 4 – Испытание пластинчатых образцов на разрыв, сваренные встык, внахлест, внаклеп

Таблица 2 – Результаты механических испытаний

Образцы сваренные встык				
№ образца	Максимальная нагрузка, N	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1	До 55000	590	418	0,52
2		578	447	0,47
3		564	407	0,47
Среднее значение	-	577	424	0,49
Стандартное отклонение	-	13	21	0,03
Коэффициент вариации	-	2	5	5,27
Образцы сваренные внахлест				
1	До 46000	480	402	0,38
2		476	391	0,41

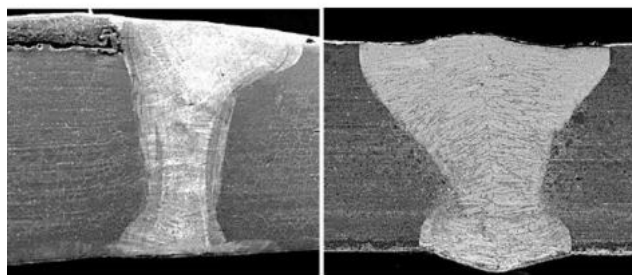
3		508	401	0,45
Среднее значение	-	488	398	0,41
Стандартное отклонение	-	18	6	0,04
Коэффициент вариации	-	4	2	8,65
Образцы сваренные внаклеп				
1	До 27000	297	270	1,42
2		271	258	1,57
3		273	264	1,80
Среднее значение	-	281	264	1,59
Стандартное отклонение	-	14	6	0,19
Коэффициент вариации	-	5	2	11,87
Образцы без сварки				
1	До 100000	1016	352	51,53
2		1033	498	60,01
3		1000	477	48,50
Среднее значение	-	1016	442	53,34
Стандартное отклонение	-	17	79	5,97
Коэффициент вариации	-	2	18	11,18

По результатам испытаний следует отметить, что наиболее эффективным видом сварного соединения образцов оказался способ встык, исходя из среднего значения предела прочности, однако существенно уступает пределу прочности образцам без сварки, так как следующие обладают цельной сплавленной структурой после селективного лазерного сплавления.

Еще одним важным технологическим приемом при импульсной лазерной сварке с глубоким проплавлением является применение присадочного материала. Данный прием позволяет регулировать прочность шва, обеспечивая требуемые свойства сварных соединений, уменьшить образование таких дефектов, как неравномерность проплавления, горячие и холодные трещины, поры в корне шва, а также уменьшить требования к точности при сборке деталей под сварку.

На рисунке 6 представлено изображение макроструктуры (в X50 кратном увеличении) продольного сечения сварного соединения образца сваренного встык. В типе сварного соединения встык лазерная сварка с высокой концентрацией сфокусированного лазерного излучения формирует на образцах (толщиной до 3 мм) форму сварного шва в виде гантели.

На рисунке 6 а, можно заметить дефект в виде трещины, свидетельствующий неоднородности сварного шва, который может привести к излому. Чтобы минимизировать вероятность возникновения подобных дефектов, как было сказано выше, имеет смысл использование дополнительного присадочного материала в виде проволоки. Из рисунка 6 б. можно заметить отсутствия дефектов, в данном случае был использован присадочный материал.



а – без присадочного материала, б – с присадочной проволокой
Рисунок 6 – Макроструктура сварного шва под микроскопом

На основании проведенного исследования влияния типов соединения на процесс формирования сварного шва при импульсной лазерной сварке жаропрочных образцов, изготовленных методом СЛС толщиной 3 мм установлено, что наиболее прочным типом является сварка встык, а за счет применения присадочного материала удалось снизить вероятность возникновения дефектов в виде микротрещин и усилить прочность. Также при применении присадочного материала в виде проволоки марки 12Х18Н12Т2 позволило снизить образование горячих микротрещин в сварном соединении, за счет снижения жаростойкости металла шва и повышения деформационной способности без потери прочности конструкции, а также избежать утонения сварного шва.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. с. 23–47.

2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. 557 с.
3. Прагер С. М., Солодова Т. В., Татаренко О. Ю. Исследование механических свойств и структуры образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из сплава ВЖ-159
4. Суфияров В.Ш., Попович А.А., Борисов Е.В., Полозов И.А. Селективное лазерное плавление жаропрочного никелевого сплава // Цветные металлы. 2015. №1 (865). с. 79–84.
5. Грязнов М.Ю., Шотин С.В., Чувильдеев В.Н. Эффект мезоструктурного упрочнения стали 316L при послыйном лазерном сплавлении // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. №5 (1). с. 43–50.
6. Евгенов А.Г., Роголев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 02. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.10.2017).
7. Евгенов А.Г., Роголев А.М., Карачевцев Ф.Н., Мазалов И.С. Влияние горячего изостатического прессования и термической обработки на свойства сплава ЭП648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления // Технология машиностроения. 2015. №9. с. 11–16.
8. Mostafa A., Rubio I.P., Brailovski V. et al. Structure, texture and phases in 3D printed In718 alloy subjected to homogenization and HIP treatments // Metals. 2017. Vol. 7. No. 196. P. 2–23

УДК 621.74:669.35

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА БрНХК 2,5-0,7-0,6 С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУЖИН

В.А. Ленина

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

Аннотация: Рассматривается влияние термической обработки и исходной структуры на механические свойства, характер поведения сплава БрНХК в процессе пластической деформации. Приведены результаты исследований по анализу взаимосвязи акустической эмиссии с эволюцией дефектной структуры сплава. Представлены данные, показывающие влияние обработки, предшествующей старению и исходной структуры на механические свойства проволоки из БрНХК и параметры акустической эмиссии.

Ключевые слова: бронза, термическая обработка, микроструктура, механические свойства, акустическая эмиссия.

Введение. Холодная пластическая деформация (ХПД) широко используется в промышленности как технология формообразования и упрочнения, а также как часть технологий НТМО. Поэтому анализ особенности поведения конструкционных материалов при статическом растяжении после упрочняющих обработок представляет интерес с точки зрения возможности уточнения параметров обработки сплавов при разработке новых технологий. Пластическая деформация, связанная с эволюцией дефектной структуры металлов. А так как акустическая эмиссия (АЭ), обусловленная локальной перестройкой структуры, является мерой процессов, протекающих в ходе пластической деформации, то целесообразно совместить эти методы исследования для получения информативных параметров наиболее полно характеризующих материал [1 - 3].

Бронза БрНХК 2,5-0,7-0,6 применяется в машиностроении и приборостроении в качестве конструкционного материала. Получение дополнительной информации о механических свойствах и особенностях поведения под нагрузкой расширит возможности её использования [4].

Материал и методики исследования. Механические свойства определялись при испытании на статическое растяжение на машине Shimadzu AGX-100кН. Микроструктура сплава изучалась с помощью оптического микроскопа DSX510 «OLIMPUS». Химический состав частиц, выделившихся при кристаллизации и из твердого раствора, а также матрицы бронзы, оценивался на основании результатов спектров, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа с интегрированной системой ЭДС –«PHENOMProX», с помощью этого же микроскопа определялся размер фаз. Акустическая эмиссия записывалась с помощью программно-аппаратного комплекса регистрации и обработки параметров акустической эмиссии («ProFee» г. Санкт-Петербург).

В работах [5 – 7] процесс пластической деформации в металлических материалах рассмотрен как волновой процесс распространения локализованных участков, реализующийся на нескольких структурных уровнях. Пластическая деформация связана со структурными элементами сплава, организованными в иерархические структуры на: макро (10^{-1} - 10^{-4} м), мезо (10^{-4} - 10^{-7} м) и микро (10^{-7} - 10^{-10} м) уровнях [8]. При этом наблюдается иерархическая соподчиненность макро-, мезо- и микроскопического уровней пластического течения, когда характерный масштаб нижележащего уровня определяет величину связывающего коэффициента для вышележащего уровня [9]. Формирование пространственно-временной структуры в деформируемом материале предполагает наличие концентраторов напряжений, возникающих на границах зерен, двойниках деформации, включений дисперсных фаз. В ходе пластического течения на мезоскопическом уровне в структуре сплава, в зонах нахождения концентраторов напряжений, происходит генерирование дислокаций, образующих при повышенных степенях деформации дислокационные сетки, локализованные в виде линий скольжения, полос деформации, двойников деформации, что также может приводить к зарождению и развитию микротрещин. В работах [7 - 9] установлено, что процесс накопления деформации в ряде сплавов осуществляется двояким образом: монотонным и скачкообразным. Скачкообразно-монотонный характер накопления деформации реализуется как квазипериодический процесс и проявляется при определенных степенях деформации. Локализация пластического течения описывается как процесс самоорганизации на мезоскопическом уровне при взаимодействии дислокаций в активной среде в форме автоволн [10], что проявляется в неустойчивости пластического течения в виде скачков на деформационных кривых и формированием зубчатой (или ступенчатой) кривой напряжение - деформация. Монотонный характер накопления деформации сопровождается монотонной АЭ, а деформационные эффекты, в виде скачкообразного накопления деформации, сопровождаются единичными импульсами среднеквадратного напряжения акустической эмиссии [11].

Метод АЭ, основанный на регистрации и обработке волн напряжений, возникающих при формировании, изменении и разрушении структур материалов, в настоящее время является наиболее эффективным для изучения

процессов и стадий развития дефектной структуры при исследовании пластического течения [11 - 13]. Любым неоднородностям на кривой растяжения (различные типы зубцов, площадки, пачки зубцов) соответствуют характерные изменения параметров АЭ. Так, в работе [12] было показано, что АЭ при прерывистой текучести, в отличие от кривых растяжения, не зависит от влияния скорости деформации. Поэтому при относительно высоких скоростях деформирования акустико-эмиссионные диаграммы точнее, чем кривые растяжения, отражают особенности макролокализации деформации.

Результаты исследования и обсуждение. Механические свойства образцов БрНХК (с равномерно и неравномерно распределенными интерметаллидами) в исходном состоянии и после старения приведены в таблице.

Таблица 1

Состояние сплава	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{0,05}$ МПа	σ_B МПа	δ , %	Твердость HV ₁₀₀	
					Зона поверхности	центр
Исходное	500 (301)*	390 (256)	709 (663)	2,9 (3,3)	-	-
Старение 440°С, 2ч.	812 (800)	668 (672)	860 (812)	5,2 (1,7)	22-24 (22-24)	22-26 (26); (40-44)**

* В скобках приведены механические свойства образцов из БрНХК со значительным количеством неравномерно распределенных интерметаллидов, концентрирующихся преимущественно в центральной части шейки образца.

** Значения HV₁₀₀ в зоне скопления интерметаллидов.

На рисунке 1 приведены кривые растяжения образцов из БрНХК в исходном состоянии (состояние поставки рис. 1, а) и после старения (рис.1, б, в). Особенностью деформационного упрочнения сплава в исходном состоянии на первом этапе, как видно из диаграммы растяжения (рис. 1, а), является накопление деформации в области напряжений, близких к $\sigma_{0,05}$ и $\sigma_{0,2}$ сплава, чему соответствует низкоамплитудная монотонная АЭ (рис. 2, а) с некоторым ростом энергии сигнала (рис. 2, б).

Это свидетельствует о низкой корреляции элементарных деформационных актов [11-12]. На стадии параболического упрочнения наблюдается локализованные в пространстве образца зоны пластического течения [10], что связано с поперечным скольжением и может свидетельствовать о макрокопической корреляции пластического течения деформируемого металла.

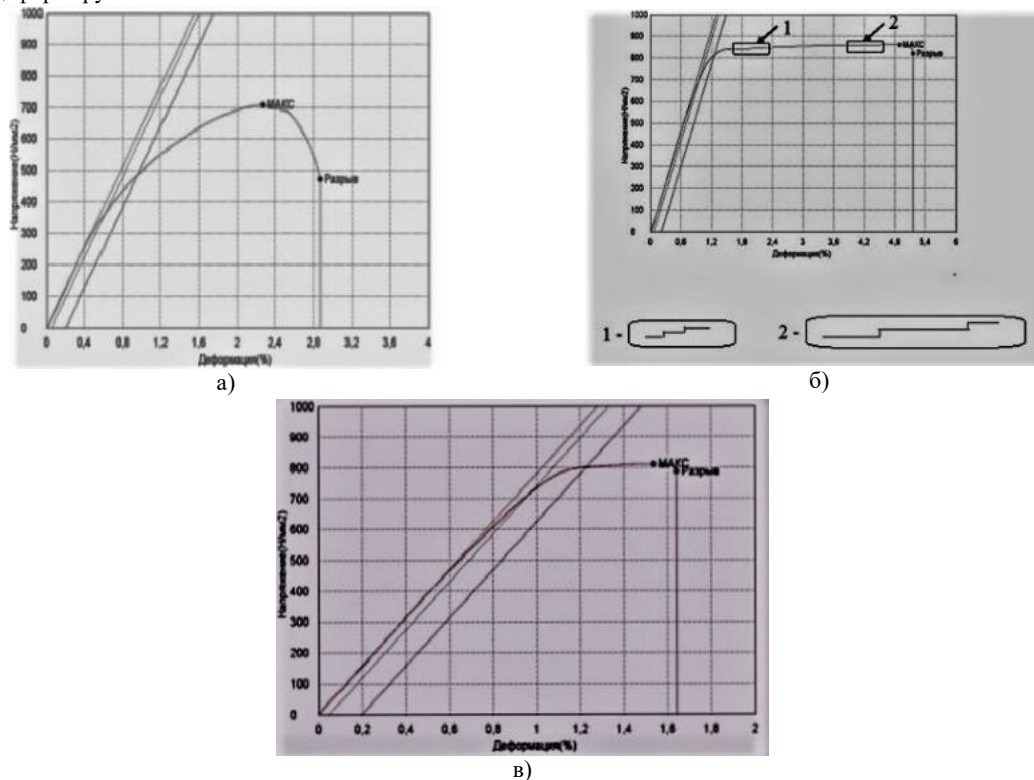


Рисунок 1 - Кривые растяжения образцов из БрНХК в исходном состоянии:
а) состояние поставки; б, в) образцы после старения

Рост напряжений до значений σ_{max} сопровождается дальнейшим накоплением деформации и резким увеличением амплитуды и энергии сигналов АЭ (рис. 2, а, б). Элементарный сдвиг в сплаве в области концентрации напряжений может являться релаксационным процессом, сопровождающимся генерированием сигнала АЭ, который можно рассматривать как фактор, влияющий на формировании автоволновой структуры пластической деформации [14]. Кроме того, высокоамплитудный сигнал АЭ в области снижения напряжений (рис. 1, а) связан, в том числе, и с ростом микротрещин, образовавшихся в процессе пластической деформации до критического размера.

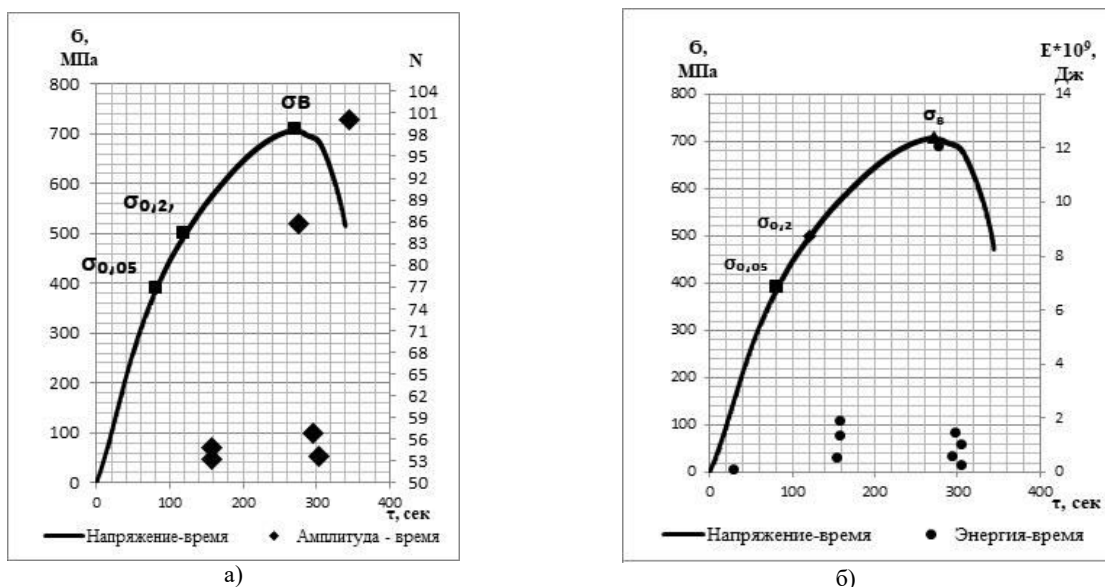


Рисунок 2 - Сигналы акустической эмиссии в процессе испытания образца на статическое растяжение в исходном состоянии:

а) соответствует низкоамплитудная монотонная АЭ; б) с некоторым ростом энергии сигнала

Интерметаллиды, выделяющиеся при старении, по режиму, приведенному в таблице, обеспечивают повышение механических свойств бронзы. Диаграмма растяжения образца сплава после старения, представленная на рисунке 1б, отличается от аналогичной на рисунке 1а наличием области более интенсивного упрочнения (линейный участок). В параболической зоне замедленного упрочнения (преимущественно вследствие поперечного скольжения), деформация может частично протекать и путем продольного скольжения, переходя затем к деформации двойникованием за счет накопления энергии на предыдущем этапе. Двойникование может проходить как путем образования новых двойников, так и роста существующих. Накопление деформации, характерное для интервала напряжений 680-750 Мпа (область, соответствующая значениям напряжений - к $\sigma_{0,05}$ и $\sigma_{0,2}$), сопровождается увеличением амплитуды и энергии сигналов АЭ (рис. 3, а, б).

Горизонтальный участок деформационной кривой соответствует протеканию пластической деформации практически без упрочнения. На этой стадии вдоль оси растяжения двигаются, разделенные интервалом, несколько очагов деформации. Дальнейшее накопление деформации происходит монотонно до степени деформации $\sim \varepsilon = 3\%$ с образованием площадок в виде ступенек, размер которых увеличивается, как и энергия сигналов АЭ (область 1 - рис. 1, б, рис. 3, б). При значениях $\sim \varepsilon = 3,2 \div 4,2\%$ (область 2 - рис. 1, б), с накоплением деформации значительно увеличивается как размер ступенек так и величина сигнала АЭ (амплитуда и энергия). Такому накоплению деформации соответствуют низкоамплитудные, перекрывающиеся сигналы напряжения акустической эмиссии (рис. 3, а, б).

При скачкообразной деформации происходит локализация пластического течения в узкой полосе [15], что сопровождается скачком деформации и формированием зубчатой (ступенчатой) кривой напряжение – деформация.

Установлено существование двух типов источников акустической эмиссии – дискретный и «непрерывный» [15, 16]. Считается, что первому типу источника соответствует трансляционный механизм скольжения, с которым связано формирование полос деформации. Источником акустической эмиссии второго типа могут быть процессы, связанные с относительным перемещением зерен, поворотами блоков, изменением их формы и размеров.

При напряжениях близких к σ_{max} повышение амплитуды и энергии сигналов АЭ очевидно связано с перечисленными выше процессами, а также ростом существующих микротрещин до критического размера, и в дальнейшем с разрушением образца. Особенностью поведения сплава в процессе пластической деформации является медленное развитие трещин и высокая энергоёмкость работы пластической деформации у вершины трещины.

В процессе статического нагружения сплава БрНХК (Т.О.; старение) наблюдается незначительный рост напряжений в области деформации $\varepsilon = 1,2 \div 5,2\%$. В настоящее время основным механизмом скачкообразного течения при пластической деформации является эффект динамического старения, т.е. динамического взаимодействия между атомами растворенного вещества и подвижными дислокациями [18, 19]. При этом на дислокациях образуются атмосферы примесей, которые их блокируют. Повышение напряжений позволяет дислокациям оторваться от точек закрепления и двигаться свободно до следующего препятствия. В отличие от однородной пластической деформации, при которой напряжение возрастает с увеличением скорости деформации, скачкообразная деформация показывает аномальное поведение – уровень напряжения уменьшается (или практически не растёт) с увеличением скорости деформации [18, 19].

Механические свойства БрНХК существенно зависят от количества, формы и распределения интерметаллидов (табл. 1). После старения несколько уменьшается разброс свойств прочности, характерный для состояния поставки. Однако неравномерное распределение интерметаллидов в исходном состоянии, увеличение их размеров при старении вызывают значительное снижение пластичности бронзы. На рисунке 1в представлена диаграмма растяжения образца БрНХК с неравномерным распределением интерметаллидов после старения. Характерным является уменьшение размера горизонтальной части диаграммы, с образованием нескольких ступенек при деформации в области значений $\varepsilon = 1,2 \div 1,5\%$ (аналогичных ступенькам в области 1 на рисунке 1б, но значительно меньших размеров).

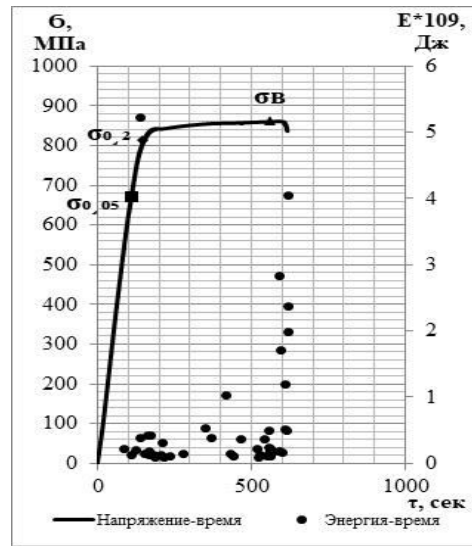
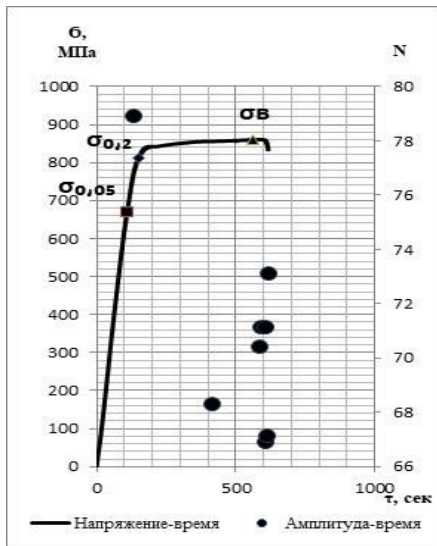


Рисунок 3, а, б - Сигналы акустической эмиссии в процессе испытания образца на статическое растяжение образцов после старения

Деформация при напряжениях, не превышающих значения $\sigma_{0,05}$ и $\sigma_{0,2}$ сопровождается появлением низкоамплитудных сигналов и ростом энергии сигналов АЭ (рис. 4, а, б). При достижении значений указанных параметров происходит резкий рост энергии сигналов АЭ, что связано, очевидно, с особенностями микроструктуры сплава, в исходном состоянии, представленной на рисунке 5. В структуре сплава наблюдаются не равномерное распределение интерметаллидов, их строчечное расположение.

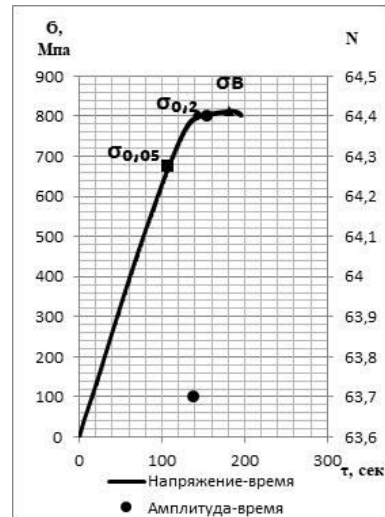
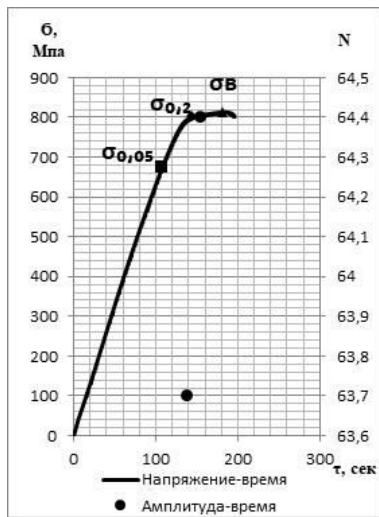


Рисунок 4, а, б - сигналы акустической эмиссии в процессе испытания образца на статическое растяжение (в центре образца области с неравномерным распределением интерметаллидов).

Согласно микроспектральному анализу, крупные округлые частицы представляют собой соединения хрома с кремнием состава Cr_3Si , легированные медью и небольшим количеством никеля. Включения могут содержать железо. Вытянутые пластинчатые выделения содержат меньше хрома, их состав ближе к Cr_2Si , но они включают медь, и никель, причем первой существенно в большем количестве. Старение бронзы способствует увеличению размеров наиболее крупных частиц (до 5,85 мкм) округлых и прямоугольных. В таблице приведены результаты замеров микротвердости по сечению двух образцов бронзы после старения. Наличие скоплений интерметаллидов приводит к неравномерному изменению твердости по сечению образца. При близких значениях твердости в области поверхности образцов равной 24-26 HV_{100} , в центре, при повышенном количестве интерметаллидов, в месте их скопления, твердость составляет 40-44 HV_{100} , а при их равномерном распределении в твердом растворе $\sim 26 \text{HV}_{100}$. В области расположения интерметаллидов, препятствующих перемещению дислокаций, возникает поле напряжений, созданное блокированными дислокациями.

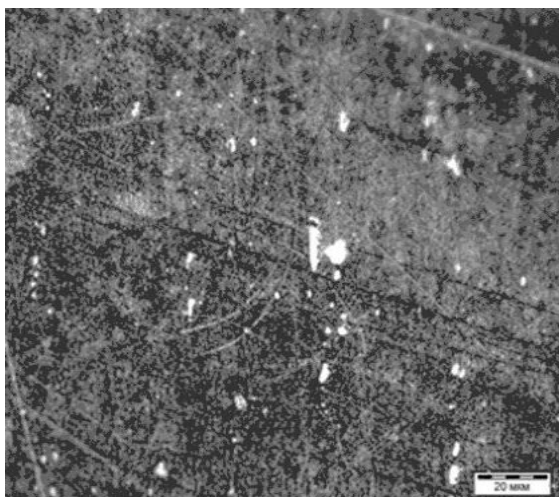


Рисунок 5 - Микроструктура БрНХК в исходном состоянии

В результате повышения напряжений разрушение сплава, в структуре которого присутствуют частицы избыточных фаз, происходит за счет того, что присутствующие и образующиеся трещины развиваются по межфазной поверхности или по включениям, более хрупкими, чем твердый раствор. Фаза Cr_2Si содержит ~15% кремния, что определяет её повышенную хрупкость по отношению твердого раствора. Особенности деформационного поведения ГЦК-металлов проявляются в низкотемпературной области в том, что накоплению деформации с низкой скоростью соответствует низкоамплитудная монотонная акустическая эмиссия (рис.3, а, б). Разрушение образца происходит почти сразу после достижения значений σ_B , а работа развития трещин критического размера минимальна.

Заключение. Проведенное исследование диаграмм растяжения образцов БрНХК и сигналов акустической эмиссии, зафиксированных одновременно в процессе их испытания показало, что при протекании пластической деформации эволюция структуры бронзы фиксируется как на кривых деформационного упрочнения, так и наличием сигналов акустической эмиссии. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения АЭ как метода исследования поведения металлов и сплавов в процессе пластической деформации, так и как метода неразрушающего контроля готовых изделий. Для повышения механических свойств бронзы целесообразно в процессековки устранять неоднородность распределения фаз, выделяющихся на стадии кристаллизации, что обеспечит как их значительное измельчение, так и отсутствие их распределения в виде строчек.

Библиографический список

1. Пастухова Ж.П., Рахштад А.Г. Пружинные сплавы цветных металлов. Рахштад А.Г. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 364 с.
2. Карева Н.Т., Корягин Ю.Д. Влияние режимов термической обработки на структуру бронзы БрНХК/ Металловедение и термическая обработка. № 4 - 2015. С. 84-88
3. Ремшев Е.Ю. Применение метода акустической эмиссии для контроля качества пружин из сплава ВТ23/ Металлообработка. № 4 - 2012. С. 27-33.
4. Карева Н.Т., Корягин Ю.Д. Влияние режимов термической обработки на структуру бронзы БрНХК/ Металловедение и термическая обработка. № 4 - 2015. С. 84-88.
5. Панин В.Е. Пластическая деформация как волновой процесс / В.Е. Панин, Л.Б. Зуев, В.И. Данилов и др. // ДАН СССР. – 1989. – Т. 308. – С. 1375–1379.
6. Зуев Л.Б. Автоволны локализованной пластической деформации /Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, В.В. Горбатенко // ЖТФ. – 1995. – Т. 65. – № 5. – С. 91–103.
7. Зуев Л.Б. О природе крупномасштабных корреляций при пластическом течении / Л.Б. Зуев, В.И. Данилов // ФТТ. – 1997. – Т. 39. – №8. – С. 1399–1403.
8. Панин В.Е. Деформированное твёрдое тело как нелинейная иерархически организованная система /В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // Физ. мезомех.– 2011. –Т. 14 – № 3. – С. 7–26.
9. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов /Г.А. Малыгин // УФН. – 1999. – Т. 169. – № 9. – С. 979–1010.
10. Зуев Л.Б. Автоволны локализованной пластической деформации /Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, В.В. Горбатенко // ЖТФ. – 1995. – Т. 65. – № 5. – С. 91–103.
11. Мерсон Д.Л. Физическая природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлах и сплавах: Дис. ...д.ф.-м.н. / Д.Л. Мерсон. – Тольятти, 2001. – 327 с.
12. Бибик З.И. Акустическая эмиссия при пластической деформации поликристаллов алюминия высокой чистоты / З.И. Бибик, В.Д. Нацк // Металлофизика. – 1982. – Т. 4. – № 4. –С. 92–99.
13. Криштал М.А. Распространение пластической деформации по сечениюобразца и акустическая эмиссия при одноосном растяжении меди / М.А. Криштал, Д.Л. Мерсон, В.П. Алехин и др. // ФММ. – 1987. – Т. 63. – №5. – С. 1011–1016.
14. ВЫБОР РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СПЛАВА ИЗ НИКЕЛЬХРОМКРЕМНИСТОЙ БРОНЗЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕУПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ/Ремшев Е.Ю., Воробьева Г.А., Ленина В.А.// В сборнике: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды тринадцатой общероссийской научно-практической конференции. В 2 т.. Сер. "Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 71" Санкт-Петербург, 2021. С. 157-161.
15. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА БРНХК 2,5-0,7-0,6 ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКАХ/Ленина В.А., Воробьева Г.А., Ремшев Е.Ю., Расулов З.Н. //Вестник машиностроения. 2021. № 8. С. 71-75.
16. Вестник машиностроения. 2021. № 8. С. 71-75. Hahner P. On the physics of the Portevin-Le Chatelier effect part 1: The statistics of dynamic strain ageing /P. Hahner // Materials Science and Engineering. – 1996. – V. A207. – P. 208–215.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ К
ВНЕШНИМ ВИБРАЦИОННЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА ПРИ ПОМОЩИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ
АМОРТИЗАЦИИ**

*Илюшин П.А., Наумченко В.П., Пикунов Д.Г., к.т.н. Соловьев А.В.
Филиал АО «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова», Москва*

Важной особенностью инерциальных измерительных приборов, применяющихся в космических аппаратах и ракетах-носителях, является их высокая чувствительность к линейным ускорениям. Это последствие обеспечения в них высокой точности измерения совместно с достаточно широким диапазоном измерения. Как ранее упоминалось для обеспечения стойкости приборов при уровнях механических воздействий, превышающих основной режим работы, необходимо применение системы амортизации внутри прибора.

Предварительный математический анализ линейной динамической системы, включающей в свой состав систему амортизации БЧЭа и систему амортизации в ВСА, подтвердил принципиальную возможность создания системы амортизации, обеспечивающей установленные требования к относительным перемещениям в приборе [1]. Причем динамические параметры этой системы амортизации обладают адекватными техническими характеристиками. Были обнаружены несколько групп реализаций, поэтому было принято решение уточнить модель с введением в нее нелинейных элементов и способов демпфирования [2].

Уточнения в математической модели колебательного контура

В модель ВСА были добавлены упругие ограничители, которые срабатывают при достижении относительного перемещения подвижной части в ВСА порогового значения в 1,3 мм. Модель БЧЭа была приближена к приборной в части ее начальной массы и геометрии задания воздействия на ВСА. Все ВСА и пружины приняты идентичными.

$$\begin{cases} M \cdot (\ddot{X} - g) + \beta \cdot (\dot{X} - \dot{X}_{\text{вх}}) + 3 \cdot C \cdot (X - X_{\text{вх}}) + 3 \cdot (C_{\text{ВСА}} + k_{\text{огр}} \cdot C_{\text{огр}}) \cdot (X - y) - F_{\text{д}} = 0 \\ M_{\text{ВСА}} \cdot (\ddot{y} - g) + (\beta_{\text{ВСА}} + k_{\text{огр}} \cdot \beta_{\text{огр}}) \cdot (\dot{y} - \dot{X}) + (C_{\text{ВСА}} + k_{\text{огр}} \cdot C_{\text{огр}}) \cdot (y - X) = 0 \\ \begin{cases} k_{\text{огр}} = 0, & |y - X| < 1,3 \cdot 10^{-3} \\ k_{\text{огр}} = 1, & |y - X| \geq 1,3 \cdot 10^{-3} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

, где:

$X_{\text{вх}}, \dot{X}_{\text{вх}}$ – перемещение и скорость корпуса прибора в инерциальном пространстве;

X, \dot{X}, \ddot{X} – перемещение, скорость и ускорение центра масс основания БЧЭ в инерциальном пространстве;

M, β, C – масса, вязкость и жесткость колебательной системы БЧЭ;

y, \dot{y}, \ddot{y} – перемещение, скорость и ускорение центра масс подвижной части ВСА в инерциальном пространстве;

$M_{\text{ВСА}}, \beta_{\text{ВСА}}, C_{\text{ВСА}}$ – масса, вязкость и жесткость колебательной системы ВСА;

$k_{\text{огр}}$ – коэффициент, обозначающий работу ограничителя в ВСА;

$\beta_{\text{огр}}, C_{\text{огр}}$ – вязкость и жесткость ограничителя в ВСА;

g – ускорение свободного падения;

$F_{\text{д}}$ – компенсирующее воздействие от диссипативных сил.

В качестве воздействия в уточненной модели задавалось линейное перемещение в форме шума с определенной спектральной характеристикой в области от 20 до 2000 Гц. Продолжительность воздействия была 2 с, что позволило существенно сократить время моделирования на предварительном этапе. Было проведено итерационное моделирование реакции динамической системы на указанное воздействие. Велась оценка по относительным перемещениям БЧЭа и ВСА, а также фиксировалась спектральная плотность виброускорения в характерных точках этих элементов. При этом проводилось последовательное математическое моделирование различных вариантов организации диссипативных сил для гашения колебаний [3]. В качестве условий успешной реализации системы амортизации принималось относительное перемещение в БЧЭа не более 6 мм, в ВСА не более 2,5 мм.

Моделирование вязкого трения

Введение вязкого трения для колебательной системы является аналогом уменьшения ее собственной добротности.

$$F_{\text{д}} = -\beta_{\text{д}} \cdot (\dot{X} - \dot{X}_{\text{вх}}) \quad (2)$$

, где:

$\dot{X}_{\text{вх}}$ – скорость корпуса прибора в инерциальном пространстве;

\dot{X} – скорость центра масс основания БЧЭ в инерциальном пространстве;

$\beta_{\text{д}}$ – дополнительная вязкость колебательной системы БЧЭ;

$F_{\text{д}}$ – компенсирующее воздействие от вязкого трения.

Проводилась комплексная оценка массы БЧЭа, собственной частоты системы амортизации БЧЭа, добротности колебательного контура БЧЭа. Получено 8000 реализаций, из них 498 обеспечивают заданные требования к системе амортизации.

Моделирование сухого трения

Введение сухого трения создает нелинейное гашение перемещений. Причем этот процесс проявляется во всех реальных механических колебательных системах. Характерно, что при трении, превышающем силы, вызывающие относительное перемещение, пружины в амортизаторе «стопоряются» и амортизатор полностью перестает работать.

$$\begin{cases} F_{\text{сум}} = 3 \cdot (C_{\text{ВСА}} + k_{\text{огр}} \cdot C_{\text{огр}}) \cdot (X - y) + M \cdot \ddot{X}_{\text{вх}} \\ \begin{cases} F_{\text{д}} = F_{\text{сум}}, & |F_{\text{сум}}| < F_{\text{тр}}^{\text{max}} \\ F_{\text{д}} = F_{\text{тр}}^{\text{max}}, & F_{\text{сум}} \geq F_{\text{тр}}^{\text{max}} \\ F_{\text{д}} = -F_{\text{тр}}^{\text{max}}, & F_{\text{сум}} \leq -F_{\text{тр}}^{\text{max}} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

, где:

$\ddot{X}_{вх}$ – ускорение корпуса прибора в инерциальном пространстве;
 X – перемещение центра масс основания БЧЭ в инерциальном пространстве;
 M – масса колебательной системы БЧЭ;
 y – перемещение центра масс подвижной части ВСА в инерциальном пространстве;
 $C_{ВСА}$ – жесткость колебательной системы ВСА;
 $k_{огр}$ – коэффициент, обозначающий работу ограничителя в ВСА;
 $C_{огр}$ – жесткость ограничителя в ВСА;
 $F_{сум}$ – сумма сил, которую компенсирует сухое трение;
 $F_{тр}^{max}$ – максимальная величина сухого трения;
 F_d – компенсирующее воздействие от сухого трения.

Проводилась комплексная оценка массы БЧЭа, собственной частоты системы амортизации БЧЭа, добротности колебательного контура БЧЭа, максимальной амплитуды сухого трения. Получено 88000 реализаций, из них 5764 обеспечивают заданные требования к системе амортизации.

Моделирование жидкостного демпфера

Этот вариант приводит к возникновению трехмассовой системы и существенному изменению характеристик динамической системы. Этот способ видится наиболее сложным в техническом плане, но наиболее привычным с точки зрения теоретического демпфирования колебаний.

$$\begin{cases} M_d \cdot (\ddot{y}_d - g) + \beta_d \cdot (\dot{y}_d - \dot{X}) + C_d \cdot (y_d - X) = 0 \\ F_d = C_d \cdot (y_d - X) \end{cases} \quad (4)$$

, где:

X, \dot{X} – перемещение и скорость центра масс основания БЧЭ в инерциальном пространстве;
 $y_d, \dot{y}_d, \ddot{y}_d$ – перемещение, скорость и ускорение центра масс подвижной части демпфера в инерциальном пространстве;

M_d, β_d, C_d – масса, вязкость и жесткость колебательной системы демпфера;

g – ускорение свободного падения;

F_d – компенсирующее воздействие от жидкостного демпфера.

Проводилась комплексная оценка массы БЧЭа, собственной частоты системы амортизации БЧЭа, добротности колебательного контура БЧЭа, массы подвижной части демпфера, собственной частоты демпфера, добротности в колебательной системе демпфера. Получено 10000 реализаций, из них 156 обеспечивают заданные требования к системе амортизации.

Моделирование ударного демпфера

Ранее экспериментально и математически исследовался вариант с одним и тремя грузами в демпфере. При их работе возникали слишком высокие импульсные воздействия, при одинаковой суммарной массе грузов ухудшающие характеристики системы амортизации. В итоговой модели рассматривается вариант с 6-ю грузами в демпфере. Этот вариант технически проще всего реализовать, но математически сложнее всего описать.

$$\begin{cases} \frac{1}{6} \cdot M_d \cdot (\ddot{y}_{гр1} - g) + \beta_{гр} \cdot (\Delta \dot{y}_{гр1}^B + k\beta_n \cdot \Delta \dot{y}_{гр1}^H) + C_{гр} \cdot (\Delta y_{гр1}^B + kC_n \cdot \Delta y_{гр1}^H) = 0 \\ \Delta y_{гр1}^B = \begin{cases} 0, & y_{гр1} + h_{гр} < y_{гр2} \\ y_{гр1} + h_{гр} - y_{гр2}, & y_{гр1} + h_{гр} \geq y_{гр2} \end{cases} \\ \Delta y_{гр1}^H = \begin{cases} 0, & y_{гр1} < X \\ y_{гр1} - X, & y_{гр1} \geq X \end{cases} \\ \frac{1}{6} \cdot M_d \cdot (\ddot{y}_{гri} - g) + \beta_{гр} \cdot (\Delta \dot{y}_{гri}^B + \Delta \dot{y}_{гri}^H) + C_{гр} \cdot (\Delta y_{гri}^B + \Delta y_{гri}^H) = 0 \\ \Delta y_{гri}^B = \begin{cases} 0, & y_{гri} + h_{гр} < y_{гri+1} \\ y_{гri} + h_{гр} - y_{гri+1}, & y_{гri} + h_{гр} \geq y_{гri+1} \end{cases}, i = 1..5 \\ \Delta y_{гri}^H = \begin{cases} 0, & y_{гri} < y_{гri-1} + h_{гр} \\ y_{гri} - y_{гri-1} - h_{гр}, & y_{гri} \geq y_{гri-1} + h_{гр} \end{cases} \\ \frac{1}{6} \cdot M_d \cdot (\ddot{y}_{гр6} - g) + \beta_{гр} \cdot (k\beta_b \cdot \Delta \dot{y}_{гр6}^B + \Delta \dot{y}_{гр6}^H) + C_{гр} \cdot (kC_b \cdot \Delta y_{гр6}^B + \Delta y_{гр6}^H) = 0 \\ \Delta y_{гр6}^B = \begin{cases} 0, & y_{гр6} + h_{гр} < X + h_d \\ y_{гр6} + h_{гр} - X - h_d, & y_{гр6} + h_{гр} \geq X + h_d \end{cases} \\ \Delta y_{гр6}^H = \begin{cases} 0, & y_{гр6} < y_{гр5} + h_{гр} \\ y_{гр6} - y_{гр5} - h_{гр}, & y_{гр6} \geq y_{гр5} + h_{гр} \end{cases} \\ F_d = kC_b \cdot C_{гр} \cdot \Delta y_{гр6}^{верх} + kC_n \cdot C_{гр} \cdot \Delta y_{гр1}^{низ} \end{cases} \quad (5)$$

, где:

X – перемещение центра масс основания БЧЭ в инерциальном пространстве;

i – порядковый номер груза от 1 до 6, причем 1-й груз расположен снизу;

$y_{гri}, \dot{y}_{гri}$ – перемещение и ускорение центра масс подвижной части i -го груза в инерциальном пространстве;

$\Delta y_{гri}^B, \Delta \dot{y}_{гri}^B$ – относительное сжатие и скорость этого сжатия верхней деформируемой части i -го груза;

$\Delta y_{гri}^H, \Delta \dot{y}_{гri}^H$ – относительное сжатие и скорость этого сжатия нижней деформируемой части i -го груза;

M_d – суммарная масса грузов в демпфере;

$\beta_{гр}, C_{гр}$ – вязкость и жесткость при соударении между деформируемыми частями грузов;

$k\beta_n, kC_n$ – коэффициенты приведения вязкости и жёсткости при соударении между деформируемыми частями нижнего груза и БЧЭ;

$k\beta_v, kC_v$ – коэффициенты приведения вязкости и жёсткости при соударении между деформируемыми частями верхнего груза и БЧЭ;

$h_{гр}$ – высота одного груза;

h_d – расстояние между краями ударного демпфера без грузов;

F_d – компенсирующее воздействие от ударного демпфера.

Проводилась комплексная оценка массы БЧЭа, собственной частоты системы амортизации БЧЭа, добротности колебательного контура БЧЭа, суммарной массы грузов в демпфере, жесткости и вязкости при ударах между грузами, жесткости и вязкости при ударах верхнего груза о верхнее основание конструкции демпфера, жесткости и вязкости при ударах нижнего груза о нижнее основание конструкции демпфера, высоты одного груза, расстояния между краями ударного демпфера без грузов. Получена 13641 реализация, из них ни одна не обеспечивают заданные требования к системе амортизации в части относительного перемещения в БЧЭа, 7244 обеспечивают требования в части относительного перемещения в ВСА. Поскольку моделирование этого варианта наиболее ресурсоемкое, то рассмотрены далеко не все варианты.

Результаты и дальнейшие планы

Параллельно математическому моделированию велись экспериментальные исследования. Результаты испытаний и моделирования оказались достаточно близки. Модель в части имитации системы амортизации можно считать верифицированной.

Можно отметить, что обеспечить требования по ограничению касания в ВСА можно при помощи системы амортизации с низкой собственной частотой и практически любой добротностью. Более сложной задачей является обеспечение в заданных пределах относительного перемещения БЧЭа. Наиболее приближенные к существующей конструкции результаты приведены ниже.

Таблица 1 – Наилучшие результаты при $M=1,2$ кг, $f=30$ Гц, $\beta=7,54$ кг/с

Тип демпфирования	Относительное перемещение	
	в БЧЭа, мм	в ВСА, мм
Вязкое трение, $\beta_d=37,7$ кг/с	9,0	0,8
Сухое трение, $F_{тр}^{max}=160$ Н	13,1	1,1
Жидкостной демпфер, $M_d=1,2$ кг, $\beta_d=36,2$ кг/с	6,0	1,7
Ударный демпфер, $M_d=1,3$ кг	8,6	1,7

Как видно обеспечить требования в части относительных перемещений ВСА возможно уже при системе амортизации с собственной частотой 30 Гц. Более сложной задачей является гашение относительных перемещений, возникающих при колебаниях БЧЭа. В итоге наиболее эффективным видится путь одновременного применения нескольких вариантов введения диссипативных сил в систему амортизации. На следующем этапе имеет смысл оценивать технические способы обеспечения параметров математической модели. Такой подход позволит выбрать наилучший вариант в части сохранения габаритно-массовых характеристик прибора и уменьшения экономических затрат при изготовлении системы амортизации.

Библиографический список

1. П.А.Илюшин, В.П.Наумченко «Анализ влияния параметров конструкции инерциального прибора на его динамические характеристики при внешнем вибрационном возмущении» сборник тезисов к конференции «Королёвские чтения 2022» (XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства).
2. Вульфсон И. И. Краткий курс теории механических колебаний / И. И. Вульфсон— Библиотека ВНТР. — М.: ВНТР, 2017. — 241 с.
3. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний: пер. с англ. М.: Мир, 1988. 448 с.

УДК 621.91.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ РЕЗАНИЕМ ЛИНЕЙНОГО ПОЛИАМИДА И АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ

Антипина Е.А., Александров А.С., Дулов Д.В., Метелёв М.А.

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

Современное производство радиопроводящих систем требует от применяемых конструкционных материалов высоких эксплуатационных свойств, прежде всего отвечающих за работоспособность и ресурс. Традиционные конструкционные материалы на основе металлов и их сплавов не в состоянии удовлетворить эти требованиям. Поэтому широкое применение получают линейные полиамиды – пластмассы на основе линейных синтетических высокомолекулярных соединений, содержащих в основной цепи амидные группы амидов, представлены в таблице 1.

Таблица 1 Виды линейных полиамидов и их свойства

	Полиамид 6	Полиамид 66 (6.6)	Полиамид 610 (6.10)	Полиамид 612 (6.12)	Полиамид 11	Полиамид 12
Температура плавления, °С	220	260	215	213	198	178
Плотность, г/см ³	1,084-1,235	1,13-1,14	1,04	1,3	1,03	1,01

Полиамиды (Капролоны) являются исходными материалами для таких деталей как шестерни, втулки, колёса, вкладыши и многое другое. Применение данных материалов обусловлено:

- нечувствительность к воздействию агрессивных сред: углеводов, различных масел, эфиров, спиртов, растворителей, щелочей и кислот низкой концентрации.
- высокая механическая прочность при том, что полиамиды прекрасно поддаются механической обработке.
- хорошие свойства скольжения.
- низкий коэффициент трения, коррозионная и биологическая стойкость, что увеличивает износоустойчивость деталей.
- вибростойкость и бесшумность в работе (благодаря низкой плотности по сравнению с металлами и их сплавами, что уменьшает нагрузку на детали).
- высокая стойкость к радиации (гамма - и рентгеновским лучам).
- нетоксичность, что позволяет использовать материалы в пищевой, фармацевтической промышленности.
- низкий коэффициент влагопоглощения.

Наиболее удовлетворяющими характеристиками для изготовления изделия «Антенна» (рис.1) является Полиамид 6 (капролон; **полиамид 6 блочный; ПА 6**). Данный материал является синтетическим полимером и производится из капролактама (гексагидро-2Н-азепин-2-он). ПА-6 используется для замены металлических изделий (из стали, цветных металлов) в производстве больших и малых деталей. Изделия из капролона хорошо справляются с ударными нагрузками, долговечны, являются прекрасным диэлектриком. В качестве заготовки был выбран пруток Ø20мм, выполненный по ТУ 6-05-988-93. Технические характеристики данного материала представлены в таблице 2.

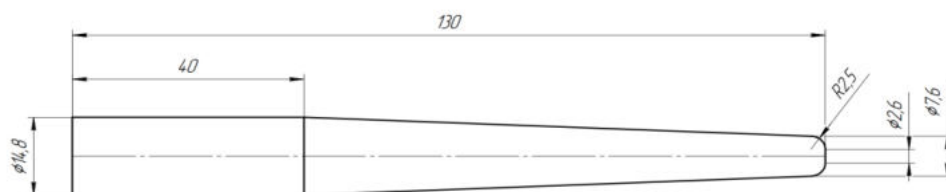


Рис.1 Эскиз изделия «Антенна»

Обработка **ПА-6** резанием однолезвийным режущим инструментом является, в настоящее время, наиболее распространенным методом окончательного формообразования поверхностей изделий. При механообработке актуальными являются вопросы, связанные с выбором режущего инструмента, а также выбора наиболее рациональных режимов обработки с точки зрения получения требуемых параметров качества изделия.

Данный материал обрабатывается на обычных металлообрабатывающих станках, но имеет несколько особенностей, которые необходимо учитывать. Из-за плохой теплопроводности и относительно низкой температуры плавления ПА-6, необходимо максимально осуществлять теплоотвод при механической обработке, чтобы избежать поднятия температуры в изготавливаемой детали. Это позволит избежать тепловой перегрузки пластмассы (изменение цвета и даже подплавление поверхности). Для этого необходимо соблюдать следующие рекомендации:

- кромки режущего инструмента должны всегда быть в безукоризненном состоянии и хорошо заточенными;
- режущий инструмент должен быть установлен так, чтобы режущая кромка только касалась пластмассы;
- следует позаботиться о хорошем удалении стружки с режущего инструмента;
- в случае большого тепловыделения должно быть обеспечено охлаждение (например, при сверлении);
- для снятия внутренних напряжений и во избежание растрескивания крупных изделий рекомендуется сложную обработку разделять на простые операции, в промежутках между которыми материал укладывать на 48 часов в воду;
- блоки капролона в холодное время года допускаются к обработке только после 5 дней выдержки в теплом помещении.

Процесс обработки данного материала можно отнести к высокотемпературным процессам, протекающим в локальных зонах режущей кромки.

Для обработки изделия и подбора наиболее оптимальных режимов резания, с точки зрения наилучшего качества и скорости обработки, была выбрана пластина VCGX110302-PMN. В таблице 3 приведены выбранные режимы обработки изделия. Вся обработка производилась с применением СОЖ.

Основная проблема заключается в том, что при обработке изделия на рекомендуемых режимах резания приводит к появлению ряда дефектов. В ходе работы были выявлены следующие дефекты:

- биение заготовки из-за большого вылета;
- пластическая деформация;
- наматывание стружки на заготовку с последующим затруднением обработки в связи с увеличением глубины резания;
- наматывание стружки на заготовку с последующей адгезией и деформацией самой заготовки;
- образование ворса на обработанной поверхности.

В ходе обработки первого образца наблюдалось образование тонкой и длинной сливной стружки, которая тут же наматывалась на заготовку (рис.2). Стоит отметить, что образование сегментной стружки добиться не получилось ввиду особенностей материала.

При обработке второго образца был выявлен дефект навивки стружки на заготовку, но уже с деформацией изделия – образования на нём канавок, связанных с большим усилием навивки и пластической деформацией заготовки (рис. 3).

Таблица 2 Технические характеристики полиамида 6 (ПА-6)

Наименование показателя	Полиамид блочный (ТУ 6.05.988-87)
Плотность, кг/м ³	1150-1160
Температура плавления, °С	220-250
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	65-85
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	100-110
Относительное удлинение при разрыве, %	15-30
Изгибающее напряжение при величине прогиба равной 1.5 толщины образца, МПа, не менее	80
Сопротивление ударной нагрузке (ударная вязкость), без надреза, кДж/м ²	не разрушаются
Модуль упругости, ГПа	2.3-2.4
Твердость вдавливания шарика, МПа	80-100
Температура размягчения при изгибе при напряжении 1.8 МПа, °С	100-110
Водопоглощение за 24 часа, % / максимальное, %	1.5-2.0 / 6.0-7.0
Коэффициент теплопроводности при комнатной температуре, Вт/м.град	0.29
Средний коэффициент линейного теплового расширения на 1 °С в интервале температур:	
- от -50 до 0 °С	6.6-10.5
- от 0 °С до 50 °С	9.8-10.5
Коэффициент трения по стали	0.2-0.3
Напряжение при деформации сжатия 25%, МПа	100-110
Удельное поверхностное электр. сопротивление, Ом	6-1014-3.5-1015
Удельное объемное электр. сопротивление, Ом·см	(2-6)·1014
Электрическая прочность, кВ/мм	30-35

Таблица 3 Режимы резания образцов

Образец №	Частота вращения, п об/мин	Скорость резания, v _c м/мин	Подача, v _f мм/мин		Глубина резания, ар мм
			Черновая обработка	Чистовая обработка	
1	2000	126	0.3	0.08	1.0
2	1000	63	0.2	0.08	0.7
3	700	44	0.3	0.08	1.0
4	500	31	0.2	0.08	0.7

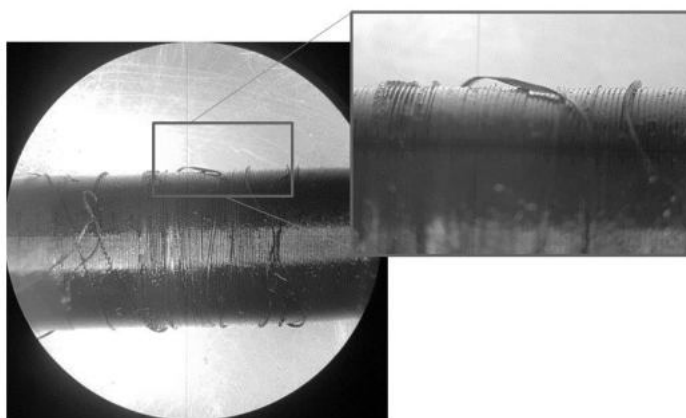


Рис.2 Дефект поверхности после обработки (намотка стружки)

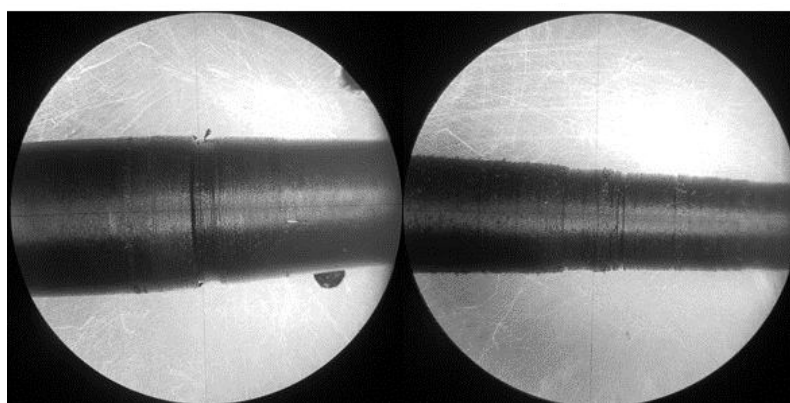
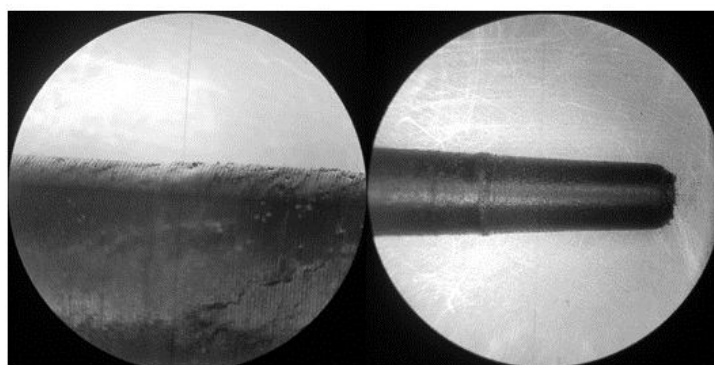


Рис.3 Канавки после обработки

На этапах черновых проходов режущим инструментом на образце 2 и 3 произошла адгезия намотанной стружки с заготовкой (рис. 4а), а на последующих проходах чистовой обработки было выявлено образование ворса на обработанной поверхности (рис. 4 б).



а б
Рис.4 Дефекты, вызванные намотанной стружкой на заготовку
а – адгезия; б – образование ворса.

При черновой обработке образца номер 4, в некоторых случаях, наблюдался налет заготовки на резец с последующим образованием деформации изделия (рис.5). Данный дефект произошёл из-за намотанной стружки на заготовку, которая в процессе обработки образовала дополнительный слой материала. Вследствие чего силы резания были превышены и заготовку отогнуло в следствии чего произошел удар вершины режущей кромки пластины о заготовку.

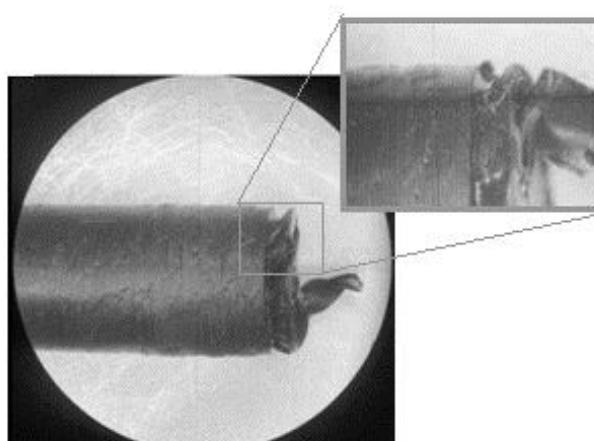


Рис.5 Дефект, связанный с увеличением сил резания

Таким образом для оптимизации технологического процесса обработки изделия и уменьшения рисков образования дефектов на обрабатываемой поверхности заготовки рекомендована сегментированная обработка поверхности (рис.6) с технологическими паузами для контроля качества обработанных зон и удаления с них стружки.

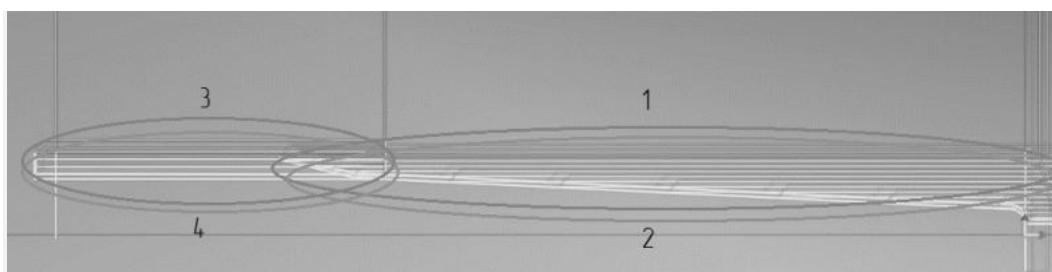


Рис.6 Сегментированная обработка поверхности:
цифрами 1,2,3,4 – указаны зоны обработки в заданной последовательности.

Также в отработке режимов были установлены оптимальные значения режимов резания для черновой обработки, получистовой и чистовой. Численные данные представлены в таблице 4.

Таблица 4 Численные данные режимов резания

Вид обработки	Режим резания		
	Частота вращения, n об/мин	Подача, v_f мм/мин	Глубина резания, ap мм
Черновая	500	0.2	1.0
Получистовая		0.1	1.0
Чистовая		0.08	0.7

При соблюдении всех рекомендаций можно достичь заданных свойств обрабатываемой поверхности без дефектов (рис.7).

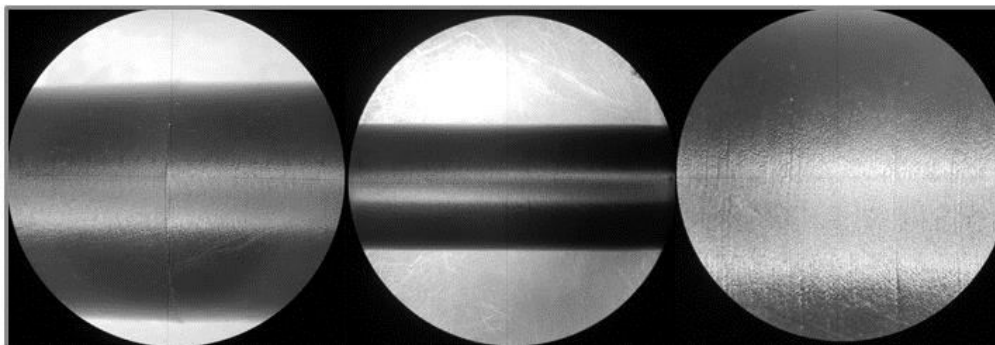


Рис.7 Обработанная поверхность изделия без видимых дефектов

На настоящий момент по данным проведенных испытаний и анализу литературных источников можно сформулировать некий набор общих требований к бездефектной механической лезвийной обработке для требуемого качества:

- необходимо оптимально выбирать инструментальный материал пластины;
- использовать инструмент из твердого сплава имеющий специальные противозносные покрытия и максимально острые кромки;
- технологическая система (станок, приспособление, инструмент, заготовка) должна обладать достаточной жесткостью, чтобы не допускать упругих деформаций обрабатываемой заготовки под действием составляющих сил резания, то есть стараться исключить колебательные процессы в зоне резания
- применять СОЖ для улучшения смазывающих свойств в зоне резания, а также охлаждения режущего инструмента и заготовки.

Библиографический список

1. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: Справочник/ А. В. Анисимов, В.Е.Бахарева, И.В. Блышко и др. Под общей ред. И.В. Горынина и А.С. Орыщенко. – СПб.: НПО «Профессионал», 2012 г.- 916 с.
2. Сравнительный анализ токарной обработки капролона / О. Ю. Еренков // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей 3-й Международной молодежной научно-практической конференции, Курск, 22–23 сентября 2016 года / Ответственный редактор Горохов А.А.. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2016. – С. 78-81.
3. Исследование влияния термообработки капролона на качество токарной обработки заготовок / О. Ю. Еренков, А. И. Еруков // Технология машиностроения. – 2018. – № 5. – С. 23-26.
4. Совершенствование технологии механической обработки заготовок из капролона : монография / О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко, Е. В. Фалеева ; О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко, Е. В. Фалеева ; М-во трансп. Российской Федерации, Федеральное агентство ж.-д. трансп., Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Дальневосточный гос. ун-т путей сообщ.". – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2011. – 131 с. – ISBN 978-5-262-00613-7.
5. Токарная обработка заготовок из капролона / О. Ю. Еренков, Д. О. Яворский // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении : Сборник научных статей 5-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Курск, 14 февраля 2020 года / Редколлегия: А.А. Горохов. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 92-94.
6. Исследование усадки стружки при обработке капролона / Д. В. Вознюк, Д. И. Михайлюк, Я. А. Бучнев, Т. Джумашев // Научные исследования молодых учёных : сборник статей XIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 27 июля 2021 года. – Пенза: Наука и Просвещение, 2021. – С. 41-43.
7. Повышение качества обработанных поверхностей полимерных деталей за счет оптимальных траектории движения инструмента и режимов резания / Н. Н. Татарников, Н. В. Аверин, М. В. Трубицин // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019) : Сборник трудов конференции, Москва, 04–06 декабря 2019 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2020. – С. 59-62.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СПЛАВЛЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

П. А. Паушта^{1,2}, С. С. Смоленцева^{1,2}

¹ *Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.*

² *АО «Лазерные системы»*

Введение

Новые технологии производства позволяют развивать различные сферы человеческой деятельности. Аддитивные технологии предполагают построение детали методом послойного добавления (от англ. add – добавлять) материала, в отличие от традиционных методов изготовления детали, за счёт удаления (subtraction – вычитание) материала из массива заготовки.

Селективное лазерное сплавление (СЛС) – одна из технологий аддитивного производства (АП), предназначенная для сплавления микрочастиц металлических порошков с использованием лазера высокой мощности [1]. Деталь создается путем избирательного сплавления порошка внутри слоев и между слоями, что позволяет создавать функциональные изделия. Используя лазер с высокой плотностью энергии, можно реализовать сложную геометрию, в том числе с внутренними каналами и полостями в соответствии с моделями автоматизированного проектирования. Для 3D печати аэрокосмических компонентов часто используются сплавы из алюминия и титана. Алюминий, лёгкий и универсальный металл, не обладает прочностью стали, но более устойчив к коррозии. Титан объединяет в себе прочность стали и лёгкость алюминия, и является одним из наиболее популярных материалов аддитивного производства. Нержавеющая сталь может использоваться для 3D печати водостойких деталей высокой прочности и плотности, которые могут быть использованы в экстремальной среде. Примерами могут быть реактивные двигатели самолетов и ракет.

В работе были проведены исследования влияния режимных параметров технологии СЛС на изготовленный образец из нержавеющей стали аустенитного класса. Одним из основных этапов в разработке режимов СЛС является выявление оптимальных диапазонов технологических параметров, обеспечивающих плавление шарообразных частиц порошка в условиях их нагрева лазерным потоком тепла.

Материалы и методы

Объектом исследования являются синтезированные заготовки из сплава 12Х18Н10Т гранулометрического состава 10-63 мкм, полученные методом селективного лазерного сплавления (СЛС) на установке АО «Лазерные системы» M250, разработанной отечественной компанией АО «Лазерные системы», внешний вид которой приведен на рис. 1.



Рис.1 – Установка селективного лазерного сплавления АО «Лазерные системы» M250

Целью работы являлось исследование и выбор технологических режимов синтеза материала металлопорошковой композиции (МПК) сплава 12Х18Н10Т методом СЛС.

Подготовка шлифов осуществлялась абразивным методом с помощью шлифовально-полировального станка. Микроструктуру образцов выявили путем травления.

Исследование

Регулируемыми параметрами режима сплавления порошкового материала являются мощность лазерного излучения, скорость движения лазерного пятна по порошковому слою, шаг смещения лазерного пятна при штриховке и высота укладываемого слоя порошка [2].

Проект состоял из 36 кубов с геометрическими размерами – 15мм x 15мм x 15мм. Общее количество выращенных слоев – 469, а высота одного слоя – 32 мкм.

На рисунке 2 изображены шлифованные образцы под срезом.



Рис. 2 – Шлифованные образцы

Каждый образец был изготовлен с определенными технологическими параметрами. По итогам исследования микроструктуры полученных деталей, был выбран самый оптимальный режим селективного лазерного сплавления.

В таблицах 1 и 2 представлены технологические режимы для получения синтезированных заготовок из сплава 12X18Н10Т на установке М250

Таблица 1 – Режимы селективного лазерного сплавления

N образца	Структура									
	Штриховка					Контурные линии				
	Ширина полосы, мм	Длина слияния, мм	Шаг, мкм	Мощность, Вт	Скорость	Отступ, мкм	Defocus	Мощность, Вт	Скорость,	
1	10	2	110	213	800	50	0	165	600	
2				235						
3				256						
4				192						
5				170						
6				213						
7										880
8										960
9										720
10				640						
11			120							
12				213						
13				235						
14				256						
15				192						
16			170							
17			213							
18				880						
19				960						
20	720									
21	640									

Таблица 2 - Режимы селективного лазерного сплавления

N образца	Структура									
	Штриховка					Контурные линии				
	Ширина полосы, мм	Длина слияния, мм	Шаг, мкм	Мощность, Вт	Скорость	Отступ, мкм	Defocus	Мощность, Вт	Скорость,	
18	7	4	110	213	800	50	0	165	600	
20				235						
21				256						
22				192						
23				170						
24				213						
25										880
26										960
27										720
28				640						
29			120							
30				213						
31				235						
32				256						
33				192						
34			170							

33				213	880				
34				213	960				
35				213	720				
36				213	640				

По итогам исследования, самым оптимальным режимом селективного лазерного сплавления порошка 12X18H10T стал режим №8 с параметрами: мощность – 213Вт, скорость – 720мм/с, шаг – 120мкм, ширина полосы – 10мм.

Исследование проводилось под микроскопом с объективами пятикратного, десятикратного и двадцатикратного увеличения.

Фотографии микроструктуры шлифа с минимальным количеством дефектов в виде объединения нескольких частиц порошка и микротрещин, представлены на рис. 3 (а,б).

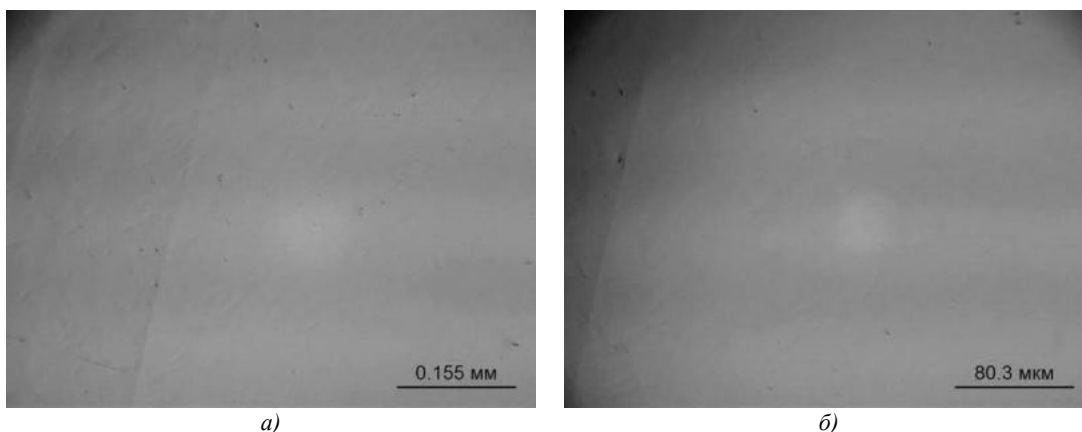


Рис. 3 – Фото образца с минимальным количеством дефектов под микроскопом: а – 155 мкм; б – 80,3 мкм

На рис. 4 (а,б) изображены снимки шлифа образца с наибольшим показателем пористости под микроскопом с различными объективами. Большой показатель пористости можно обусловить высокой плотностью мощности, которая воздействует на спекаемый слой, что приводит к образованию пор в результате «захвата» пузырьков газа в ванне расплава.

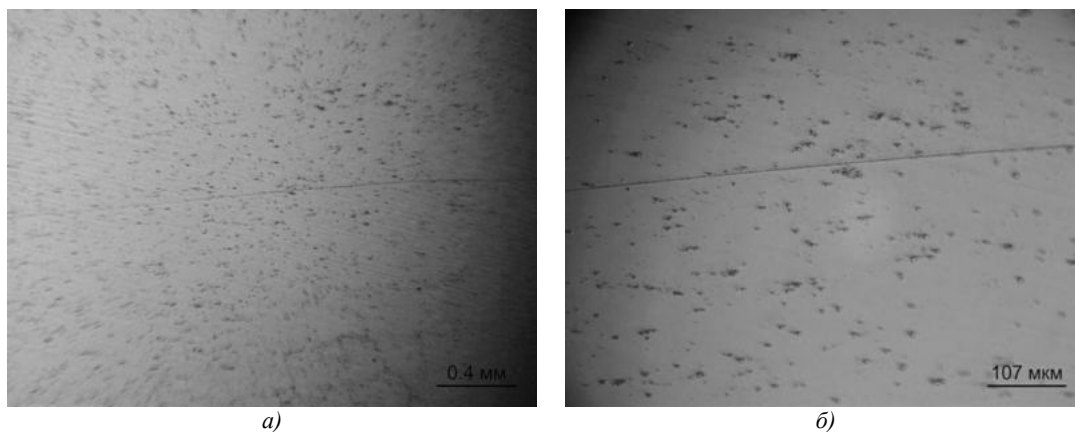


Рис. 4 – Фото образца с максимальным количеством дефектов под микроскопом: а – 400 мкм; б – 107 мкм

Заключение

Произведены исследования технологических параметров синтеза материала металлопорошковой композиции сплава 12X18H10T методом СЛС.

Изготовлены заготовки с различными технологическими параметрами, на основе которых был выявлен оптимальный режим сплавления исследуемого материала.

Проведено исследование микроструктуры шлифов, по результатам которых были определены образцы с наименьшим и наибольшим количеством пор.

Исследуемый сплав 12X18H10T может быть использован для изготовления образцов на растяжение методом SLM с применением установки М 250. Для проведения сравнительного анализа прочностных характеристик образцов, полученных методом SLM, с образцами из этой стали, полученными традиционными способами.

Библиографический список

1. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology // Volume Individualized production by means of high power Selective Laser Melting (SLM). Schleifenbaum H., Meiners W., Wissenbach K., Hinke C. Volume 2, Issue 3, 2010, Pages 161-169.
2. Сотов А.Н. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления жаровых труб ГТД методом селективного лазерного сплавления. 2017. №S/ С. 22-43.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТАЛИ 12X18H10T, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

П. А. Паушта^{1,2}, С. С. Смоленцева^{1,2}

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

² АО «Лазерные системы»

Введение

На сегодняшний день одним из важнейших направлений развития современных технологий в авиа- и ракетостроении является производство высокотехнологичной продукции из сложно обрабатываемых материалов методами аддитивных технологий (АТ/ АМ – additive manufacturing) [1]. Использование АТ позволяет сократить сроки выполнения изделий, а также исключить трудоемкое изготовление оснастки, что в конечном итоге позволит уменьшить расходы на производство.

На данный момент наибольший интерес представляет технология селективного лазерного сплавления SLM (Selective Laser Melting) [2]. Процесс SLM заключается в послойном синтезе металлического порошка определенного гранулометрического состава с помощью лазерного излучения. Операция повторяется до завершения построения изделия, предварительно разработанного и разбитого на слои CAD-моделью.

Данная работа посвящена исследованию образцов, полученных из отечественного порошка стали 12X18H10T, изготовленного ООО «СфераМ». Кроме того, приведен гранулометрический анализ исходного порошка, а также данные эксперимента по насыпной плотности и текучести.

Материалы и методы

Объектом исследования является порошок стали 12X18H10T гранулометрического состава 10-63 мкм, химический состав которого приведен в таблице 1, и образцы из этого материала, полученные методом SLM.

Таблица 1. Химический состав стали 12X18H10T

Массовая доля элементов, %								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	P	S	Fe
0,066	0,59	1,32	17,47	9,41	0,46	0,031	0,014	70,64

Исследование гранулометрического состава и структуры гранул исходного порошка проводилось с помощью аналитического сканирующего электронного микроскопа Zeiss Merlin в МРЦ «Нанотехнологии» при СПбГУ.

Определение насыпной плотности исходного порошка проводилось экспериментально с использованием воронки согласно ГОСТ 19440-94 в АО «Лазерные системы». Сущность метода заключается в измерении массы определенного количества порошка, который в свободно насыпанном состоянии полностью заполняет емкость известного объема. Свободно насыпанное состояние получается при заполнении емкости с помощью воронки, расположенной над ней на определенном расстоянии. Отношение массы к объему представляет собой насыпную плотность.

Определение текучести исходного порошка проводилось экспериментально с помощью калиброванной воронки (прибора Холла) согласно ГОСТ 20899-98 в АО «Лазерные системы». Сущность метода заключается в измерении времени, необходимого для истечения массы определенного количества металлического порошка через отверстие калиброванной воронки стандартизированных размеров.

Изготовление образцов проводилось с помощью установки селективного лазерного сплавления M250, разработанной отечественной компанией АО «Лазерные системы», внешний вид которой приведен на рис. 1.



Рис. 1. Установка селективного лазерного сплавления металлических порошков M250

Подготовка шлифов осуществлялась абразивным методом с помощью шлифовально-полировального станка.

Экспериментальная часть

Исследование исходного материала с помощью аналитического сканирующего электронного микроскопа показало, что в основной массе частицы имеют сферическую форму ~ 90% (см. рис. 2: а, б) с незначительным количеством сателлитов и дефектных частиц неправильной формы.

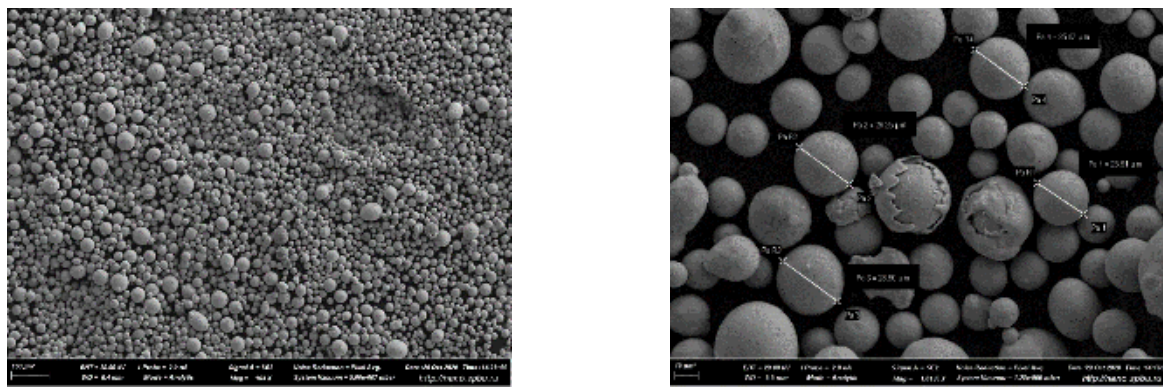


Рис. 2. Микроструктура гранул порошка стали 12X18H10T: а – 100 мкм; б – 10 мкм

Анализ гранулометрического состава показал, что количество фракций частиц составило: размером 10-20 мкм – около 55%, размером 21-30 мкм – около 30%, размером 31-40 мкм не более 10%, размером менее 10 мкм и более 40 мкм не более 5%. В результате была составлена гистограмма зависимости размера частиц в каждой фракции от их количества в процентах (см. рис. 3).

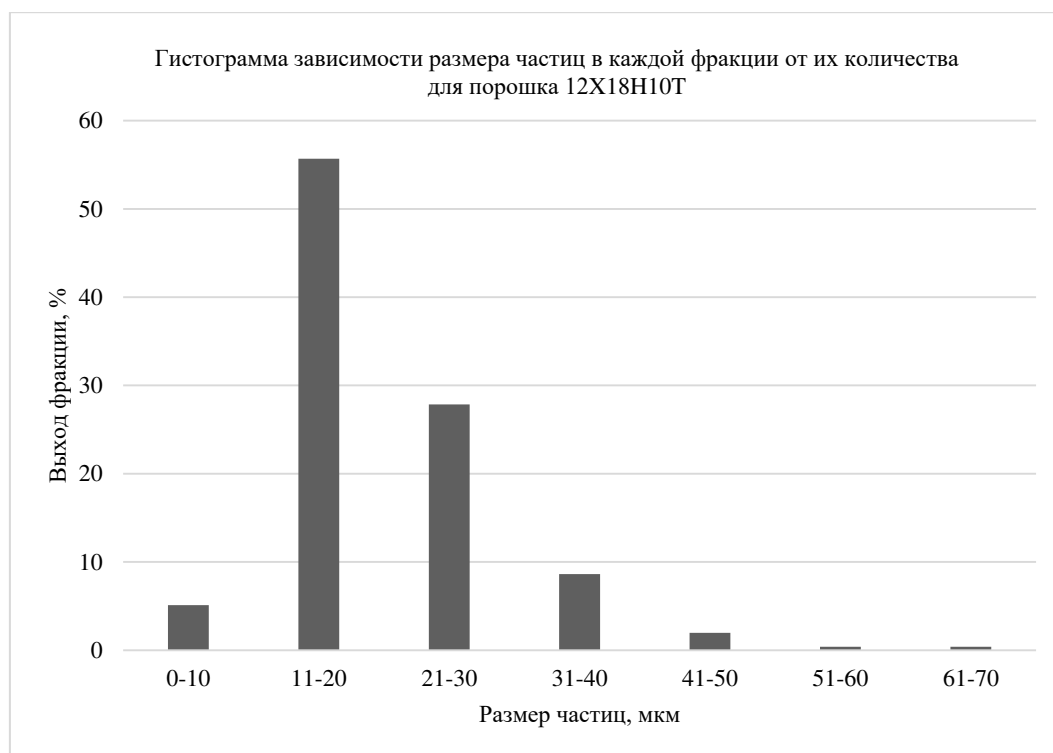


Рис. 3.

Гистограмма зависимости размера частиц в каждой фракции от их количества для порошка 12X18H10T

Результаты эксперимента по определению насыпной плотности и текучести исходного порошка представлены в таблице 2.

Таблица 2. Экспериментальное определение насыпной плотности и текучести порошка стали 12X18H10T

Насыпная плотность, г/см ³	Текучесть, с
5,3	3,5

По результатам проведенных исследований выявлено, что порошок стали 12X18H10T имеет высокую текучесть. Это связано с наличием в порошке высокой доли средней фракции, а также с минимальным содержанием мелких и крупных частиц. Присутствие в массе порошка частиц мелкой и крупной фракции из-за наличия адгезии приводит к агломерации частиц. Агломерация возникает вследствие действия сил молекулярного взаимодействия и приводит к снижению скорости прохождения частиц порошка через тонкие элементы сечения (пересыпание и подача порошка в

установках через питатели) вплоть до полного прекращения, а также ухудшаются заполнение объемов и распределение порошка при создании рабочего слоя (рис. 4а). Агломерация часто вызвана влажностью, поэтому представляет собой серьезную проблему для порошков с размером частиц менее 100 мкм, так как между ними возникает мениск (см. рис. 4б), который силами поверхностного натяжения сцепляет частицы между собой. Если размер частиц порошка менее 5 мкм, то такие порошки агломерируются даже в сухом состоянии.

Высокое содержание доли средней фракции (~ 80%), а также сферической формы частиц (~ 90%), способствует большей текучести.

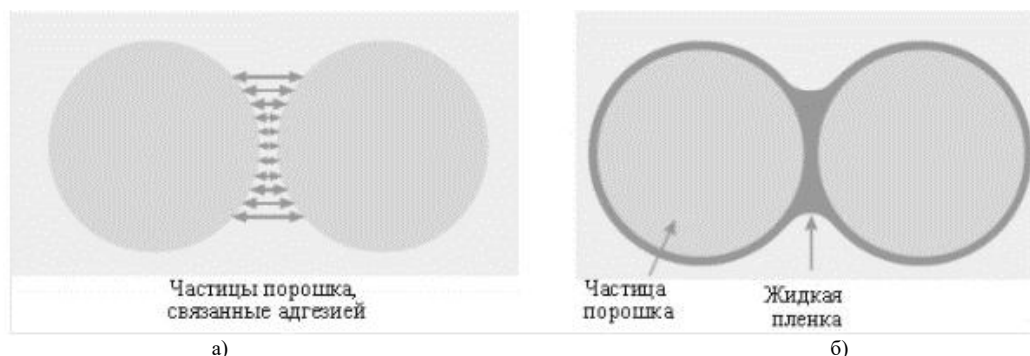


Рис. 4. Взаимодействие частиц: а) межмолекулярное; б) с пленочной влажностью

На основании исследования физико-химических (гранулометрический состав, форма и размеры частиц) и технологических свойств (насыпная плотность, текучесть) можно сделать вывод, что данный порошок может быть использован для отработки оптимального режима сплавления.

По результатам отработки оптимального режима сплавления была изготовлена партия образцов квадратного сечения.

Микроструктура образца с подобранным оптимальным режимом сплавления показана на рис. 5.

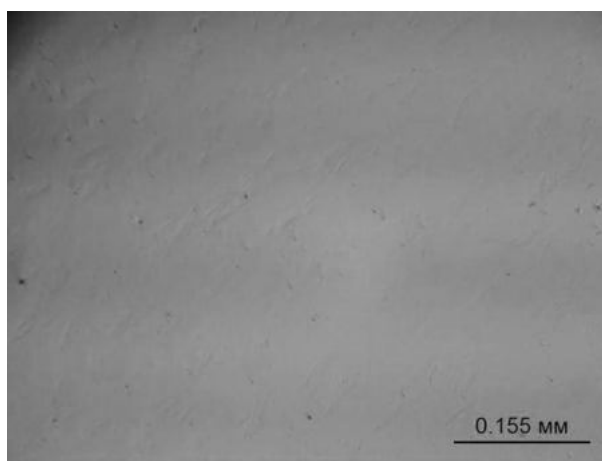


Рис. 5. Микроструктура материала образца стали 12X18H10T

В структуре материала образца отсутствуют дефекты в виде не сплавленных частичек и микротрещин.

Заключение

Исследования физико-химических и технологических свойств порошка стали 12X18H10T показали, что порошок может быть использован для производства изделий методом SLM.

Произведены исследования микроструктуры образцов, полученных методом SLM из стали 12X18H10T.

Исследуемый порошок может быть использован для изготовления образцов на растяжение методом SLM с применением установки М 250. Для проведения сравнительного анализа прочностных характеристик образцов, полученных методом SLM, с образцами из этой стали, полученных традиционными способами.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S/ С. 7-17.
2. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology // Volume Individualized production by means of high power Selective Laser Melting (SLM). Schleifenbaum H., Meiners W., Wissenbach K., Hinke C. Volume 2, Issue 3, 2010, Pages 161-169.

Актуальность работы. Во время эксплуатации металлических изделий часто возникает необходимость выполнить наплавку на поверхности деталей. Сломанный резец, истертая, в процессе эксплуатации детали частично или полностью, кромка, изношенная лопатка газотурбинного двигателя. Эти случаи предполагают восстановление детали с применением наплавки нового прочного слоя металла на изношенный, не пригодный к работе, участок. Данная обработка позволяет не только выполнить восстановление, но и придать детали новые, более ценные свойства. К примеру, выполнив наплавку слоя твердосплавного металла на основное тело детали из низкоуглеродистой стали, можно получить элемент с повышенной износостойкостью или другими эксплуатационными свойствами. При помощи наплавки можно видоизменить геометрию образца, придав ему особенности формы, улучшить поверхностные свойства и поработать над прочностью и износостойкостью.

Наплавка позволяет значительно увеличить срок службы деталей и сократить расходы дефицитных материалов на их изготовление. Часто оказывается, что наиболее целесообразно всё изделие изготавливать из более дешёвого и достаточно работоспособного металла для конкретных условий эксплуатации и только на поверхностях, работающих в особых условиях, иметь необходимый по толщине слой другого материала.

При наплавке поверхностных слоёв с заданными свойствами должен выполняться ряд требований. Это, прежде всего, минимальное перемешивание наплавленного слоя основным металлом, расплавленным при наложении валиков. Поэтому в процессе наплавки необходимо получение наплавленного слоя с минимальным проплавлением основного металла. При наплавке необходимо обеспечить наименьшую зону термического влияния, а также наименьшие остаточные напряжения и деформации. [1]

При традиционных видах наплавки, таких как электродуговая и плазменная, проплавление основного металла и термическое воздействие на него значительны, что является существенным недостатком [2]. Важным критерием является минимальное тепловое воздействие и перемешивание основного материала с присадочным. Лазерная наплавка заключается в локальной подаче присадочного материала и кратковременном расплавлении материала основы. Высокая степень автоматизации управления процессом позволяет регулировать не только размеры расплавленных зон, но и термические циклы процесса.

Отличительными чертами процесса лазерной наплавки являются [3,4]:

- получение бездефектных покрытий с плотной, однородной структурой;
- минимальная зона термического влияния и низкий коэффициент разбавления между основным и присадочным металлами, благодаря чему становится возможным наносить работоспособные функциональные покрытия, которые не теряют своих свойств даже при малой толщине;
- мелкозернистая однородная структура, возникающая в результате высокой скорости затвердевания, положительно сказывается на износостойкости твёрдосплавных покрытий;
- малый объём чистой обработки, за счёт высокой точности получения заготовки близкой к геометрии конечного изделия;
- лучшая свариваемость чувствительных материалов, таких как стали с высоким содержанием углерода или суперсплавы на основе никеля, которые трудно или даже невозможно сваривать с использованием обычных сварочных процессов;
- послесварочная термообработка часто исключается, так как небольшая зона термического влияния сводит к минимуму внутренние напряжения;
- отличная стабильность и воспроизводимость процессов, так как, в основном, они выполняются при использовании роботизированных комплексов;
- возможность ремонта деталей сложной геометрии.

Широкий спектр наплаваемых материалов и возможность производить наплавку малых размеров, делают данную технологию, особенно, подходящей для создания функциональных покрытий [5].

Сравнение основных технологий наплавки представлено в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика различных способов наплавки

Способ наплавки	Производительность, кг/ч	Доля основного металла, %	Толщина наплавленного слоя, мм
Аргондугловая неплавящимся электродом	1 – 7	10 – 30	2,5 – 5
Плазменная порошковая	0,8 – 6	5 – 10	15 – 50
Электронно-лучевая	7 – 18 (при наплавке проволокой)	3 – 5	0,5 – 5
Лазерно-порошковая	до 16	1	0,1 - 11

Цель работы: исследование влияния технологических параметров лазерной порошковой наплавки жаропрочного сплава ПР-ХН52К11МТЮ на образование дефектов (пор, несплавлений, трещин).

В соответствие с целью работы поставлены следующие задачи:

- Исследование исходного материала;
- Наплавка экспериментальных образцов в широком диапазоне режимов;
- Исследование структуры наплавленных слоев.

Методика, материалы и оборудование

В качестве присадочного материала использовали металлический порошок сплава ПР-ХН52К11МТЮ.

Экспериментальные исследования выполнялись на технологической установке лазерной наплавки, на базе иттербиевого волоконного лазера LC-5 фирмы ИРЭ-Полус. Лазерное излучение фокусировали с помощью технологической головки FLW D30 фирмы IPG Photonics. Материал подавался в рабочее пространство при помощи порошкового питателя Suzler Twin 10-C. Для формирования газопорошковой струи использовали коаксиальное наплавочное сопло SO12. Для охлаждения системы применяли чиллер фирмы Riedel. В качестве манипулятора использовали промышленный робот LRM-200iD_14L фирмы Fanuc.

Для определения режимов, обеспечивающих бездефектную структуру наплаваемых образцов, варьировались следующие технологические параметры режима лазерной наплавки: мощность излучения, скорость перемещения, массовый расход порошка, величина вертикального и горизонтального смещений между слоями и валиками, соответственно.

Диапазоны используемых параметров представлены в таблице 2. План эксперимента составлен таким образом, чтобы определить критическое значение погонной энергии, позволяющее получить бездефектные наплавленные слои.

Таблица 2 – Диапазоны исследуемых параметров лазерной наплавки

Диаметр лазерного пятна, мм	Мощность, Вт	Скорость наплавки, мм/с	Расход порошка, г/мин	Смещение по X, мм	Смещение по Z, мм
2,5	1800 – 2200	10 – 30	15,8 – 27,6	1,6	0,6

Наплавленные слои исследовали визуально с использованием измерительных инструментов, а также оптической металлографии.

Результаты исследования.

Для исследований было выполнено две серии экспериментов.

Первый эксперимент состоял из наплавки одиннадцати стенок и служил для определения технологических показателей (в данном эксперименте проведена серия наплавок тонкостенных образцов, шириною в один валик) с целью изучения формирования валиков и проверки устойчивости процесса. Контроль формирования валиков осуществлялся визуальным методом, путем оценки поверхности наплавленного слоя. Устойчивость процесса оценивалась путем многократного наложения валиков друг на друга. При устойчивом процессе формирование крайнего слоя происходит равномерно (отсутствие впадин, горбов).

При проведении эксперимента фиксированными являлись следующие значения: диаметр пятна и вертикальное смещение между слоями. Длина наплаваемого валика - 50 мм, высота - 30 слоёв.

Таблица 3 – Эксперимент 1. Технологические параметры процесса лазерной наплавки стенок из сплава ПР-ХН52К11МТЮ

№ образца	Мощность, Вт	Скорость выращивания, мм/с	Расход порошка, г/мин
1	1800	10	15,8
2	1800	15	18,2
3	1800	20	20,6
4	1800	25	25,3
5	1800	30	27,6
6	2000	20	20,6
7	2000	25	25,3
8	2000	30	27,6
9	2200	20	20,6
10	2200	25	25,3
11	2200	30	27,6

Металлографическое исследование не выявило образования трещин в наплавленных валиках. Однако, как можно увидеть на шлифах (рисунок 1), в образцах присутствует незначительное количество пор малого размера.

Пористость в наплавленных образцах могла возникнуть из-за попадания посторонних газов или из-за проблем в процессе изготовления порошкового материала. В литературе по наплавке сплава ПР-ХН52К11МТЮ о подобных проблемах не сообщалось, а значит можно предположить, что их возникновение связано с методикой проведения эксперимента.

Избавиться от данных проблем можно, в первом случае, проводя наплавку в герметичной камере, заполненной аргоном или увеличивая объем подачи защитного газа из сопла, во втором случае, предварительной сушкой в герметичном сушильном шкафу в течение 3-х часов при температуре 110 °С.

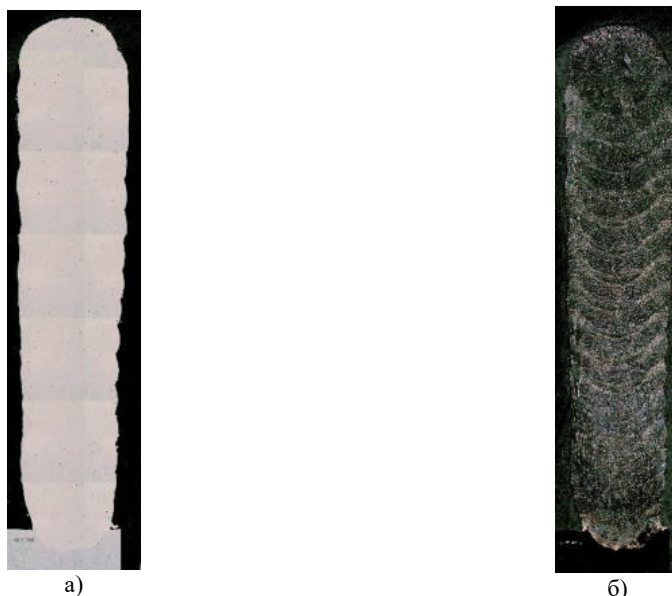


Рисунок 1 – Шлифы образца 1 из сплава ПР-ХН52К11МТЮ: а) – без травления; б) – с травлением

Во втором эксперименте производилась лазерная наплавка толстостенных образцов. Наплавка осуществлялась на тех же режимах, что и тонкостенные образцы (таблица 4). Важным параметром являлась величина горизонтального смещения между валиками, которая была рассчитана и принята для всех образцов постоянной.

Длина наплавляемых образцов 50 мм, высота - 30 слоёв.

Таблица 4 – Эксперимент 2. Технологические параметры процесса лазерной наплавки технологических проб из сплава ПР-ХН52К11МТЮ

№ образца	Мощность, Вт	Скорость выращивания, мм/с	Расход порошка, г/мин	Смещение по X, мм
12	1800	10	15,8	1,6
13	1800	15	18,2	
14	1800	20	20,6	
15	1800	25	25,3	
16	1800	30	27,6	
17	2000	20	20,6	
18	2000	25	25,3	
19	2000	30	27,6	
20	2200	20	20,6	
21	2200	25	25,3	
22	2200	30	27,6	

Металлографическое исследование показало, что у всех образцов отсутствовали несплавления, но все образцы имели пористость, при этом образование рассеянной пористости сменялось возникновением крупных пор. А также, при травлении были выявлены трещины во всех образцах кроме: 12, 13 и 20.

Характерным примером образцов с наличием крупных пор, отсутствием рассеянной пористости и трещин является образец № 12 (рис. 2, а); наличием рассеянной пористости, трещин и отсутствием крупных пор является образец № 16 (рис. 2, б); минимальным размером крупных пор и рассеянной пористости, отсутствием трещин является образец № 20 (рис. 2, в).

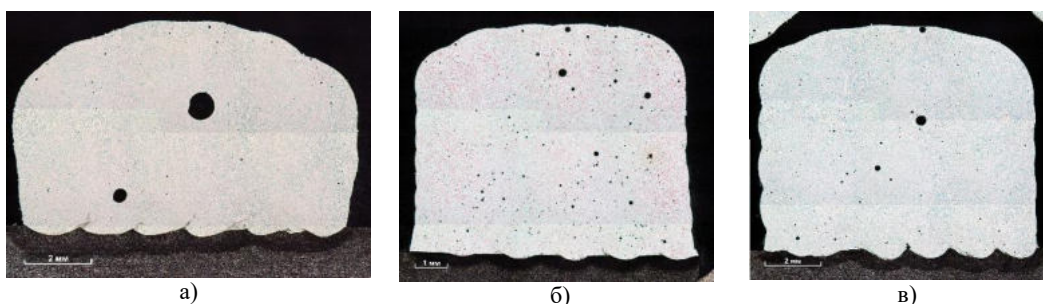


Рисунок 2 – Шлифы образцов сплава ПР-ХН52К11МТЮ: а) – образец 12; б) - образец 16; в) - образец 20

При анализе структуры и режимов наплавленных слоев установлено, что влияние на образование трещин оказывает все основные параметры процесса (мощность, скорость, расход материала), которые можно выразить значением энергии, приходящейся на наплавляемый объем. В таблице 5 представлен расчет энергии, приходящейся на единицу объема материала для каждого режима

Таблица 5 – Расчет погонной энергии

№ образца	Погонная энергия, Дж/мм ³	Наличие трещин
12	120	отсутствует
13	80	отсутствует
14	60	присутствуют
15	48	присутствуют
16	40	присутствуют
17	67	присутствуют
18	53	присутствуют
19	44,	присутствуют
20	73	отсутствует
21	58	присутствуют
22	49	присутствуют

Как видно из таблицы, для минимизации дефектов, погонная энергия при наплавке никелевого суперсплава ПР-ХН52К11МТЮ должна превышать 73 Дж/мм³. Допустимыми для проведения дальнейших экспериментов можно считать режимы 12, 13 и 20. Наиболее предпочтительным режимом для дальнейших исследований выбран режим №20, ввиду повышенной производительности процесса.

Выводы. В результате исследования определено влияния технологических параметров лазерной порошковой наплавки жаропрочного сплава ПР-ХН52К11МТЮ на образование дефектов (пор, несплавлений, трещин). Установлена минимальная погонная энергия, обеспечивающая бездефектную структуру наплавленных слоёв.

Библиографический список

1. Завьялов Виктор Евгеньевич; Иванова Ирина Владимировна; Кобецкой Николай Григорьевич// Технология сварки плавлением: учебное пособие. — 2-е изд., доп..
2. Корсмик Р.С., Туричин Г.А., Климова-Корсмик О.Г., Земляков Е.В., Бабкин К.Д. Лазерная порошковая восстановительная наплавка лопаток газотурбинного двигателя//Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 60-69.
3. Задьякян, Г.Г. Технологические особенности и исследование структуры наплавленных слоев из порошка сплава ЖС32, полученные методом лазерной наплавки / Г.Г. Задьякян, Р. С. Корсмик, С. А. Шальнова // Труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции. - 2018. - № 49
4. Korsmik R.S., Turichin G.A., Babkin K.D. Laser cladding technological machine. Investigation of efficiency of various nozzles design. IOP Conf. Series: Journal of Physics 2017; 857: 012021
5. Yong-Keun Ahna , Hyung-Giun Kima , Hyung-Ki Parka , Gun-Hee Kima , Kyung-Hwan Junga,b , Chang-Woo Leea , Won-Yong Kimc , Sung-Hwan Limd , Byoung-Soo Lee // Mechanical and microstructural characteristics of commercial purity titanium implants fabricated by electron-beam additive manufacturing// KITECH, Republic of Korea// 2016

УДК 531-612

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ НА КАЧЕСТВО ИМИТАЦИИ АКСЕЛЕРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Я. Ю. Миняйло

ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина»

Достоверное восприятие визуальных и вестибулярных сигналов необходимо для пространственной ориентации и управления движениями человека. В повседневной жизни взаимодействие с окружающей средой происходит в основном за счет перемещения по поверхности земли в горизонтальной плоскости (без значительного изменения высоты). При этом благодаря силе тяжести любой человек без нарушений в вестибулярном аппарате точно и безошибочно чувствует так называемую вертикаль. Интерпретация визуальных сигналов из окружающей среды и восприятие вестибулярных сигналов позволяют нам ориентироваться в пространстве, осознавая, где верх и низ, как расположен горизонт, и мы относительно него. Авиация, однако, позволяет человеку-оператору выполнять действия с визуальным управлением, где перемещение происходит не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости. Вследствие дополнительного пространственного измерения высоты в сочетании с потенциальными экстремальными скоростями и ускорениями, условия полета сопряжены с проблемами, которые обычно не возникают в других областях.

Человеку приходится столкнуться со зрительно-вестибулярными иллюзиями. В полете часто возникают условия, при которых затрудняется нормальное функционирование одного или нескольких анализаторов, в результате чего органы чувств человека могут давать искаженную информацию, что приводит к иллюзиям и к дезориентации пилота относительно его положения в пространстве [3]. Нарушение пространственной ориентировки – это ошибочное ощущение летчиком своего пространственного положения и движения относительно плоскости земной поверхности. Иллюзии – процесс ошибочной переработки и анализа впечатлений, не соответствующих реальной действительности [5]. Иллюзии свойственны абсолютно всем людям и не являются заболеванием или нарушением. На сегодняшний день известно порядка 200 иллюзий, которые подразделяются на зрительные, зрительно-вестибулярные, тактильные, ошибки суждения.

Несмотря на физиологические ограничения, пилоты могут принимать необходимые решения с высокой степенью точности. Однако, человеческий фактор по-прежнему имеет первенство в статистике авиационных происшествий, составляя причину в половине всех случаев. На рисунке 1 представлены сравнительные диаграммы количества всех авиационных происшествий по сравнению с авиационными происшествиями по причине человеческого фактора с 2000 по 2020 годы по данным «Бюро архивов авиационных происшествий» [8].

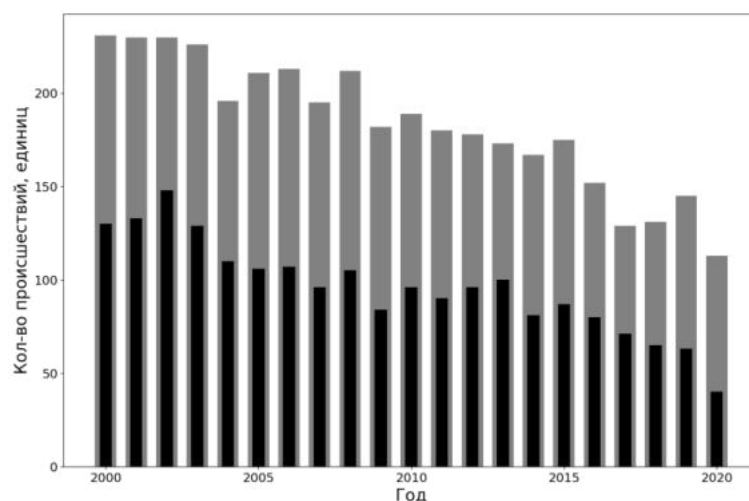


Рис. 1 Сравнительная диаграмма авиационных происшествий с 2000 по 2020 год по данным [8]
Серая диаграмма - все происшествия, черная диаграмма - по причине человеческого фактора.

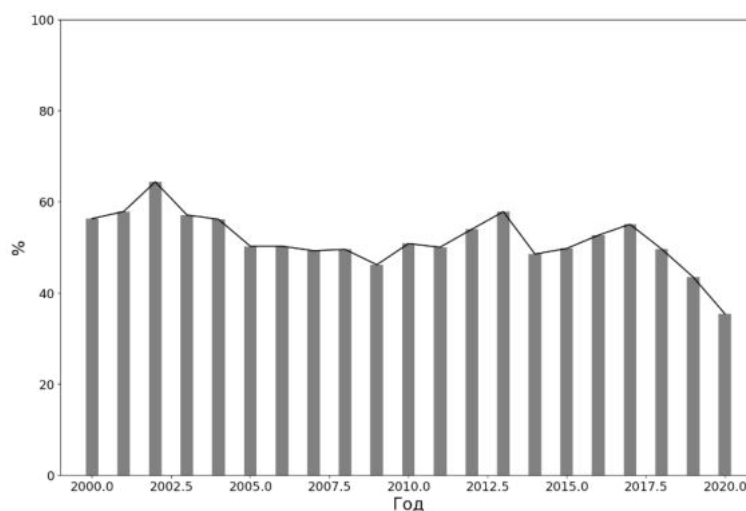


Рис. 2 Процентное соотношение количества авиационных происшествий по причине человеческого фактора к общему числу происшествий с 2000 по 2020 года по данным [8].

Среди авиационных происшествий по причине человеческого фактора нарушения и потеря пространственной ориентировки составляют 5-12%. Среди катастроф этот процент еще выше - 20%. С развитием техники, авиационных тренажеров, методов подготовки и накоплением знаний об особенностях физиологии человека количество авиационных происшествий снижается. В программу подготовки пилотов входит дисциплина “возможности и ограничения человека в лётной деятельности”, в которой большое внимание уделяется полётным иллюзиям [7]. Однако, несмотря на опасность иллюзий в гражданской авиации практически отсутствуют методы и средства обучения пилотов действиям при возникновении иллюзий пространственного положения и движения.

В федеральных авиационных правилах "Требования к тренажерным устройствам имитации полета, применяемым в целях подготовки и контроля профессиональных навыков членов летных экипажей гражданских воздушных судов"[6] указано, во-первых, что имитация акселерационных воздействий на типовом уровне имитации характеристик осуществляется на типах тренажера VI, VII и D, для всех остальных типов тренажеров уровень оценки не требуется. Во-вторых, если мы посмотрим в таблицу оценки тренажеров, то в пункте 3.е таблицы B1 обнаружим, что на указанных типах тренажеров точность воспроизведения акселерационных воздействий “подлежит определению; ...проведение оценки по данному критерию не требуется”. Получается, что адекватной оценки тренажера на качество имитации акселерационных воздействий, из-за которых и возникают чаще всего полётные иллюзии просто не существует. Единственная система объективных оценок качества имитации - тесты системы подвижности на соответствие амплитудно-частотных характеристик акселерационного воздействия техническим требованиям, указанным в руководящем документе о методах квалификационной оценки тренажёрных устройств имитации полёта [6]. Однако данной оценки недостаточно для понимания того, что на самом деле чувствует пилот в тренажере и как это соотносится с ощущениями в реальном полёте.

В связи с озвученной проблемой предлагается в качестве критерия качества имитации акселерационных воздействий оценивать непосредственно физиологические реакции человека на условия полёта, а именно глазодвигательные реакции пилота при выполнении полёта по одинаковым участкам траекторий на реальном самолёте и на тренажёре. В ответ на вестибулярный стимул (движение с ускорением) у человека возникает нистагм - непроизвольные повторяющиеся движения глаз, состоящие из двух фаз: медленное отклонение глаза в одном направлении (медленная фаза) и сменяющий его быстрый возвратный скачок (быстрая фаза)[1], как показано на рисунке 3. Параметры обеих фаз зависят от величин и направлений векторов угловых и линейных ускорений головы.

Отслеживая параметры нистагма во время полёта на тренажерном устройстве и сравнивая их с параметрами нистагма в реальном полёте по той же траектории, мы можем оценить качество имитации акселерационных воздействий.

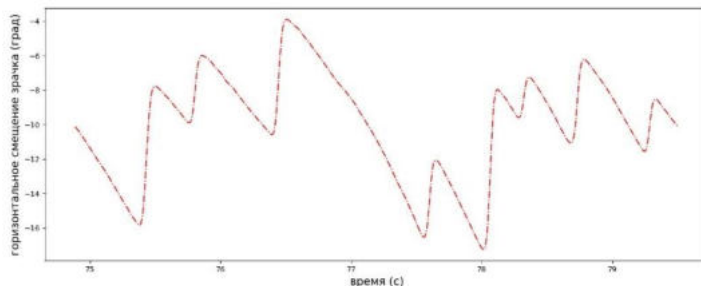


Рис. 3 Оculoграмма горизонтального нистагма

Для отслеживания движения глаз во время полёта предлагается использовать самый распространенный и безопасный на данный момент метод - видеооculoграфию (или айтрекинг). Этот метод также широко применяется для оценки деятельности экипажа во время полёта [2][4]. При сравнении данных, полученных при помощи оculoграфа Otometrics ICS Impulse при проведении экспериментов на имитационных стендах, оборудованных системой подвижности [3] и в полётах по программе экспериментов в рамках НЦМУ "Сверхзвук" обнаружена идентичность саккад при выполнении наклона до 27° по углу крена с угловым ускорением до $0,084 \text{ рад/с}^2$ для перехода от горизонтального полёта к координированному развороту (индикатор скольжения находится в нейтральном положении), но изменение характера саккад при выполнении самого разворота в реальном полёте и практически полное их отсутствие при имитации этого разворота на стенде.

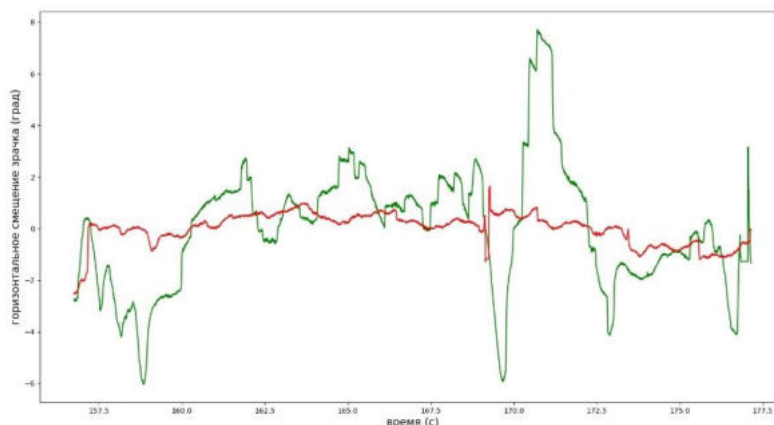


Рис. 3 Сравнение оculoграмм реального полёта (зеленая линия) и имитационного полёта (красная линия) по одинаковым программам

Так как сбор данных об акселерационном воздействии на экипаж при моделировании сложных и аварийных ситуаций на пассажирском авиалайнере связан с высоким риском повреждения воздушного судна, для обеспечения безопасности сбор данных производится на борту пилотажных самолётов с максимально точным воспроизведением траектории движения маломаневренного самолёта при сохранении значительного запаса по параметрам управляемости и высоты для вывода. Проведённое исследование показывает возможность создания системы объективной оценки средств имитации, основываясь на модели глазодвигательного отклика на стимуляцию вестибулярного аппарата и применении современных технических средств его измерения.

Библиографический список

1. Боков Т.Ю., Сучалкина А.Ф., Якушева Е.В., Якушев А.Г., "Математическое моделирование вестибулярного нистагма. Часть I. Статистическая модель", Российский журнал биомеханики (2014), 18:1, 48–64
2. Волков А.К., Ионов В.В., Совершенствование организации профессиональной подготовки операторов досмотра с применением системы регистрации движения глаз и методов кластерного и дискриминантного анализа // Научный Вестник МГТУ ГА Том 21, No 03, 2018 С 25-36.
3. Коваленко П. А., Пономаренко В. А., Чунтул А. В. Учение об иллюзиях полета: Основы авиационной делиологии// 2007. С. 461.
4. Куравский Л.С. Мармалюк П.А. Юрьев Г.А. Беляева О.Б. Прокопьева О.Ю. Диагностика лётного состава по результатам работы на авиационных тренажерах //Экспериментальная психология Том. 9, № 3, 2016. С. 118–137.
5. Усманов И.А., Левищев П.А. ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЛЕТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. ПОТЕРЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТИРОВКИ. ЛЁТНЫЕ ИЛЛЮЗИИ //Актуальные проблемы авиации и космонавтики, 2017. С. 214 – 215.
6. Федеральные авиационные правила "Требования к тренажерным устройствам имитации полета, применяемым в целях подготовки и контроля профессиональных навыков членов летных экипажей гражданских воздушных судов" [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов; URL: <https://docs.cntd.ru/document/561232560?marker=7DU0KE> (дата обращения: 31.03.2022).
7. Фонд тестовых и контрольных заданий для оценки остаточных знаний по дисциплине "Возможности и ограничения человека в летной деятельности" // ФГБОУ ВПО "СПбГУ ГА" Санкт-Петербург, 2014. С. 4-5.
8. Bureau of Aircraft Accidents Archives [Электронный ресурс] // <https://www.baaa-acro.com/> (дата обращения: 31.03.2022).

МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТАЛИ «РАМА» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

И. Старовойтов, А.С. Александров, Д.В. Васильков

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

В настоящее время актуальными являются разработки технологических процессов, соответствующих современным тенденциям в области машиностроения. Определенные в технологическом процессе оборудование, режущий инструмент, оснастка и технологические режимы должны обеспечивать требования по качеству изготовления деталей на предварительно настроенном станке.

Для решения данной задачи необходимо построить динамическую модель технологической системы механической обработки. Выбор структуры динамической модели в значительной степени определяют собственные частоты и формы колебаний детали.

К числу параметров динамической системы можно отнести следующие: собственные частоты колебаний в динамических контурах модели в направлении обобщенных координат; приведенные к формообразующей точке в зоне резания коэффициенты инерции, жесткости и диссипации в динамических контура. Представленные параметры динамической системы для исследуемого изделия практически любой конфигурации определяются методом модального анализа, который представляет собой исследование динамических свойств системы в частотной области. Модальный анализ проводится для определения частот и форм (мод) собственных колебаний изделия и связанных с ними параметров [1]. Наиболее распространенной платформой для выполнения модального анализа является универсальная программная система конечно-элементного анализа ANSYS.

Решение задачи модального анализа особенно актуально при моделировании механической обработки маложестких тонкостенных деталей. Определяющей особенностью при моделировании обработки таких изделий является доминирование подсистемы заготовки по отношению к подсистеме режущего инструмента [2]. Указанное определяет направленность формирования структуры динамической модели, которая в пространстве определяется обобщенными координатами подсистемы заготовки.

Учет контактных взаимодействий дает возможность моделировать взаимодействие тел в процессе деформирования и, следовательно, более точно определять компоненты напряженно-деформированного состояния. Контактные задачи являются нелинейными, следовательно, более трудными для решения. Система ANSYS имеет богатый набор средств решения разнообразных контактных задач [1]. Трехмерная модель рассматриваемой детали представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Внешний вид детали

После включения геометрии детали в модуль Modal программы ANSYS в разделе Geometry можно визуализировать её объём и массу, а также количество полученных в результате создания сетки узлов и элементов (Nodes и Elements соответственно) (рис. 2):

Details of "Geometry"	
Properties	
Volume	6,6252e-005 m ³
Mass	0,52008 kg
Scale Factor Va...	1,
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	129792
Elements	78936
Mesh Metric	None

Рис. 2. Характеристики детали (объём, масса, кол-во элементов и узлов)

Как уже сказано ранее, производится разделение модели на конечные элементы посредством создания сетки. Инструмент для создания структурированной сетки появился уже очень давно. Он доступен в группе инструментов «Mesh Control» меню управления сеткой, которое появляется, если находиться на этапе «Mesh» дерева построения

модели. Его также можно вызвать из контекстного меню (Insert-> Face Meshing). В случае простой геометрии, а в некоторых случаях - сложной можно применить этот инструмент для грани (или нескольких граней), не задавая никаких дополнительных настроек, и ANSYS построит структурированную сетку. [3]. Далее приступаем к работе уже непосредственно в модуле Modal, где задаём начальные данные – интервал поиска собственных частот до 1 ГГц и количество форм колебаний – 6 (рис. 3).

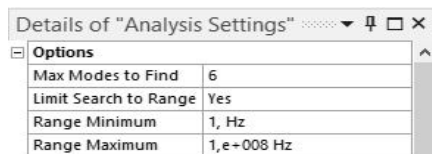


Рис. 3. Информация о настройках анализа

После запуска задачи на расчёт Ansys Mechanical автоматически формирует файл с командами на языке, который используется решателем Ansys Mechanical APDL. По завершении расчетов программой представляется дерево в виде искомым шести форм колебаний. В графическом окне отображается деформированная форма рамы, соответствующая собственной частоте с номером, указанным в панели параметров Details of «Total Deformation». При изготовлении данной детали определяющим является растачивание отверстия большого диаметра на фрезерном вертикальном обрабатывающем центре. Поэтому для большей наглядности форм колебаний ориентируем модель так, как она располагается на станке. При модальном анализе модель является свободной без учета ограничений, связанных с закреплением на станке.

Значения всех найденных собственных частот детали приведены в панели табличных данных (рис. 4). Для просмотра форм собственных колебаний (рис. 5-10) удобно использовать средства анимации, встроенные в комплекс.



Рис. 4. Панель табличных данных

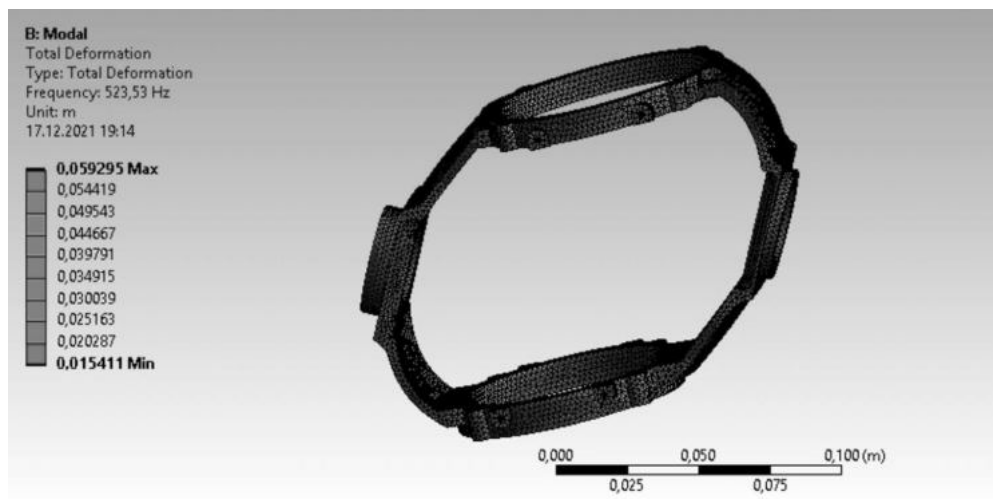


Рис. 5. Анимация первой формы собственных колебаний

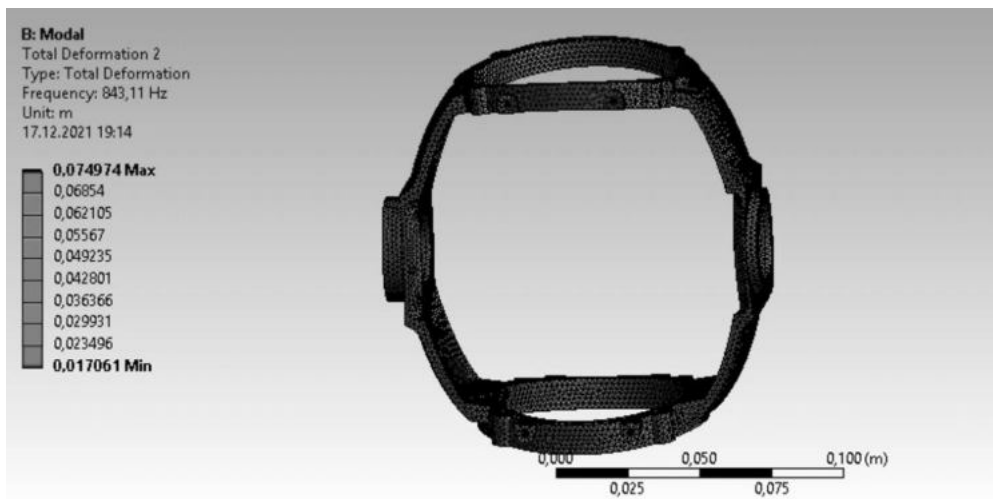


Рис. 6. Анимация второй формы собственных колебаний

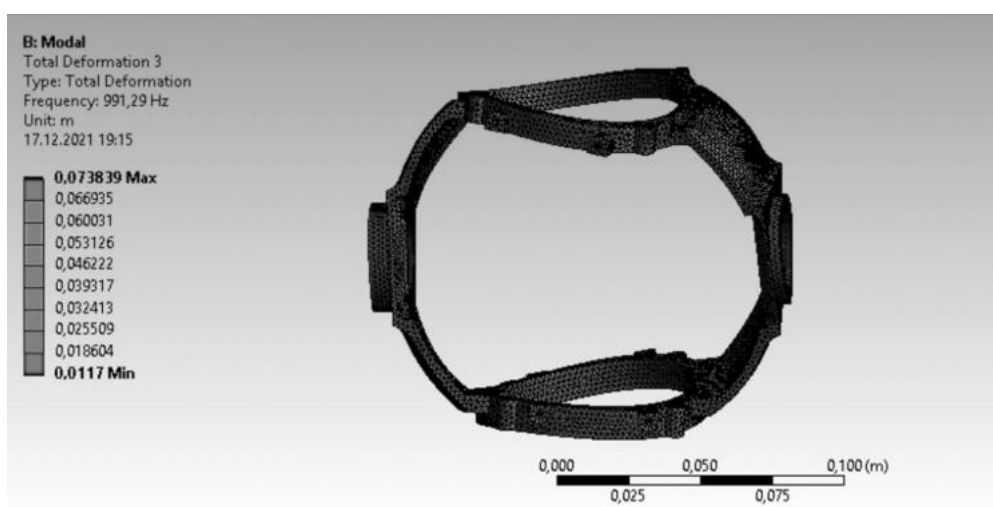


Рис. 7. Анимация третьей формы собственных колебаний

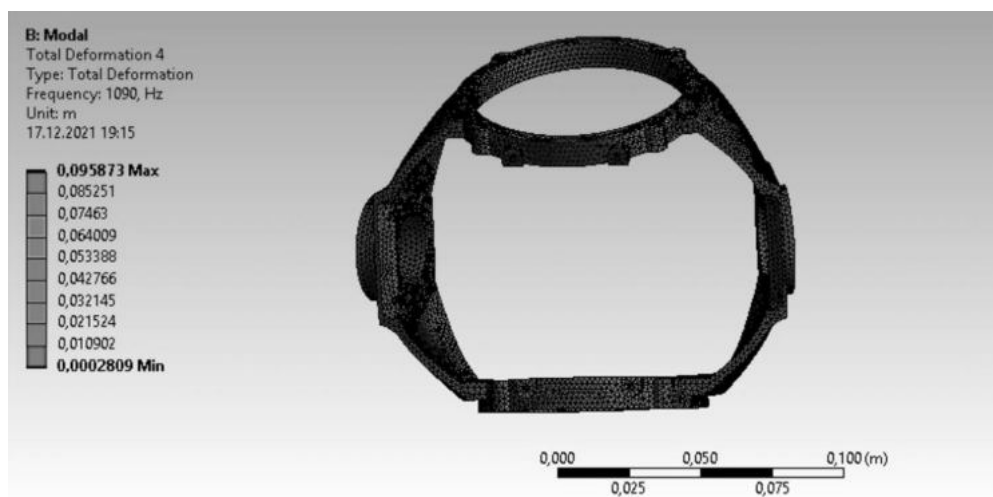


Рис. 8. Анимация четвертой формы собственных колебаний

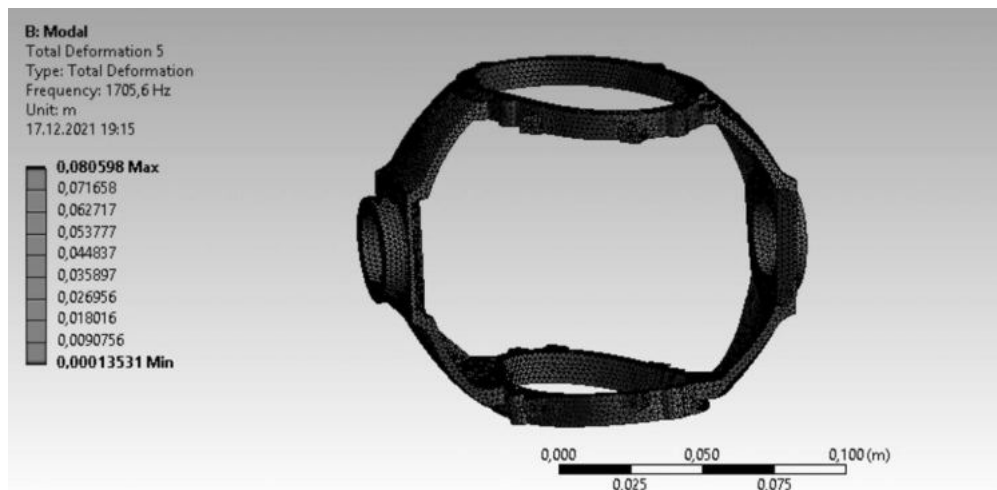


Рис. 9. Анимация пятой формы собственных колебаний

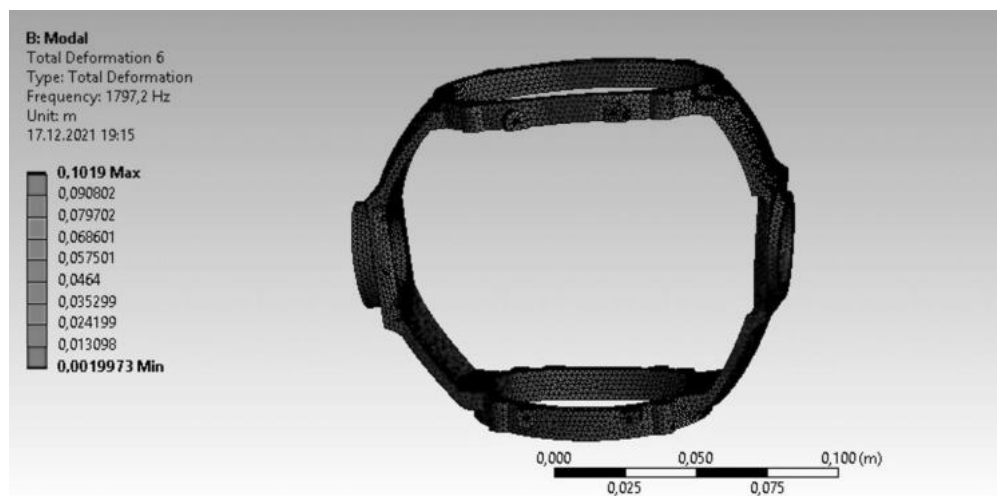


Рис. 10. Анимация шестой формы собственных колебаний

Рассмотрим результаты модального анализа:

Из рис. 5 можно наблюдать, что нижняя цилиндрическая часть рассматриваемой детали остаётся недеформированной. Верхняя часть подвергается исключительно изгибным колебаниям в направлении оси y . Данная форма колебаний осуществляется на частоте $f_1=524$ Гц, и ее легче всего возбудить – как правило, при колебаниях возбуждается главная форма (первая).

При обработке расточная головка вращается и происходит обработка – растачивание. Предположим, что число оборотов равно 600 об/мин, тогда частота будет равна $62,8 \text{ 1/с} = 10$ Гц, отсюда следует, что частота вращения инструмента – 10 Гц, а первая форма колебаний имеет частоту 523 Гц. То есть, процесс вращения инструмента по отношению к частотным характеристикам системы можно рассматривать, как квазистатический. При этом можно «замораживать» коэффициенты, связанные с составляющими силы резания.

Вторая форма колебаний происходит на частоте $f_2=823$ Гц в вертикальной плоскости в направлении оси z . В отличие от предыдущего случая, где они протекали в горизонтальной, верхняя цилиндрическая часть по отношению к нижней находится в вертикальной плоскости. Колебания осуществляются вдоль оси обрабатываемого отверстия, что дополнительно улучшает качество поверхности при обработке и забирает часть энергии, которая может перекачиваться в направлении первой формы колебаний. Данный факт был зафиксирован экспериментально и описан как принцип координатной связи в работах Кудинова В.А. [4] и Тлустого И [5]. На основе данного принципа построен ряд модельных решений, в которых сила резания представлена в форме динамической характеристики [2, 4].

Начиная с третьей формы колебаний на частотах $f_3=991$ Гц, $f_4=1090$ Гц, $f_5=1706$ Гц, $f_6=1797$ Гц преобладают изгибно-крутильные колебания с искажением формы обрабатываемого отверстия. Поскольку исследования проводятся на свободной детали, необходимо обратить внимание на то, что геометрия основания на данных формах искажается. С учетом закрепления собственные частоты $f_3 \dots f_6$ возрастут в 1,4 ... 1,8 раз. При значимых амплитудах колебаний на данных формах требования по точности изготовления отверстия выполнить невозможно. При назначении технологических режимов уровень колебаний на данных частотах должен быть резко ограничен. Этому способствует тот факт, что энергетически данные формы колебаний достаточно сложно.

В результате выполненного модального анализа можно сформировать конфигурацию динамической модели технологической системы в форме плоской модели с двумя обобщенными ортогональными координатами y, z с парциальными частотами $f_y=f_1=524$ Гц и $f_z=f_2=823$ Гц. Параметры модели формируются на основе упруго-

диссипативных и инерционных характеристик подсистемы заготовки. Автономизация модели реализуется на основе динамической характеристики резания в форме аperiodического звена с отрицательной обратной связью по координатам и скоростям модели.

Библиографический список

1. Леонтьев Н.В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». Нижний Новгород, 2006, 101 с.
2. Васильков Д.В., Кочина Т.Б. Теория и методы исследования контактных взаимодействий в технологических машинах на основе реологических представлений. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. - 179 с.
3. Построение структурированной сетки в ANSYS Workbench [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.liveinternet.ru/users/softenukraine/post435878269/> (дата обращения: 18.12.2021).
4. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
5. Тлустый И. Автоколебания в металлорежущих станках / Пер. с чешск. М.: Машгиз, 1956. 395 с.

УДК 621.763

МОДЕРНИЗАЦИЯ АВИАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

М. В. Плискин, В. К. Лебитков, В. Э. Юденков

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

Проблема снижения веса конструкции летательного аппарата (ЛА) при сохранении функционала и эксплуатационных показателей является ключевой во всей авиастроительной отрасли. Даже небольшое снижение массы позволяет ощутимо поднять экономичность и улучшить летные характеристики. В этих условиях каждая деталь летательного аппарата должна быть тщательно исследована и оптимизирована.

Существенную долю массы ЛА составляет вес корпусов различных агрегатов. До недавнего времени многие корпуса могли изготавливаться только литьем, что накладывало значительные ограничения на проектирование этих деталей, не позволяя должным образом оптимизировать их конструкцию. Однако прогресс не стоит на месте, и сегодня становятся доступны новые способы изготовления. Одним из перспективных направлений являются аддитивные технологии.

Представленное исследование направлено на модернизацию поршневого четырехступенчатого авиационного компрессора по средствам применения аддитивных технологий в изготовлении его корпуса.

Основной целью данной работы является разработка оптимизированной конструкции корпуса компрессора, которая будет существенно легче и дешевле в производстве по сравнению с первоначальной.

Четырехступенчатый поршневой компрессор высокого давления содержит корпус с четырьмя цилиндрами и механизм движения. Цилиндры располагаются веерообразно в горизонтальной плоскости под углом 90° друг к другу. Механизм движения находится внутри корпуса и состоит из горизонтально установленного в коренных подшипниках коленчатого вала, соединенного приводными шатунами с расположенными в цилиндрах поршнями. Общий вид компрессора представлен на рисунке 1.

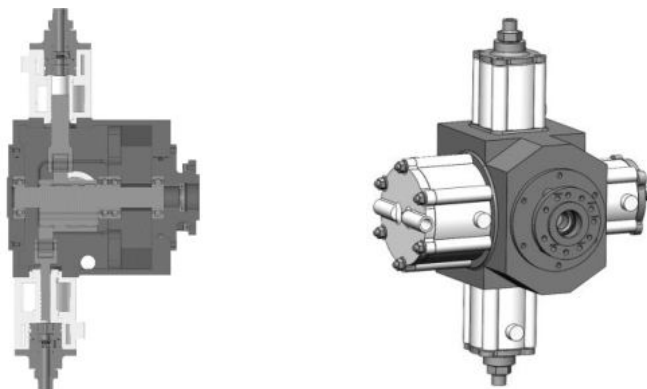


Рис. 1. Общий вид и сечение поршневого компрессора

Наиболее тяжелой деталью компрессора является картер. Он выполнен из коррозионностойкой нержавеющей стали AISI 316. Вес детали составляет 11,6 килограмма, что равно примерно тридцати трём процентам от общей массы устройства.

Данная деталь крайне важна для всей конструкции компрессора, так как воспринимает все нагрузки, возникающие во время работы. Также она образует масляную полость и защищая движущийся механизм от повреждения и загрязнения. В процессе создания корпуса важно выдержать баланс между его прочностными и массовыми характеристиками, избежать излишней массивности и обеспечить требуемый запас прочности.

Компрессор работает следующим образом. Коленчатый вал при вращении в подшипниках с помощью шатунов сообщает поступательное движение поршням первой, второй, третьей, четвертой ступеней соответственно. Атмосферный воздух поступает на всасывание первой ступени компрессора. Воздух сжимается в цилиндре первой ступени поршнем первой ступени, после чего через комбинированный клапан выходит в полость нагнетания, далее воздух последовательно проходит еще три ступени, после чего через комбинированный клапан, выходит в полость нагнетания.

Деталь корпуса является наиболее массивной частью всей конструкции компрессора и представляет собой толстостенный элемент с множеством технологических отверстий, которые при оптимизации геометрии не должны менять свое расположение относительно друг друга. Данная деталь изготавливается методом литья с последующей обработкой посадочных поверхностей. Модель корпуса компрессора и ее разрез представлены на рисунках 2.

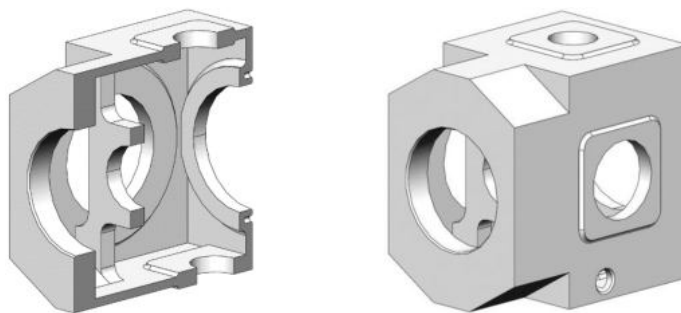


Рис. 2. Общий вид и сечения корпуса компрессора

Технология литья давно освоена на производстве и имеет свои преимущества, однако она так же обладает и рядом недостатков, не позволяющих создать высокотехнологичную и оптимизированную конструкцию. Основными недостатками литья являются:

- трудность выполнения отливок со сложными полостями,
- использование больших производственных площадей и энергоемкого технологического и подъемно-транспортного оборудования,
- сложность, иногда невозможность изготовления мелких, тонкостенных отливок,
- неудовлетворительные условия труда [1].

В момент создания компрессора литьё было наиболее выгодным способом производства корпусов. Поэтому конструкция картера была разработана с учетом ограничений, которые накладывает эта технология, что привело к большому весу детали и избыточному запасу прочности.

На данный момент в мире активно развиваются аддитивные технологии. Они позволяют оптимально использовать материал, и без создания какой-либо оснастки создавать изделия сложной формы. Использование аддитивных технологий открывает большой простор для конструкторов, снимая ряд ограничений, наложенных традиционными технологическими процессами.

Аддитивное производство (АП) – это процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки) [2].

Процесс синтеза на подложке - процесс аддитивного производства, в котором поверхность предварительно нанесенного слоя порошкового материала выборочно, полностью или частично расплавляется тепловой энергией [3].

Для изготовления картера будет использоваться метод селективного лазерного сплавления (Selective Laser Melting).

Selective Laser Melting (SLM) – технологический процесс селективного лазерного сплавления металлических порошков, способствующий образованию высокопрочных объектов различных размеров. Данный метод является одним из самых распространенных методов 3D-печати металлом. Он позволяет изготавливать детали сложной геометрической формы, которые по своим качествам практически не будут уступать деталям, изготовленным традиционными способами.

Аддитивные технологии обладают рядом преимуществ, среди них:

- значительное повышение конструктивной сложности изделия,
- применение аддитивных технологий позволит увеличить коэффициент использования материалов, по сравнению с традиционным производством, что значительно снижает,
- сокращение технологического цикла и снижение издержек на подготовку производства.,
- высокая гибкость технологий аддитивного формообразования в сравнении с традиционными технологиями.

При проектировании изделия необходимо учесть некоторые технологические ограничения, которые накладывают аддитивные технологии.

Основное ограничение — необходимость установки поддерживающих структур под нависающие поверхности. Максимальный угол наклона поверхности к горизонтали, при котором не требуется использование поддерживающих структур, составляет 45°.

При изготовлении деталей методом SLM необходимо учесть ограничение на минимальную толщину стенки, связанное с диаметром лазерного луча в фокусе, размером частиц металлического порошка и наклоном стенки к оси построения.

К технологическим ограничениям аддитивных технологий, кроме перечисленных выше, относят: высокую шероховатость поверхностей изделия, необходимость удаления порошка из внутренних полостей, постобработку места крепления детали к платформе, остаточные напряжения и паразитный рост массы [4, 5, 6].

Аддитивные технологические процессы открывают новые возможности в проектировании конструкций свободной формы, позволяя создавать сетчатые конструкций. Получаемые сетчатые структуры имеют преимущество по массе по сравнению со сплошными, сохраняя при этом высокую прочность.

Благодаря имеющемуся данным о давлениях в цилиндрах можно провести расчет сил реакции в опорах. Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Исходные данные для расчета

	Давление, МПа	Диаметр, мм	Площадь поршня, мм ²
Цилиндр 1 ступени	0,4	75	4418
Цилиндр 2 ступени	1,4	40	1257
Цилиндр 3 ступени	4,8	22	380
Цилиндр 4 ступени	17,5	12	113

Наибольшее воздействие корпус воспринимает, когда один из поршней находится в крайнем положении. Крайним положением считается положение поршня, погруженного в цилиндр на максимальное расстояние. В этом положении на него будет действовать наибольшее давление газа, и это воздействие он будет передавать через вал на опоры.

На поршень действует сила P . Обозначим силу реакции, возникающую в левой опоре, как P_A . А силу реакции, возникающую в центральной опоре P_B . Схему приложения сил можно увидеть на рисунке 4. Расстояние от левой опоры до оси поршня обозначается a . Расстояние от центральной опоры до оси поршня — b .

Расчетная модель представлена на рисунке 3.

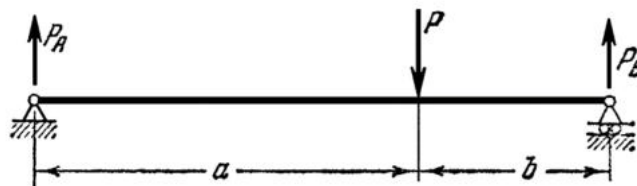


Рис. 3. Расчетная модель

В таблицах 2, 3 представлены результаты ручного расчета значения сил, действующих на опоры и на места крепления цилиндров к корпусу. Расчет проводился для каждого из четырех случаев, когда один из поршней находится на наибольшем отдалении от вала.

Таблица 2 — Исходные данные для расчета

	Силы действующие на опоры			
	В крайнем положении			
	Поршень 1	Поршень 2	Поршень 3	Поршень 4
P_A , Н	461	730	1037	1428
P_B , Н	1307	1030	787	549

Таблица 3 — Исходные данные для расчета

	Силы действующие на места крепления цилиндров			
	В крайнем положении			
	Поршень 1	Поршень 2	Поршень 3	Поршень 4
Н	1768	1760	1824	1978

Зная все силы, действующие на корпус компрессора, появляется возможность провести расчет возникающих напряжений. Расчет проводился в программе SOLIDWORKS Simulation и учитывал силы, передаваемые через вал на опоры, и силы, действующие в местах крепления цилиндров.

В результате расчета удалось получить эпюры напряжений, возникающих в детали, для широкого спектра положений поршней. Анализ полученных данных показал, что максимальные значения напряжений возникают в корпусе компрессора, когда в крайних положениях находятся поршни первой или четвертой ступени. Наибольшие нагрузки наблюдаются в местах крепления цилиндров к корпусу. Максимальные напряжения ни в одном из расчетных случаев не превысили отметку 19 МПа, что на 80% ниже предела текучести материала. Этот факт демонстрирует большой запас прочности, заложенный в конструкции, и открывает широкие возможности для снижения веса и оптимизации изделия.

Аддитивные технологии позволяют изготовить деталь картера, не внося каких-либо изменений в ее геометрию. Однако, при печати потребуется значительный объем поддерживающих структур, из-за большого количества нависающих поверхностей в исходной геометрии корпуса. На поддержки тратится большое количество металлического порошка и возникает необходимость их удаления после окончания процесса синтеза. Всё это негативно сказывается на итоговой стоимости изделия.

Путем снижения затрат на производства может стать изменение геометрии корпуса компрессора. Это изменение не должно затронуть посадочные поверхности и прочностные свойства изделия, однако количество необходимых при печати поддержек будет значительно снижено.

На рисунке 4 представлены общий вид и разрез модели корпуса компрессора, полученный после проведения адаптации под аддитивное производство. Были учтены ограничения, которые накладывает это технология, а количество необходимых поддержек сведено к минимуму.

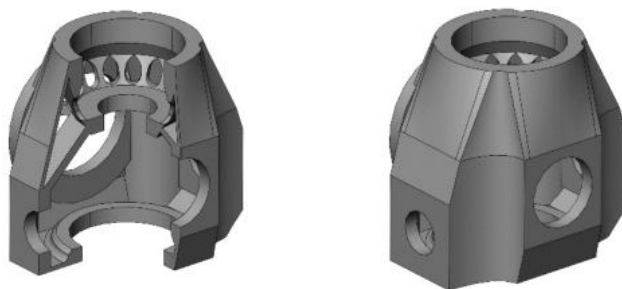


Рис. 4. Общий вид и сечения адаптированного под 3D-печать корпуса компрессора

Для адаптированной геометрии картера был проведен расчет максимальных напряжений в программе SOLIDWORKS Simulation. Анализ полученных эпюр показал, что максимальные напряжения не превышают 15 МПа, что сильно ниже предела текучести используемого материала. Этот факт позволяет оптимизировать геометрию корпуса и ощутимо снизить его массу, сохранив при этом требуемые прочностные характеристики.

Оптимизация проводилась при помощи программы Altair Inspire. Для каждого из четырех случаев положения поршней были получены оптимизированные модели корпуса, которые представлены на рисунке 5.

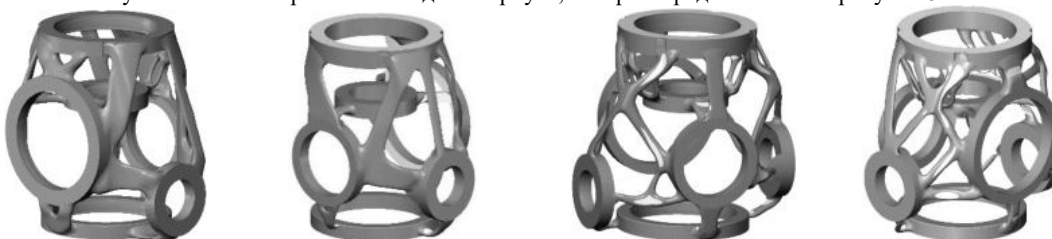


Рис. 5. Оптимизированные модели корпуса компрессора

Геометрии корпуса, полученные после оптимизации, были объединены в одну единую модель. Тем самым получился каркас (рисунок 6), который воспринимает все нагрузки, возникающие в процессе работы компрессора.



Рис. 6. Силовой каркас

В дальнейшем полученная модель должна быть объединена с полученной ранее адаптированной моделью (Рисунок 4). Все непересекающиеся части у этих двух моделей будут частично заменены на сетчатые структуры. Это позволит сохранить герметичность масляной полости, защитить внутренний механизм и добиться требуемой жесткости всей детали. При этом общая масса картера, при введении сетчатой структуры, возрастет не существенно.

В работе были рассчитаны основные нагрузки, действующие на корпус компрессора, и возникающие, под их действием, напряжения. Эти данные были использованы для адаптации геометрии картера под аддитивное производство и её дальнейшей оптимизации. В итоге, полученная модель корпуса оказалась легче начальной массы детали на 35%, вес снизился с 11,6 кг до 7,5 кг. При этом были сохранены эксплуатационные и требуемые прочностные свойства.

Библиографический список

1. Чуркин, Б.С. Технология литейного производства: Учебник/ Б.С. Чуркин –Екатеринбург: Изд. Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2000 – 662 с.
2. ГОСТ Р 57589–2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения.
3. ГОСТ Р 57589-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы - часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования.
4. Исследование влияния режимов селективного лазерного сплавления на качество заготовок: метод. указ. / сост. А.В. Агаповичев, А.В. Сотов, В.Г. Смелов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 32 с
5. On the effect of internal channels and surface roughness on the high-cycle fatigue performance of Ti-6Al-4V processed by SLM / J. Günther, S. Leuders, P. Koppa, T. Tröster, S. Henkel, H. Biermann, T. Niendorf // Materials & Designvol. 2018. 143. P. 1–11.
6. Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life / B. Vayssette, N. Saintier, C. Brugger, M. Elmay, E. Pessard // Procedia Engineering. 2018. Vol. 213. P. 89–97.

УДК 62-45

НАНОМЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОЁМКОСТНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Г. Э. Маилян, А. А. Мелехин, И. А. Новиков

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

1 Введение. В области современной авиационной и ракетной техники широко применяются различные методы нанотехнологий, дающие возможности улучшить прочностные и трибологические характеристики деталей и узлов техники. Однако при реализации нанотехнологий в промышленных условиях возникают вопросы неразрушающих измерений и контроля качества наносимых нанопокровтий, которые сейчас практически отсутствуют. Предлагаемая модификация известного электроёмкостного метода позволяет использовать его для наноизмерений в промышленности.

В настоящее время устанавливаются четыре категории продукции наноиндустрии [1]: «А» – первичная нанотехнологичная продукция (наночастицы, нанопористые материалы, нанопорошки и др.); «Б» – наносодержащая продукция, в составе которой наноконпоненты, которые придают ей новые, принципиально важные для неё функциональные свойства (покрытия, ткани, волокна, чипы, оптические компоненты и др.); «В» – товары (услуги), при производстве (оказании) которых используются нанотехнологии и (или) наноконпоненты (авиация и ракетостроение, электроника, фармацевтика, автомобилестроение, продукты питания и др.); «Г» – специальное оборудование для нанотехнологий, инструменты (микроскопы, оборудование для литографической печати и др.). Применение продукции наноиндустрии производственными организациями направлено на расширение возможностей производимых ими изделий для достижения ранее невозможных технико-экономических показателей. Согласно такой тенденции, широкое применение в технике находит нанопродукция первого уровня из категорий «Б, В» – пассивные нанопокртыя толщиной от 0,5 нм до 200 нм, повышающие прочностные, антикоррозионные и антифрикционные свойства изделий [1,2]. Структура, состав и технология нанесения нанопокртыя могут быть различными. Одним из факторов, сдерживающих развитие и использование технологий нанесения нанопокртыя, является отсутствие надёжного оборудования и средств измерения, применимых для наноиндустрии. Толщину нанопокртыя контролируют с помощью разрушающих и неразрушающих методов и средств измерений. Применение неразрушающих методов контроля зависит от вида нанопокртыя и материала изделия. Существующие средства измерений для нанометрологии могут обладать требуемыми разрешающей способностью и точностью измерений толщины нанопокртыя в диапазоне от 0,5 до 200 нм, но их стоимость чрезвычайно высокая, а применение возможно только первоклассными специалистами в лабораторных условиях. Таким образом, использование существующих методов и средств нанометрологического обеспечения невозможно в условиях реального производства. Не менее важным является возможность применения методов и средств измерений к нанопокртыям, нанесённым на изделия с криволинейной поверхностью.

Приоритетное направление нынешней наноиндустрии – это применение разнообразных функциональных нанопокртыя толщиной от 4 нм до 200 нм [1,2]. В современной технике активно используются диэлектрические плёнки нанометровой толщины, которые наносят на поверхности металлических изделий. Так, для спутников различного назначения применяются нанопокртыя из фторорганических полимеров, на основе которых появились антифрикционные и защитные композиции. Такие нанопокртыя используются для существенного увеличения ресурса деталей в машиностроении, а также для элементов микроэлектроники [3]. В настоящее время нанесение покртыя на основе фторированных поверхностно-активных веществ (фтор ПАВ) переживает второе рождение, что связано с улучшением существующих технологий нанесения нанопокртыя, а также с появлением новых технологий их нанесения [3,4]. Фтор ПАВ нанопокртыя зарекомендовали себя как метод повышения надёжности и долговечности машин, станков, инструментов, технологической оснастки, рабочих поверхностей пар трения [4]. Закрепление нанопокртыя происходит в результате хемосорбции, позволяющей получать монослой толщиной от 4 нм до 10 нм из нормально ориентированных к поверхности молекул фтор ПАВ с высокой адгезионной прочностью. Последующие слои молекул связываются когезионным взаимодействием. Такие нанослои плёнки позволяют снижать трение при контакте с поверхностью, выполненной из любого материала [2]. Для разных задач используются одно- и многомолекулярные слои, например, для повышения эффективности металлообрабатывающего инструмента, узлов трения и скольжения различных машин и механизмов [3,4].

Внедрение таких нанопокртыя в производство невозможно без выполнения задач без усовершенствования технологии нанесения нанопокртыя из фтор ПАВ на изделия в условиях производства, имеющих как прямолинейную, так и криволинейную поверхность; и оценки качества нанесённого нанопокртыя, а также его эффективности при эксплуатации. Для решения перечисленных задач необходимо иметь методы и средства нанометрологии, которые могли бы применяться не только в лабораторных условиях, но и в технологических процессах изготовления и контроля нанопродукции.

Удовлетворить все эти требования одновременно затруднительно. Все существующие методы и средства измерений работают исключительно в специализированных помещениях, требующих сверхдорогого оборудования, высококлассного персонала, невероятного труда и больших временных затрат. Для преодоления вышеперечисленных недостатков развит электроёмкостный метод (ЭЕМ) с жидкометаллическим (ЖМ) электродом, который обеспечивает возможность своего применения для нанометрологии в промышленности.

Разработана электрофизическая модель измерительной ячейки с ЖМ электродом, составлена электрическая схема измерений, получены формулы, оценивающие точность проводимых измерений, а также позволяющие рассчитать толщину диэлектрического нанопокртыя. Предложенный ЭЕМ практически реализован в виде измерительного стенда. На нем проведена серия измерений для фтор ПАВ нанопокртыя (диэлектрической плёнки). Кроме того, проведены измерения толщины этой фтор ПАВ нанопленки с помощью прибора “Nanoeducator”. Такой подход позволяет оценить проведённые измерения предложенного модифицированного ЭЕМ, удовлетворяющего современным требованиям для наноиндустрии.

В данной работе подробно описаны сравнительные результаты измерений методом зондовой микроскопии и модифицированным электроёмкостным методом (ЭЕМ), и сделаны выводы по дальнейшему улучшению метода.

2 Основные элементы и электрофизическая модель метода.

Измерительная ячейка (ИЯ). ИЯ является основным элементом модифицированного ЭЕМ, в котором используется жидкометаллический электрод. Состав применяемой ИЯ представлен на рис. 1.

А)

Б)

В)

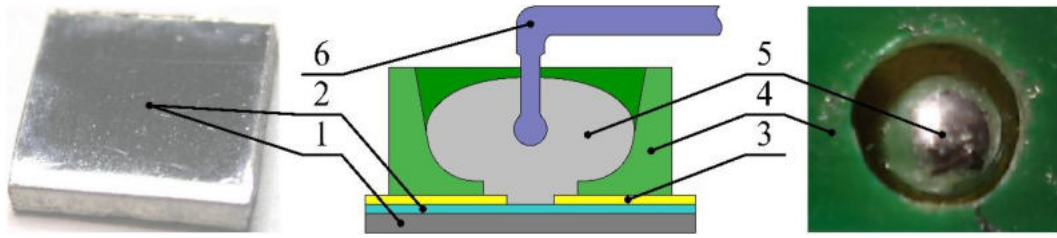


Рис. 1. Состав применяемой ИЯ: А) фото образца с диэлектрическим нанопокрывтием, Б) элементная схема ИЯ, В) фото ИЯ без верхнего контактного электрода

На рис. 1 показано: 1,2 – металлический образец с нанесённой диэлектрической плёнкой; 3 – калибровочная полимерная плёнка с регулируемым сквозным отверстием площадью S (м^2); 4 – ювета; 5 – жидкометаллический электрод (галлий); 6 – верхний контактный электрод. Такая конструкция ИЯ обеспечивает надёжный контакт с диэлектрической плёнкой и обеспечивает повышение точности измерений за счёт заполнения микронеровностей, которые определяются микрогеометрией поверхности. С помощью ИЯ измеряется модуль электрического импеданса диэлектрической плёнки для разных частот из диапазона используемых (1 Гц – 10 МГц) в методе. При этом один электрический контакт – это металлическая поверхность (1), на которую нанесена диэлектрическая плёнка (2). Для контакта со стороны диэлектрического слоя в измерительном электроде (рис. 1 (Б)) используют легкоплавкие жидкие малотоксичные и малоактивные металлы (5) или их сплавы (галлий, русский сплав и др.).

Эквивалентная электрическая схема измерений. На рис. 2 представлены составляющие модифицированного ЭЕМ.

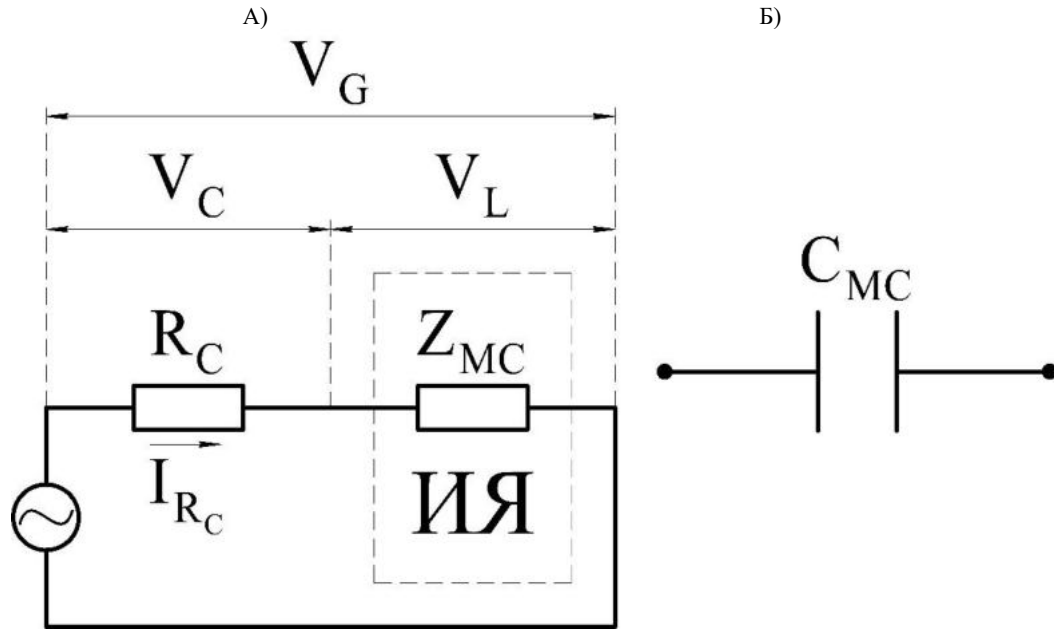


Рис. 2. Составляющие модифицированного ЭЕМ: А) эквивалентная электрическая схема измерений, Б) электрофизическая модель ИЯ

На рис. 2 обозначено: V_G – амплитуда напряжений от генератора; V_C – амплитуда напряжений на калибровочном резисторе; V_L – амплитуда напряжений на ИЯ; I_{RC} – сила тока на калибровочном резисторе; R_C – сопротивление высокоточного калибровочного резистора; Z_{MC} – электрический импеданс измерительной ячейки; C_{MC} – электрическая ёмкость ИЯ; R_{MC} – сопротивление ИЯ. Получаемой информацией в результате измерений в методе является набор значений абсолютной величины электрического импеданса $|Z_{MC}(\omega)|$, измеряемого для каждой частоты в области задания частот.

В процессе измерений для разных частот измеряются амплитуды напряжений V_C и V_L . Величина V_L вычисляется как амплитуда разности напряжений $V_L = (V_G - V_C)$ с генератора и с калибровочного резистора, а функция вычитания напряжений и определения амплитуды реализуется в цифровом осциллографе. Амплитуда тока I_{RC} , текущего через калибровочный резистор, это отношение амплитуды напряжения V_C к сопротивлению R_C . Модуль электрического импеданса ИЯ $|Z_{MC}|$ можно определить с учётом результатов измерений по формуле:

$$|Z_{MC}| = V_L / I_{RC} = V_L \cdot R_C / V_C. \quad (1)$$

Результат вычисления по формуле (1) является приближенным, так как напряжения в схеме измеряются с некоторой погрешностью. По этой причине необходимо оценить погрешность измерения.

На рис. 2 (Б) показана электрическая модель ИЯ, которая соответствует диэлектрической плёнке с малой электропроводимостью. Таким свойством обладают хорошие диэлектрики и большинство полимеров. В этом случае ИЯ описывается только одним параметром C_{MC} – электрической ёмкостью. Аналитическое выражение для модуля импеданса $|Z_{MC}|$ общеизвестно:

$$|Z_{MC}| = (\omega \cdot C_{MC})^{-1}. \quad (2)$$

Аппроксимируем полученный в результате измерений по формуле (1) модуль импеданса $|Z_{MC}|$ посредством аналитического выражения (2), в котором емкость C_{MC} является варьируемым параметром. Используя метод наименьших квадратов (МНК), найдем параметр C_{MC} , который соответствует реальной электрической емкости измеряемой диэлектрической нанопленки. Полученную величину ёмкости можно использовать для нахождения толщины измеренного слоя тонкой диэлектрической плёнки по формуле:

$$d = (\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S) / C_{MC} . \quad (3)$$

где d (м) – средняя толщина плёнки (по измеряемой области в ИЯ), ε – относительная диэлектрическая проницаемость измеряемой плёнки, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф / м, C_{MC} – вычисленная электрическая ёмкость диэлектрической тонкой пленки, S (м²) – площадь жидкометаллического контакта, обусловленного размером сквозного отверстия полимерной плёнки.

Изменяя площадь отверстия, можно обеспечить multifunctionality применения ЭЕМ, применяя его как для лабораторных исследований, так и для промышленного использования. Относительная диэлектрическая проницаемость ε материала плёнки определяется в результате дополнительных измерений по известным методикам [5].

Структурная схема экспериментального измерительного стенда. Для осуществления описанного метода измерений по определению толщины тонких диэлектрических плёнок, нанесённых на металлическую поверхность произвольной формы, применялся экспериментальный измерительный стенд, структура которого представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема экспериментального измерительного стенда

Электронный блок измерений содержит набор образцовых высокоточных резисторов с коммутатором для их переключения, два буферных усилителя для уменьшения влияния входных ёмкостей осциллографа и подключенных к нему кабелей на результаты измерений.

Цифровая схема регистрации представляет собой цифровой четырёхканальный осциллограф с быстродействующим высокоразрядным АЦП ($N = 14$) и коммутатором. В персональном компьютере производится обработка данных измерений по нижеприведённым формулам. А также на дисплее компьютера строятся графики зависимости исходных данных и измерений от частоты.

3 Проведение сравнительных измерений с оценкой погрешностей полученных результатов.

Результаты измерений на зондовом микроскопе «Nanoeeducator». Результаты измерений и обработки диэлектрической плёнки, нанесённой на металлический образец, представлены на рис. 4.

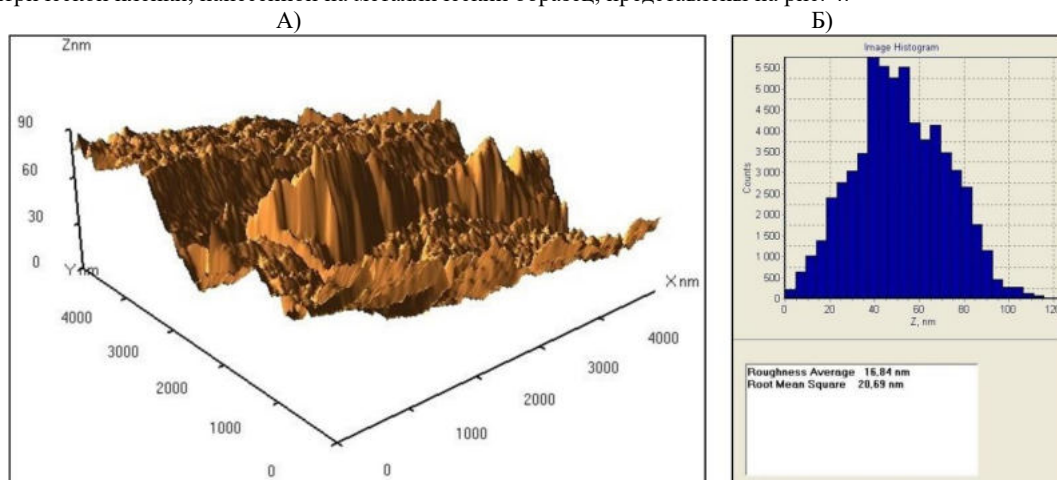


Рис. 4. Результаты измерений и обработки диэлектрической плёнки, нанесённой на металлический образец:

А) трёхмерный рельеф диэлектрической плёнки на поверхности образца, Б) результаты статистической обработки изображения

На рис. 4 показано: А – трёхмерный рельеф плёнки, измеренный на зондовом микроскопе “Nanoeeducator”; Б – гистограмма распределения измеренных точек по высоте слоя и их усредненные показатели. При этом зона

измерения была выбрана в центре образца, а её размеры составляли 5 мкм * 5 мкм. Средняя толщина d (нм) диэлектрической плёнки в этой области равна $d = 16.84$ нм. Среднеквадратическое отклонение (СКО) по толщине диэлектрического слоя составляет $СКО = 20.7$ нм, что говорит о большом разбросе единичных измерений высоты нанопокрyтия. Такая величина параметра СКО говорит о большой «нестабильности» технологии нанесения покрyтия фтор ПАВ, то есть, о плохом качестве технологии нанесения покрyтия.

Измерения толщины фтор ПАВ плёнки модифицированным ЭЕМ. Измерения проводились в центре образца (рис. 1 (А)), при этом диаметр сквозного отверстия в полимерной плёнке был равен 3,5 мм. В состав реализованного измерительного стенда входят следующие приборы. Генератор типа JD6600-60М позволяет устанавливать частоту гармонического сигнала в диапазоне 0.001 Гц – 60 МГц и амплитуду сигнала в пределах 1 мВ – 20 В. Осциллограф цифровой DSJ4104В, четырёх канальный с полосой пропускания от 0 до 60 МГц и чувствительностью вертикального отклонения луча 0.5 мВ / дел. Блок буферных усилителей содержит набор резисторов от 51 Ом до 1 МОм с переключателем и два буферных усилителя для уменьшения влияния входных ёмкостей осциллографа и подключенных к нему кабелей на результаты измерений. В качестве двухполярного источника питания использованы два лабораторных стабилизированных источника ИПС-1.

Проведённые измерения отягощены погрешностями, особенно в области низких частот. Это приводит к необходимости их учёта.

Оценка погрешности измеренного электрического импеданса. Она проводится следующим образом. Учитывая, что измерение напряжений происходит с погрешностью. В результате измерений мы имеем: $V_G + \Delta V_G$, $V_L + \Delta V_L$, $V_C + \Delta V_C$. В эквивалентной электрической схеме (рис. 2 (А)) все напряжения практически измеряются с одной и той же погрешностью δ . Поэтому результаты измерения напряжений можно записать в виде: $V_C + \delta$, $V_L + 2 \cdot \delta$. Используя эти соотношения и формулу (1), можно получить выражение для измеренного импеданса с учётом погрешностей его измерений:

$$\Delta |Z_{MC}(\omega)| = R_C \cdot (V_L + 2 \cdot \delta) / (V_C + \delta) . \quad (4)$$

Здесь $\Delta |Z_{MC}(\omega)|$ – это погрешность определения модуля импеданса, вызванная погрешностями измерений напряжений. Из формулы (4) можно получить выражение для абсолютной $\Delta |Z_{MC}(\omega)|$ и относительной $\Delta |Z_{MC}(\omega)| / |Z_{MC}(\omega)|$ погрешностей определения модуля импеданса:

$$\Delta |Z_{MC}(\omega)| = \delta \cdot (2/V_L + 1/V_C) \cdot |Z_{MC}(\omega)|; \Delta |Z_{MC}(\omega)| / |Z_{MC}(\omega)| = \delta \cdot (2/V_L + 1/V_C) . \quad (5)$$

Эти формулы получены в линейном приближении по δ , и позволяют оценить качество проведённых измерений. Для проводимых измерений абсолютная погрешность измерения напряжений δ (мВ) зависит от уровня (величины) самого напряжения V .

Полная абсолютная погрешность измерений δ будет описываться тремя значениями (δ_1 , δ_2 , δ_3) для разных диапазонов измеряемого напряжения следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 0.05 \forall V \in [10, \infty); \\ \delta_2 &= 0.1 \forall V \in [3, 10); \\ \delta_3 &= 0.5 \forall V \in [0.1, 3); \end{aligned} \quad (6)$$

Очевидно, что погрешность определения импеданса зависит от частоты. Формулы (5), (6) позволяют сделать отбор проведённых измерений для заданной относительной погрешности модуля импеданса.

Результаты проведённых измерений. Измерения проводились для набора частот в диапазоне 1 кГц – 10 МГц и приведены в первых четырёх столбцах таблицы 1. В пятом столбце таблицы приведены результаты измерений и расчёта модуля импеданса, в столбцах 6 приведена оценка погрешностей единичных измерений (по формулам (4) – (6)). В столбце 7 приведены расчётные результаты применения МНК для модуля импеданса (по формуле (2)).

Таблица 1. Результаты измерений и расчётов

F , кГц	V_G , мВ	V_C , мВ	V_L , мВ	Z_{MC} , Ом	$\Delta Z / Z$	Z_{APR}
1	50	0.1	50	25500.0	5.00	–
5	50	0.8	49	3123.8	0.63	3031.52
10	50	1.6	48.5	1545.9	0.31	1515.76
20	50	2.5	48	979.2	0.20	757.88
50	48	5	46	469.2	0.02	303.15
100	46	8	44	280.5	0.01	151.58
200	43	13	36	141.2	0.01	75.79
300	40	18	30	85.0	0.01	50.53
500	33	21	22	53.4	0.01	30.32
1000	27	24	12	25.5	0.01	15.16
2000	24	24	4	8.5	0.05	7.58
5000	22	22	3.5	8.1	0.06	3.03
10000	18	18	2	5.7	0.10	1.52

Результаты оценки погрешностей измерений показывают, что измерения на частоте 1 кГц имеют погрешности, неприемлемые для рассмотрения. Поэтому этот результат измерения исключается из дальнейшего рассмотрения.

Данный факт говорит о том, что следует улучшить точность измерительного стенда, чтобы расширить область частот измерений и увеличить точность самих измерений.

Результаты расчётов. Используя аналитическое выражение (2) для модулей электрических импедансов, и результаты расчёта $|Z_{MC}(\omega)|$ по измеренным данным, можно рассчитать электрическую ёмкость C_{MC} ИЯ. Для этого можно использовать метод наименьших квадратов (МНК), при этом необходимо минимизировать среднеквадратическое отклонение (СКО) между модулями измеренных и вычисленных по формуле (2). В результате применения МНК получим расчётное значение параметра ИЯ – величину ёмкости C_{MC} .

На рис. 5 представлены зависимости измеренного импеданса $|Z_{MC}(\omega)|$ и результата аппроксимации по МНК в области частот, где их отличие наиболее заметно.

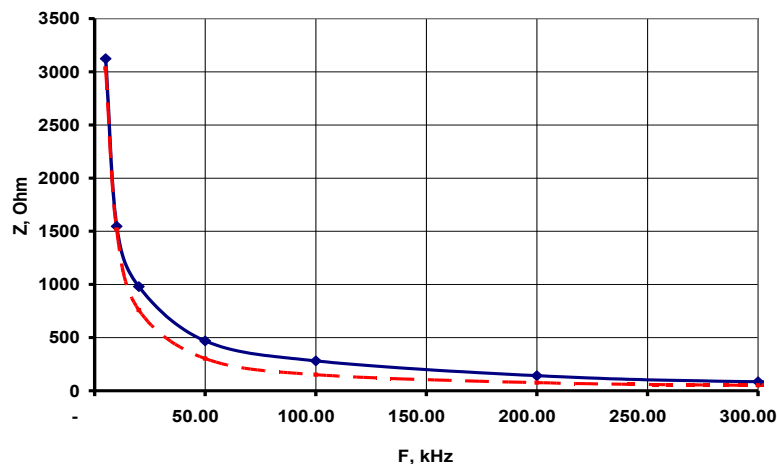


Рис. 5. Графики частотных зависимостей модулей измеренного импеданса $|Z_{MC}(\omega)|$ (непрерывная линия) и аналитического вида импеданса – результата МНК (пунктирная кривая)

Расчётное значение ёмкости равно $C_{MC} = 1.05 \cdot 10^{-8}$ Ф. Используя полученные результаты, можно определить среднюю (по площади области измерения) толщину диэлектрической плёнки d (нм) по формуле (3).

$$d = 20.3 \text{ нм.} \quad (7)$$

Эта величина отличается от толщины, определённой с помощью зондового микроскопа “Nanoeducator” на 3.46 нм, с относительной погрешностью, равной 17%. Следует принять во внимание тот факт, что сравнительные измерения толщины диэлектрической плёнки проводились в разных (по площади) областях измерений.

Выводы.

1. Чтобы увеличить точность и расширить частотную область измерений, стенд для реализации ЭЕМ должен быть усовершенствован: оснащен более высокоразрядным цифровым вольтметром (более высокочастотной измерительной аппаратурой), или изменен метод измерения напряжений (переход к мостовой или дифференциальной схеме измерений).

2. Результаты сравнительных измерений одного объекта двумя методами показали их достаточно хорошее совпадение.

3. Предложенный модифицированный электроёмкостный метод имеет достаточно простую процедуру измерений и расчётов, что делает его пригодным для широкого применения в промышленности.

Библиографический список

- 1 Никифоров С., Яминский И., Алексеев А., Бурлуцкий Д., Смагулова Д. Функциональные нанопокрывтия: тенденция и перспективы // Наноиндустрия. 2015. №2 (56). С. 18-25.
- 2 Вохидов А., Добровольский Л. Эпиламирование: эффективный метод создания пленок // Наноиндустрия. 2012. №4 (34). С. 32-35.
- 3 I.A. Novikov at al Physico-matematical model for bellows expansion joint efficiency by different manufacturing technologies // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **560**, 2019, p. 24 – 29.
- 4 Логунов В.В., Амирханов Е.И., Новиков И.А. Технология повышения показателей надежности оболочек и инструментов в технике. // Металлообработка № 5, (107), 2018. С. 30-36.
- 5 Можен М. Механика электромагнитных сплошных сред: Пер. с англ. М.: 1991, – 560 с.

УДК 667.661.2

НАПЫЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОПОГЛАЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ Пустовалов В.Е.

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова г.

Развитие и увеличение объема электронных устройств приводит к увеличению электромагнитного фона, что вносит помехи в как в сами устройства, так и в каналы связи. Для защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ) используются различного рода покрытия, основанные как на композитных, так и на пленочных технологиях. Электромагнитные волны используются как средство передачи данных, так и в качестве электронного щупа для обнаружения объектов. Для уменьшения уровня сигнала собственного излучения и отраженного зачастую используют многослойные покрытия, обладающие более высокой удельной эффективностью. Разработка способов повышения эффективности нанесения покрытий является актуальной задачей [1-3].

Статья посвящена вопросам повышения технологичности нанесения покрытий

Существующие покрытия имеют сложную мезоструктуру с изменением состава, свойств и толщины. В идеальном случае покрытие должно рассеивать ЭМИ, переводить в другой вид энергии, например, тепловую. Существующие различные виды покрытий, например, можно выделить следующие [4]:

Градиентные радиопоглощающие покрытия имеют многослойную структуру, обеспечивающую заданное изменение диэлектрической проницаемости по его толщине. Покрытие состоит из связующего вещества и наполнителя, изменяющего электрическую и магнитную проницаемость. Наружный слой состоит из твердого диэлектрика с диэлектрической и магнитной проницаемостью примерно равной единице. Следующие слои состоят из диэлектриков и порошка-поглотителя. В этих слоях используются диэлектрики, имеющие возрастающее в глубь покрытия значение диэлектрической и магнитной проницаемости. В качестве порошка-поглотителя может быть применена графитовая пыль, порошки железа. Такая слоистая структура позволяет минимизировать отражение радиоволн от покрытия и увеличить их поглощение по мере проникновения в глубь покрытия.

Интерференционные радиопоглощающие покрытия состоят из подложки и чередующихся диэлектрических и проводящих слоев и гасят отраженную волну за счет интерференции волн, отраженных от разных слоев покрытия. Диэлектрический слой представляет собой связующее вещество, которое содержит в себе порошок-поглотитель (например, частицы оксида железа). Проводящий слой может быть выполнен в виде металлизированных волокон. Такая структура обеспечивает сдвиг фазы отраженной волны почти на 180° и ее гашение.

Рассеивающие радиопоглощающие покрытия обеспечивают многократное отражение и рассеивание волн. Изделия из них представляют собой полые пирамидальные конструкции из пеноматериалов (например, пенополистирола или пенополиуретана), внутренние стенки которых покрыты графитом. Также рассеивающее радиопоглощающее покрытие конструктивно может быть выполнено из стеклопластиковых трубок, покрытых снаружи слоем карбида кремния (SiC).

Керамические радиопоглощающие покрытия представляют собой, как правило, плотноспеченные материалы из оксидов металлов с низким электрическим сопротивлением (например, оксиды титана) или оксидов и нитридов бора, нитридов алюминия с добавкой металлов (вольфрама, молибдена, титана, циркония, гафния). Такие покрытия обладают высокой теплопроводностью и термостойкостью (до 1200°C), имеют высокие механические свойства.

Ферритовые радиопоглощающие покрытия, обладающие большими магнитными потерями, характеризуются высокой поглощающей способностью. Ферритовые покрытия формируются из частиц оксида железа (FeO , Fe_2O_3) и связующей основы, например, эпоксидного связующего.

Проанализировав радиопоглощающие покрытия можно прийти к выводу, что связующую основу составляют органические или неорганические вещества (фенолформальдегидные, эпоксидные, полиэфирные связующие, пластические массы), в которых вводят наполнитель (керамические или металлические включения в виде порошков, волокон, жгутов, стержней), как активный поглощающий компонент. В основном радиопоглощающие покрытия являются неоднородными композиционными диэлектриками, которые состоят из смеси двух или более различных веществ - компонентов смеси. Связующая основа представляет собой на этапе формирования покрытия высоковязкую жидкость, в которую вводят определенное количество наполнителя [5].

Перспективно выглядит формирование многослойных радиопоглощающих покрытий посредством сверхзвукового распыления компонентов покрытий газовым (воздушным) потоком, то есть использовать для получения покрытий газодинамическую операционную систему. Под газодинамической операционной системой будем понимать состоящую из взаимосвязанных элементов технологического оборудования систему, в которой операции распыления, диспергации, перемешивания и гомогенизации компонентов покрытия осуществляются в потоке рабочего газа. Таким образом, сложность организации газодинамической операционной системы, подбор соответствующих технологических режимов при формировании многокомпонентного и многослойного покрытия является актуальной проблемой, решение которой позволит формировать радиопоглощающие покрытия с заданными электромагнитными и механическими свойствами.

Для увеличения эффективности нанесения покрытия перед напылением требуется подготовить композиции из исходных компонентов, состав которых может состоять из различных твердых (порошки) или жидких компонентов. Эти композиции должны быть однородными, химически и физически стабильны, сохранять состав при хранении, транспортировке и использовании. В газодинамической операционной системе при распылении операции диспергации, перемешивания и гомогенизации исходных компонентов технологически совмещены и осуществляются в сверхзвуковом потоке рабочего газа, то есть они выполняются как совмещенные технологические переходы в рамках единой операции.

Формирование покрытия, состоящего из нескольких компонентов, может быть осуществлено с использованием следующих подходов.

1. *Совмещенный подход*, основанный на предварительном объединении исходных компонентов в одну или несколько композиций и их дальнейшая совместная переработка в готовое покрытие (рис. 1).

2. *Дифференцированный подход*, основанный на отдельной подаче компонентов в газодинамическую операционную систему и их совмещение в процессе переработки или на конечной стадии формирования покрытия (рис. 2).

Совмещенный подход применим для формирования покрытий, компоненты которых не вступают между собой в химические реакции. Поэтому такие компоненты могут быть заранее совмещены между собой. В том случае если компоненты могут вступить в химическую реакцию между собой, то наиболее приемлем дифференцированный подход. При дифференцированном подходе подготовленные к распылению компоненты подаются отдельно в газодинамический факел.

При совмещенном подходе газодинамическая операционная система состоит из двух автономных технологических подсистем: смеситель, где производится предварительное перемешивание компонентов между собой, и распыляющее устройство, где происходит диспергация, дробление капель, дополнительное перемешивание и гомогенизация компонентов в газодинамическом факеле. Целью первой операции является образование однородной неакционноспособной композиции с предварительным равномерным распределением компонентов по объему. Целью второй операции является получение покрытия с заданным распределением компонентов по его объему, без прохождения каких-либо химических реакций между компонентами композиции.

При дифференцированном подходе в распылительное устройство осуществляется раздельная подача исходных компонентов, которые затем диспергируются, перемешиваются и гомогенизируются в газодинамическом факеле распыления. Раздельная подача компонентов необходима в том случае, если компоненты при совмещении вступают в химическую реакцию между собой или их совместная подача в распылительное устройство затруднена по каким-либо причинам.

При дифференцированном подходе готовятся исходные композиции, состоящие из одного или нескольких компонентов, которые по автономным трубопроводам подаются насосами с заданным расходом в распылительную головку газодинамической операционной системы. Причем, такие исходные композиции являются нереакционноспособными. В этом случае ликвидируется автономная подготовительная операция предварительного перемешивания компонентов между собой. В газодинамическом факеле распыления происходит диспергация, перемешивание и гомогенизация компонентов. В результате образуется тонкодисперсная однородная, реакционноспособная композиция, которая напыляется на поверхность. На поверхности распыленные компоненты сближаются между собой, и после прохождения химических реакций между ними превращаются в готовое покрытие.

Значительные технологические трудности возникают при формировании многослойных покрытий, в которых слои отличаются составом компонентов, особенно если к технологическому процессу формирования покрытия применен дифференцированный подход организации газодинамической операционной системы. В этом случае для каждого конкретного слоя необходимо подготовить одну или несколько исходных композиций и с определенным расходом подать их в распылительное оборудование в строгом соответствии с технологическим процессом. При этом сложность распылительного оборудования резко возрастает, а его обслуживание требует значительных затрат времени и средств. Наиболее ответственным элементом распылительного оборудования является распылительная головка, от ее конструкции зависит возможность регулирования параметров распыления, а, следовательно, и качество формируемого покрытия [6].



Рис. 1. Совмещенный подход к организации газодинамической операционной системы.

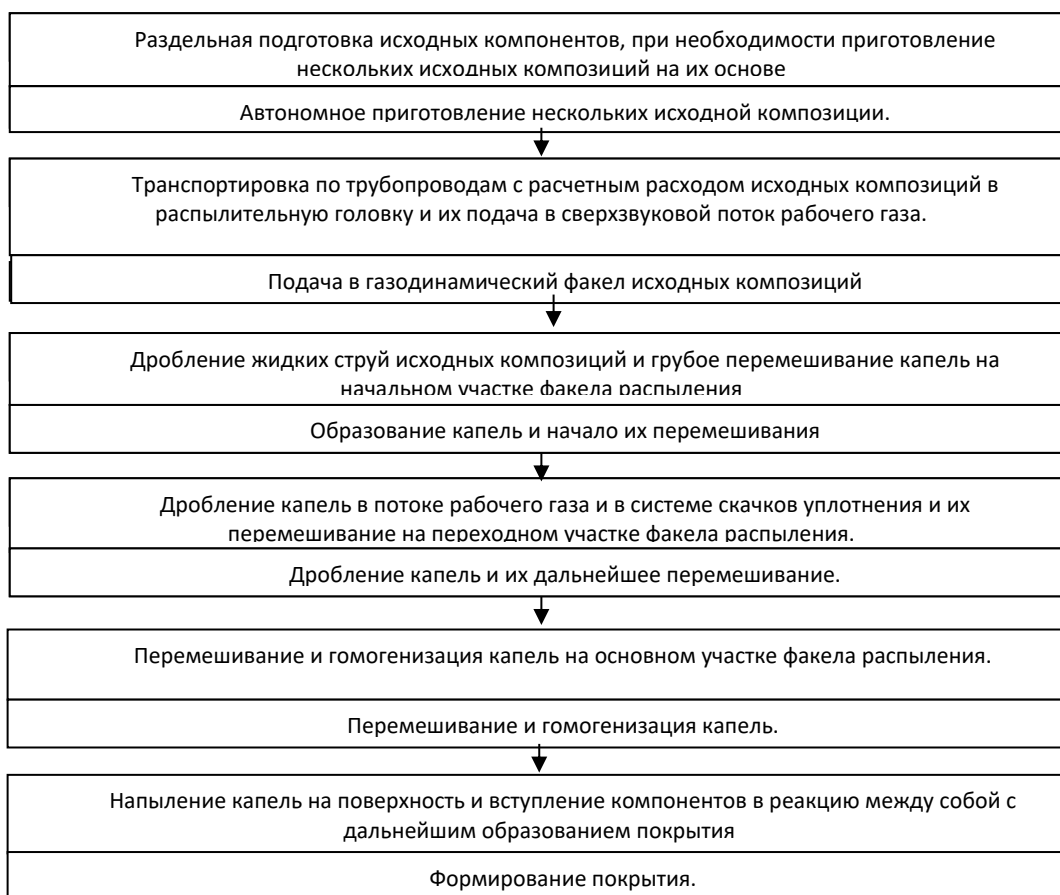


Рис. 2. Дифференцированный подход к организации газодинамической операционной системы.

На процесс формирования покрытия и его качество влияет много технологических факторов, среди которых можно выделить наиболее существенные.

1. Вид сопел и характер истечения струй рабочего газа.
2. Конструкция канала подачи распыляемой композиции и характер ее истечения из этого канала.
3. Компоновка распылительной головки.
4. Точность и стабильность дозировки композиции по времени.
5. Скорость и характер взаимного перемещения распылительной головки и обрабатываемой поверхности.
6. Физико-химические особенности компонентов покрытия.

Эти факторы позволяют определить разнообразные конструктивно-технологические решения распылительных головок. При создании универсальной головки распыления, которая может использоваться для распыления композиций с различными физико-техническими свойствами, требуется учесть возможность регулирования параметров истечения рабочего газа и композиций и возможность организации факела распыления с необходимым распределением параметров вдоль его оси. Для этой задачи больше всего подходит процесс диспергации проходящий в газодинамическом факеле распыления, состоящем из одиночных сверхзвуковых струй, взаимодействующих друг с другом. Это позволяет нам, распыляя высоковязкую композицию, получить капли с размерами порядка $10^{-4} \dots 10^{-6}$ м, благодаря возникающим скачкам уплотнения.

В качестве такой универсальной распылительной головки может быть предложена компоновка распылительной головки, с многоструйной подачей рабочего газа и центральным каналом подачи композиции в факел распыления (Рис.3, слева). В нем подача газа и композиции регулируются независимо друг от друга, что позволяет поддерживать определённый расход композиции и необходимое давление рабочего газа, обеспечивающее получение частиц требуемой дисперсности. Такая головка является монолитной деталью, которая выполнена из полимерного материала. Она создана с помощью аддитивных технологий, что делает ее более надежной и дешевой по сравнению с традиционными аналогами.

На базе экспериментального узла напыления разработано технологическое устройство напыления, которое может быть использовано для напыления различных покрытий (рис. 3, справа). Оно состоит из корпуса, пускового рычага (курка), регулятора подачи материала, регулятора подачи воздуха и распылительной головки. Через рукоятку проходит канал с воздухом и заполняет воздушную камеру, которая находится возле нижнего регулировочного винта. В этой камере присутствует клапан. С помощью этого клапана и происходит настройка давления воздуха. При нажатии на рычаг воздух под определенным давлением выходит из камеры и проходит дальше по каналам устройства и происходит одновременная подача распыляемой жидкости и сжатого воздуха. Струя распыляемой жидкости дробится в сверхзвуковом факеле распыления на капли диаметром 10-40 мкм. Поток капель направляется на основание, сливаясь между собой капли, формируют покрытие. Расход жидкости и газа регулируется силой нажатия на курок.

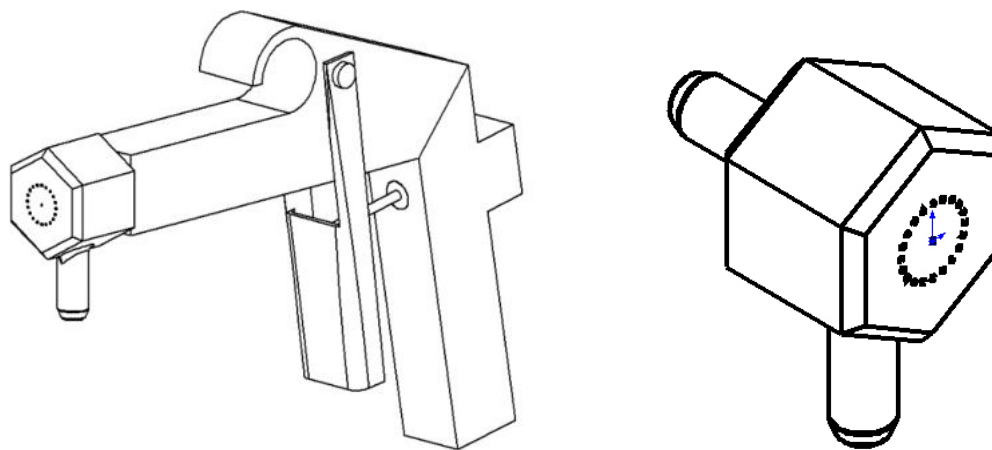


Рис. 3 Экспериментальный монолитный узел напыления (слева).
Технологическое устройство напыления (справа).

Таким образом, использование сверхзвукового газодинамического напыления перспективно для послойного формирования радиопоглощающих покрытий с заранее заданными свойствами.

Научный руководитель – к.т.н., доц. А. Ю. Андриюшкин.

Библиографический список

- [1] Green Michael Recent progress of nanomaterials for microwave absorption/ Michael Green, Xiaobo Chen //J. of Materiomics. – 2019. V. 5. Iss. 4. P. 503-541.
- [2] Краев И.Д. Радиопоглощающие полимерные композиты, наполненные магнитным порошком железа и углеродными нанотрубками / Краев И.Д., Сорокин А.Е., Пыхтин А.А., Филонова Е.В.// Материаловедение. – 2021. № 6. С. 17-26.
- [3] Tayier Walisijiang Microwave hybrid heating (МНН) of Ni-based alloy powder on Ni and steel-based metals –A review on fundamentals and parameters/ Walisijiang Tayier, Shamini Janasekaran, Vin Cent Tai // Int. J/ of Lightweight Mat. and Manufac. – 2022. V. 5. Iss. 1. P. 58-73.
- [4] Андриюшкин, А. Ю. Диспергирование жидкостей сверхзвуковым газодинамическим методом (Обзор) / А. Ю. Андриюшкин // Конструкции из композиционных материалов. – 2011. № 3. С. 5-27.
- [5] Uddin A. From functional units to material design: A review on recent advancement of programmable microwire metacomposites/ A. Uddin, D. Estevez, F.X. Qin // Composites Part A: Appl. Sci. Manufac. – 2022. V. 153. 106734.
- [6] Андриюшкин, А. Ю. Оптимальная организация узла диспергирования с многоструйной подачей газа / А. Ю. Андриюшкин // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2012. № 2. С. 17-23.

УДК 533.6.011.55

НАХОЖДЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛА ДЛЯ БОЛЬШИХ ЧИСЕЛ МАХА С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА *FLOW SIMULATION* САПР *SOLIDWORKS*

П. Г. Дмитриев

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

Данная работа посвящена решению проблемы определения аэродинамических характеристик гиперзвукового летательного аппарата (ЛА) с использованием *CFD* модуля *Flow Simulation* из состава САПР *SolidWorks*

Исследования проводились для ЛА типа осесимметричного оперенного тела вращения. Так как точность численного моделирования определяется выбранной расчетной сеткой, необходимо провести исследование сеточной сходимости. Для этого следует провести один и тот же численный эксперимент при разных разрешениях расчетной сетки, при этом полученные результаты должны отличаться не более чем на 5-10%.

В качестве эксперимента для исследования сеточной сходимости был произведен расчет коэффициента лобового сопротивления c_x . Исследование сеточной сходимости производилось при числе Маха $M = 10$ и выбранном угле атаки $\alpha = 0$. Были приняты параметры атмосферы: $T = 250.35$ К, давление $p = 287.143$ Па, плотность $\rho = 3.99566 \cdot 10^{-4}$ кг/м³.

Результаты расчета коэффициента лобового сопротивления при разных уровнях разрешения сетки представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Значение c_x при разных сетках

Номер сетки	Кол-во ячеек			Значение коэффициента c_x
	Ось X	Ось Y	Ось Z	
1	100	28	28	0.0514
2	110	32	32	0.0469
3	120	38	38	0.0486
4	130	40	40	0.0491
5	140	44	44	0.0554
6	150	48	48	0.0569
7	160	52	52	0.0546
8	170	56	56	0.0550

При увеличении уровня дискретности расчетной сетки, время расчета увеличивается. Поэтому невозможно выбрать сетку с наибольшим дискретности и получить результаты в течении нескольких минут. Следовательно, исследование сеточной сходимости позволяет выбрать оптимальную сетку, позволяющую численно моделировать с требуемой точностью не тратя, при этом, большого количества времени.

График зависимости коэффициента лобового сопротивления c_x представлен на рисунке 1.

9	180	60	60	0.0551
10	190	64	64	0.0555
11	200	70	70	0.0526
12	210	74	74	0.0559
13	220	76	76	0.0548
14	230	82	82	0.0545
15	240	86	86	0.0542
16	250	90	90	0.0531
17	260	94	94	0.0532
18	270	98	98	0.0531
19	280	102	102	0.0529
20	290	106	106	0.0528
21	300	110	110	0.0532

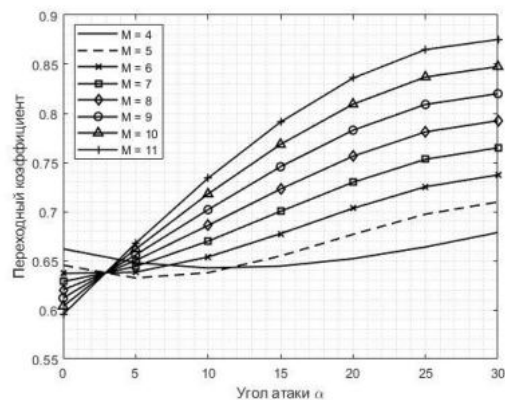


Рисунок 1 – График сеточной сходимости

В результате исследования сеточной сходимости была выбрана 16-ая расчетная сетка, т.к. при данном уровне дробления коэффициент лобового сопротивления c_x не меняет своего значения более чем на 5% от некоторого устоявшегося значения сеток 15-21. Время расчета* для данной расчетной сетки занимает от 2 до 4 часов. В свою очередь, время расчета, затрачиваемое на численное моделирование, при сетке 21 занимает от 19 до 32 часов.

Для детального анализа аэродинамики смоделированного объекта были выбраны числа Маха от 2 до 11 с шагом $\Delta M = 1$, а значения угла атаки от 0 до 30 градусов с шагом $\Delta \alpha = 5$.

При обтекании сверхзвуковым воздушным потоком твёрдого тела на его передней кромке образуется ударная волна (иногда не одна, в зависимости от формы тела).

* для следующей конфигурации оборудования: процессор AMD Ryzen 7 2700X (4.2 ГГц), 32Гб ОЗУ (3000 МГц), 256 Гб SSD M.2 A-Data XPG SX8200 Pro (до 3350 Мбайт/с)

На фронте ударной волны (называемой иногда также скачком уплотнения), имеющем очень малую толщину (доли миллиметра), почти скачкообразно происходят кардинальные изменения свойств потока — его скорость относительно тела снижается и становится дозвуковой, давление в потоке и температура газа скачком возрастают. Часть кинетической энергии потока превращается во внутреннюю энергию газа. Все эти изменения тем больше, чем выше скорость сверхзвукового потока. При гиперзвуковых скоростях (число Маха=5 и выше) температура газа достигает нескольких тысяч кельвинов, что создаёт серьёзные проблемы для аппаратов, движущихся с такими скоростями

Фронт ударной волны по мере удаления от аппарата постепенно принимает почти правильную коническую форму, перепад давления на нём уменьшается с увеличением расстояния от вершины конуса, и ударная волна превращается в звуковую.

Стоит отметить, что расчеты в САПР *SolidWorks* с обычными параметрами воздуха, а именно вязкостью, приводят к возникновению критической ошибки при числах Маха более или равным 7-ми и угле атаки отличному от нуля. Эта ошибка связывается с тем, что скачок уплотнения практически «ложится» на корпус исследуемого объекта и расстояние между самим скачком и поверхностью ЛА становится настолько маленьким, что Изменение параметров на скачке уплотнения не может быть корректно смоделировано.

Одним из способов решить данную проблему является увеличение степени дискретности сетки. Однако, при дальнейшем увеличении числа Маха потребуются вновь уменьшать размер ячеек расчетной сетки. Такой подход приводит к многократному увеличению времени расчета.

В настоящей работе для решения указанной проблемы без увеличения дискретности сетки предлагается использовать изменение вязкости газа. В таком случае, можно посчитать повторно, но для отличной от нормальной вязкости, аэродинамические коэффициенты для чисел Маха меньше, чем какое-то критическое значение (в нашем случае, критическое значение Маха $M = 7$), посчитать отношения аэродинамических коэффициентов (1) и экстраполировать эти значения для больших чисел Маха.

Для моделирования, описанного в данной работе, были выбраны следующие числа Маха для экстраполяции коэффициентов отношения: 4, 5 и 6. В таблице 2 приведены аэродинамический коэффициент лобового сопротивления c_x для чисел Маха равных 4-ём, 5-ти и 6-ти для нормальной вязкости воздуха и для измененной, а так же коэффициент отношения этих значений. Значение измененной вязкости воздуха было выбрано равным 0.001. Коэффициент лобового сопротивления для нормальной вязкости обозначим $c_{x,\mu=norm}$ а для измененной $c_{x,\mu=0.001}$. Отношение первого ко второму обозначим k .

$$k = \frac{c_{x,\mu=norm}}{c_{x,\mu=0.001}} \quad (1)$$

Таблица 2 – значения коэффициента лобового сопротивления c_x для чисел Маха $M = 4, 5, 6$.

$M \backslash \alpha$	4			5			6		
	$c_{x,\mu=norm}$	$c_{x,\mu=0.001}$	k	$c_{x,\mu=norm}$	$c_{x,\mu=0.001}$	k	$c_{x,\mu=norm}$	$c_{x,\mu=0.001}$	k
0	0,1410	0,2130	0,6620	0,1110	0,1720	0,6453	0,0930	0,1460	0,6370
5	0,1450	0,2238	0,6479	0,1150	0,1819	0,6324	0,0970	0,1520	0,6383
10	0,1550	0,2413	0,6425	0,1290	0,2023	0,6377	0,1140	0,1744	0,6538
15	0,1760	0,2731	0,6444	0,1530	0,2337	0,6547	0,1420	0,2096	0,6774
20	0,2040	0,3129	0,6520	0,1860	0,2749	0,6767	0,1770	0,2517	0,7033
25	0,2380	0,3585	0,6639	0,2230	0,3198	0,6973	0,2140	0,2951	0,7252
30	0,2740	0,4036	0,6789	0,2620	0,3692	0,7097	0,0930	0,1460	0,6370

Значения коэффициентов отношения $c_{x,\mu=norm}$ и $c_{x,\mu=0.001}$ будем называть переходными коэффициентами. Значения линейной экстраполяции переходных коэффициентов приведены в таблице 3. График переходных коэффициентов приведен на рисунке 2.

Таблица 3 – значения переходных коэффициентов

$\frac{M}{\alpha}$	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,6620	0,6453	0,6370	0,6286	0,6203	0,6119	0,6035	0,5952
5	0,6479	0,6324	0,6383	0,6441	0,6500	0,6559	0,6617	0,6676
10	0,6425	0,6377	0,6538	0,6698	0,6858	0,7019	0,7179	0,7340
15	0,6444	0,6547	0,6774	0,7002	0,7229	0,7456	0,7684	0,7911
20	0,6520	0,6767	0,7033	0,7298	0,7563	0,7828	0,8093	0,8358
25	0,6639	0,6973	0,7252	0,7531	0,7811	0,8090	0,8369	0,8649
30	0,6789	0,7097	0,7373	0,7648	0,7924	0,8200	0,8476	0,8751

На рисунках 3 – 8 графически показаны зависимости аэродинамического коэффициента c_x от угла атаки при разных числах Маха и скорректированных для разных значений вязкости газа. Синим цветом обозначены зависимости пониженной вязкости, красным – нормальной. Пунктирной линией обозначены зависимости, полученные путем перевода из пониженной в нормальную вязкость воздуха. Для того чтобы получить зависимости нормальной вязкости воздуха, аэродинамические коэффициенты измененной вязкости умножаются на соответствующие переходные коэффициенты. На рисунках 9 – 10 показаны зависимости полученных значений c_x от угла атаки и числа Маха.

Аналогичным образом вычисляются аэродинамические коэффициенты подъемной силы c_y и момент тангажа m_z .

В свою очередь, для коэффициента подъемной силы c_y существенного различия в значениях переходного коэффициента не нет. Поэтому было посчитано среднее значение, равное 0.98195. В таблице 4 приведены полученные значения коэффициента c_y . На рисунках 11 - 12 приведены графики значения коэффициента c_y от числа Маха и угла атаки.

Для коэффициента момента тангажа m_z , как показали вычисления для данных параметров и исследуемого объекта, перевода из измененной вязкости в нормальную не потребовались.

В таблице 5 приведены значения коэффициента момента тангажа m_z . На рисунках 13 – 14 приведены графики значения коэффициента m_z от числа Маха и угла атаки.

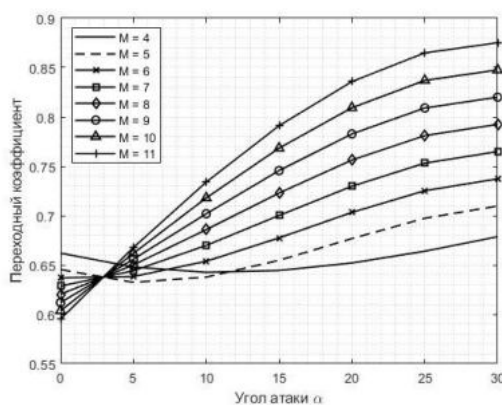


Рисунок 2 – График переходных коэффициентов

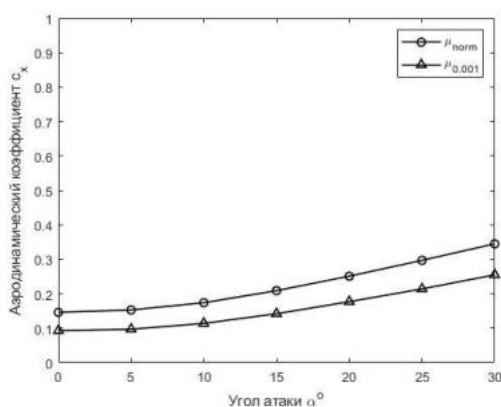


Рисунок 3 – зависимость c_x от угла атаки. $M = 6$

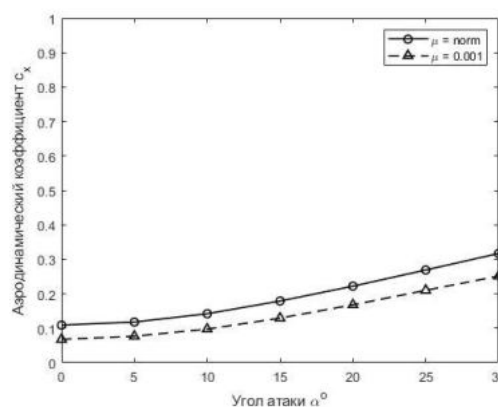


Рисунок 4 – зависимость c_x от угла атаки. $M = 8$

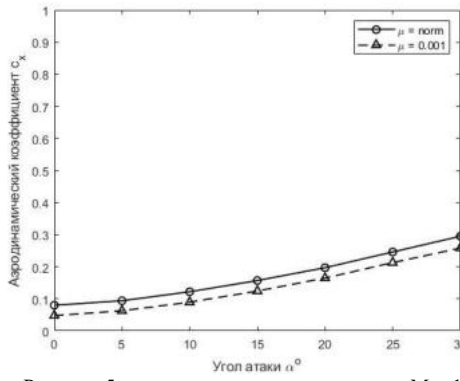


Рисунок 5 – зависимость c_x от угла атаки. $M = 11$

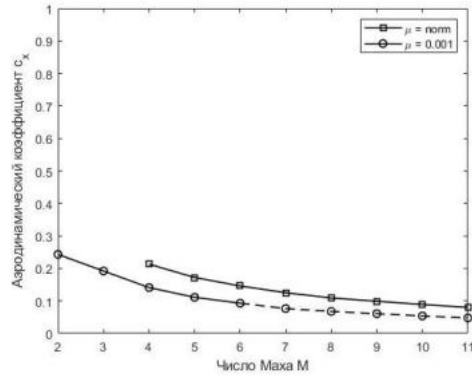


Рисунок 6 – зависимость c_x от числа Маха. $\alpha = 0$

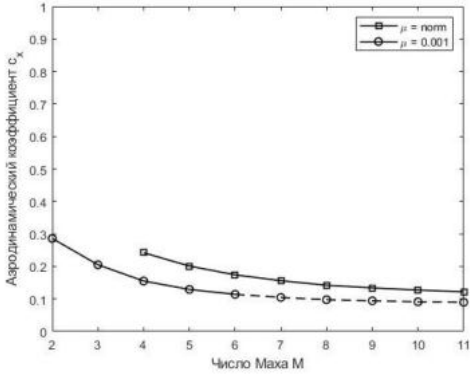


Рисунок 7 – зависимость c_x от числа Маха. $\alpha = 10$

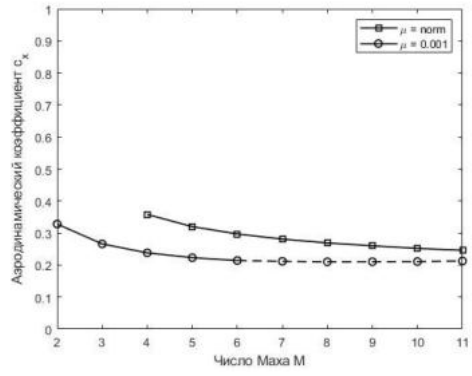


Рисунок 8 – зависимость c_x от числа Маха. $\alpha = 25$

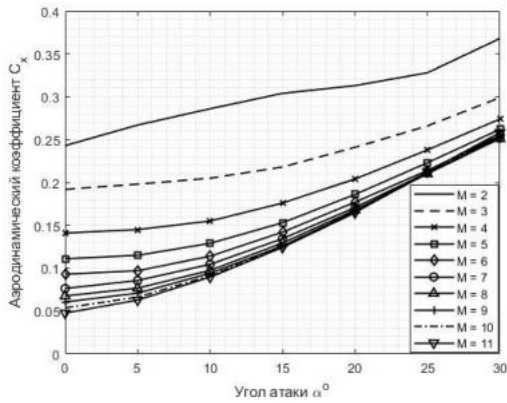


Рисунок 9 – зависимость c_x от угла атаки

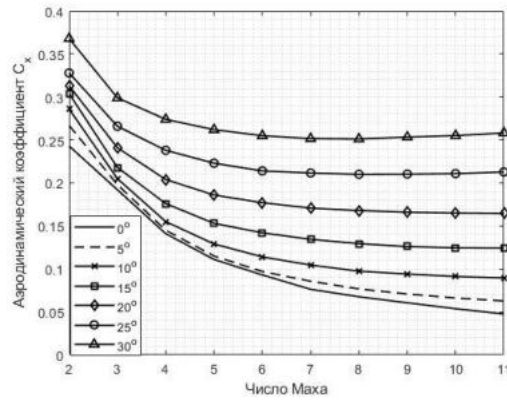


Рисунок 10 – зависимость c_x от числа Маха

Таблица 4 - значения коэффициента подъемной силы c_y для чисел Маха $M = 2 \dots 11$

$M \backslash \alpha$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.3460	0.3170	0.3080	0.2940	0.2820	0.2465	0.2406	0.2347	0.2308	0.2278
10	0.7620	0.7400	0.7010	0.6600	0.6120	0.5676	0.5489	0.5342	0.5244	0.5165
15	1.3520	1.2890	1.1820	1.0940	1.0320	0.9633	0.9329	0.9112	0.8975	0.8847
20	2.1620	1.9740	1.7290	1.6040	1.5230	1.4602	1.4297	1.4062	1.3895	1.3757
25	2.9620	2.5570	2.3350	2.2020	2.1210	2.0709	2.0474	2.0277	2.0110	1.9953
30	3.8380	3.2700	3.0220	2.8830	2.8060	2.7671	2.7357	2.7141	2.6915	2.6788

Таблица 5 - значения коэффициента момента тангажа m_z для чисел Маха $M = 2 \dots 11$

$M \backslash \alpha$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0,015	-0,060	-0,116	-0,188	-0,256	-0,415	-0,553	-0,716	-0,896	-1,094
10	-0,033	-0,119	-0,234	-0,375	-0,562	-0,829	-1,101	-1,426	-1,764	-2,129
15	-0,055	-0,193	-0,356	-0,577	-0,858	-1,224	-1,606	-2,038	-2,502	-3,020
20	-0,080	-0,262	-0,487	-0,762	-1,085	-1,506	-1,935	-2,401	-2,927	-3,506
25	-0,117	-0,334	-0,579	-0,869	-1,208	-1,617	-2,024	-2,489	-3,020	-3,627
30	-0,123	-0,371	-0,524	-0,923	-1,264	-1,643	-2,089	-2,581	-3,159	-3,792

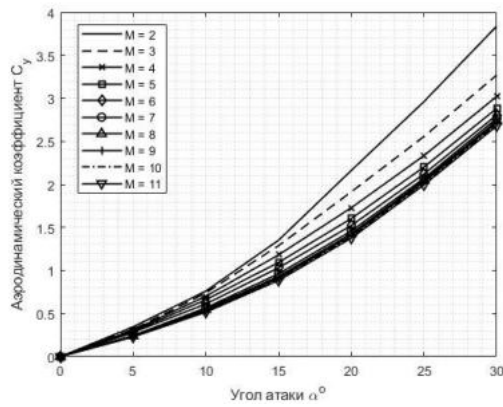


Рисунок 11 –коэффициента c_y от угла атаки

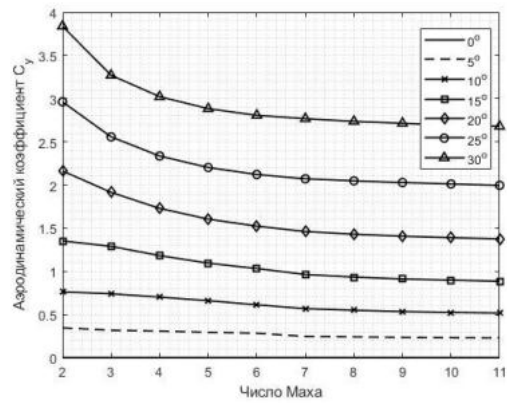


Рисунок 12 – зависимость c_y от числа Маха

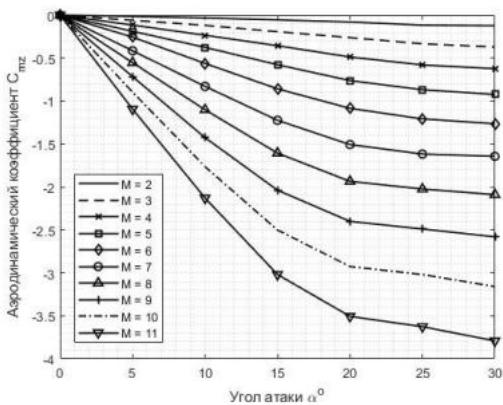


Рисунок 13 –коэффициента m_z от угла атаки

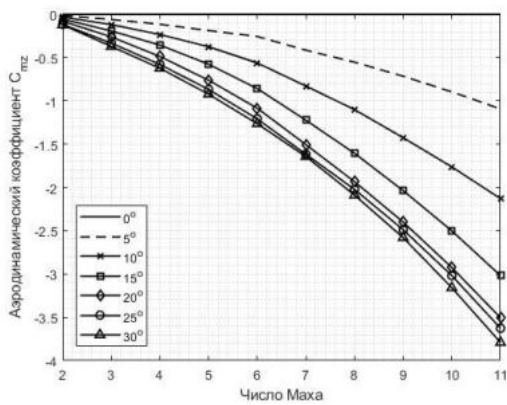


Рисунок 14 –коэффициента m_z от угла атаки

Результаты исследования показывают, что изменение вязкости воздуха при критических ошибках пакета *Flow Simulation* САПР *SolidWorks* позволяет рассчитать аэродинамику ЛА без значительных затрат времени. Для осесимметричных моделируемых объектов между боковыми и продольными параметрами не будет никакой разницы. Однако, данный способ требует грамотного подхода к решаемой проблеме и должен использоваться только в том случае, когда не хватает вычислительных мощностей для высокого уровня дискретности расчетной сетки.

Научный руководитель – к.т.н., доцент А. В. Клочков

Библиографический список

1. Акимов Г.А., Зазимко В.А., Моисеев М.Г. Аэрогазодинамика часть I Основные понятия. Газодинамические таблицы СПб: БГТУ, 2007. 270 с.

УДК 621.762

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Е.В. Усынина, Е.Н. Лоскутов, А.Д. Губарев

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

Селективное лазерное плавление (SLM) – технология изготовления сложных по форме и структуре изделий из металлических порошков [2]. В настоящее время это самый популярный способ печати изделий по моделям, спроектированным в профессиональных пакетах для работы с 3D графикой. С помощью рассматриваемой технологии возможно создание уникальных сложнопрофильных изделий с высокой точностью и без использования механической обработки. SLM применяется в различных направлениях, таких как аэрокосмическая сфера, медицина, мелкосерийное производство [1].

Процесс наращивания детали начинается с разделения модели на слои толщиной 20-100 мкм, то есть создается 2D изображение каждого слоя. Для безопасной работы на SLM установке необходима защитная среда, которая устанавливается в камере аргоном или азотом. Допустимое содержание кислорода в рабочей камере менее 0.15%. На столик тонким слоем засыпается металлический порошок и разравнивается по рабочей поверхности ракелем. После чего начинается процесс плавления. В установке работают два лазера. Излучение от лазеров проходит по волноводу к коллиматору, затем попадает на фокусирующую линзу и сканатор (рисунок 1). Сканатор наводит излучение и сканирует лазерным лучом сечение определенного слоя изделия. После окончания работы с одним слоем, рабочий столик опускается вглубь колодца на величину следующего слоя. Процесс повторяется по его изображению.

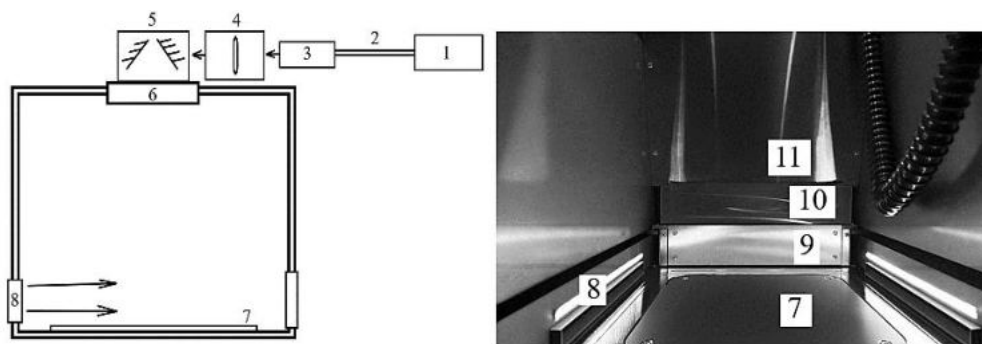


Рисунок 10 - Схема установки: 1 – лазер, 2 – световод, 3 – коллиматор, 4 – фокусирующая линза, 5 – сканатор, 6 – защитное стекло, 7 – подложка, 8 – сопло, 9 – ракель, 10 – дозатор порошка, 11 – бункер

В процессе селективного лазерного плавления подложка может нагреваться до 220°C, в зависимости от температуры плавления используемого металлического порошка. Это приводит к износу выступов в мягкой резине ракеля, следовательно к шероховатостям на поверхности изделия (рисунок 2).

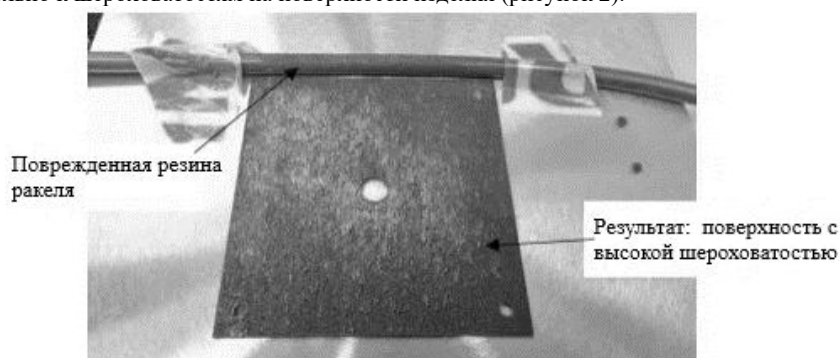


Рисунок 2 - Примеры повреждения

Важно вовремя заметить проблему, чтобы деталь не изготавливалась с дефектом. Иначе, в местах, где металлического порошка недостаточно, каждый следующий нанесенный слой будет деформирован (рисунок 3).

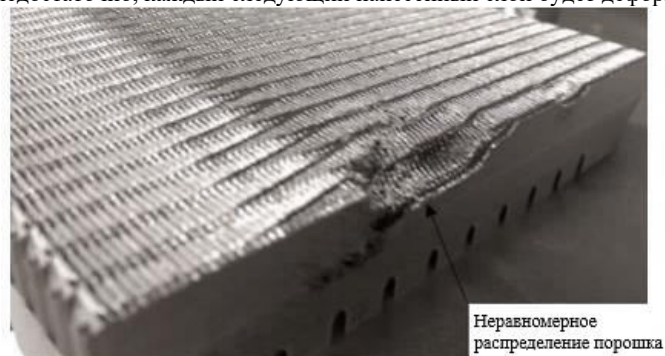


Рисунок 3 - Результат неравномерного распределения порошка на готовой детали

Учитывая особенности свойств металлических порошков под действием высокой температуры, проблему полностью устранить почти невозможно, но если ее вовремя заметить, то можно предотвратить деформацию будущей детали. Неисправности работы SLM установок позволяют обнаруживать чувствительные датчики, а также программы, анализирующие процесс функционирования. После обнаружения проблемы процесс производства полностью останавливается для замены поврежденной разравнивающей губки ракеля. В среднем одна такая губка может быть использована в течение 1-2 суток непрерывной работы. Для оптимизации конструкции, в статье выработано решение, подразумевающее размещение нескольких насадок, меняющихся без остановки производственного процесса.

На каждой стороне металлической основы предлагается закрепить ракель со специальной губкой (рисунок 4). Эта основа имеет продолжение в виде вала, на котором находится пружинный фиксатор (рисунок 5). Ракель крепится к кронштейну, осуществляющему движение по рельсе. Модуль фиксации крепится к кронштейну винтами, чтобы исключить вращательное движение. Так, ракель сможет двигаться по рельсе, разравнивая металлический порошок.

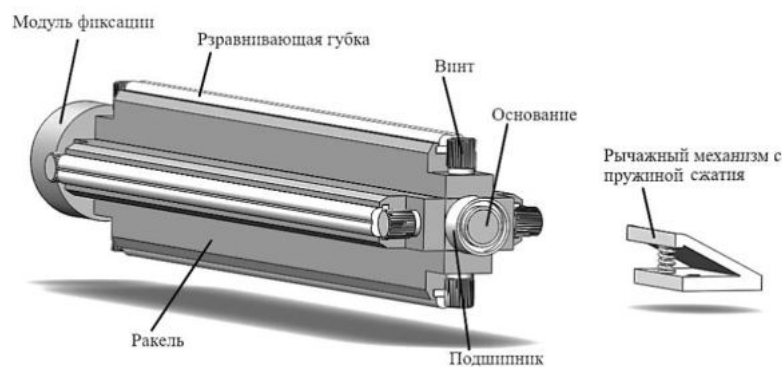


Рисунок 4 - Описание разработанной конструкции

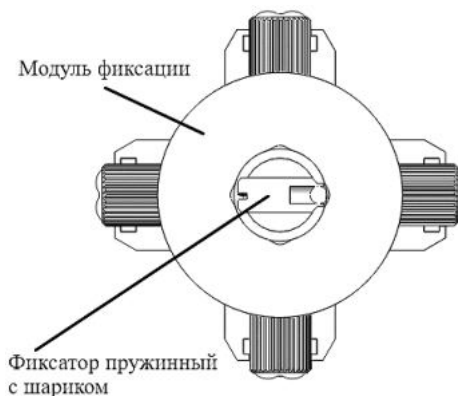


Рисунок 5 - Описание модуля крепления

В случае необходимости замены губки, ракель переезжает рабочую зону и в конце камеры попадает на препятствие с пружиной (рисунок 6). Основание корпуса препятствия будет находиться в специальной выемке, чтобы начало пружины пришлось на один уровень с началом губки. В этом случае, когда сменная насадка ракеля перекрутится, она зафиксируется и поедет в обратную сторону, пружина препятствия сожмется, замененному ракелю ничего не мешает попасть в рабочую зону.

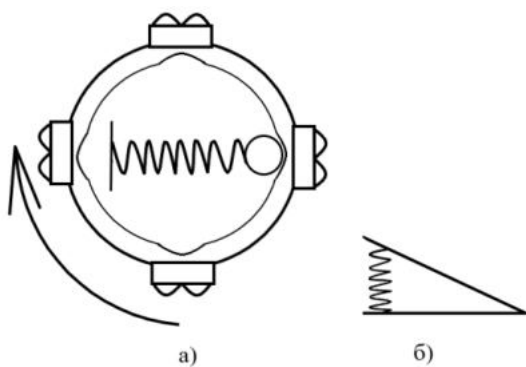


Рисунок 6 - а) ракель; б) рычажный механизм

Следующий важнейший фактор, это учет влияния высоких температур на конечный результат печати. Исходя из траектории распространения аргона с разной температурой и его воздействия на рабочую камеру, ее стенки будут удлиняться неравномерно друг другу. На потолочной части рабочей камеры, которая неразрывна со стенками, расположен сканатор энергетического комплекса, видеокамеры, освещение. Таким образом, весь оптический узел системы может отклониться от первоначального положения под некоторым углом θ . Из этого следует, что из-за некорректной работы сканатора, которая обуславливается углом отклонения потолочной части, лазерный луч, приходящий на подложку, может иметь неправильную траекторию, что также приведет к ухудшению качества производства деталей [3].

Одним из возможных вариантов решения данной проблемы предложена реализация термостабилизаторов в виде змеевиков в обеих стенках, через которые будет протекать вода. Теплообменник уменьшит воздействие разности температур на стенках внутри рабочей камеры. Коэффициент линейного расширения будет стремиться к 0 и, как следствие, не будет оказано никакого влияния на оптику. Реализация данного решения представлена на рисунке 8.

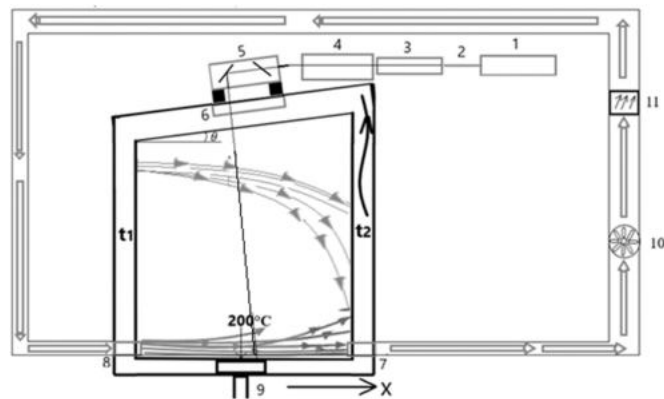


Рисунок 7 – Схема рабочей камеры с учетом воздействия высоких температур

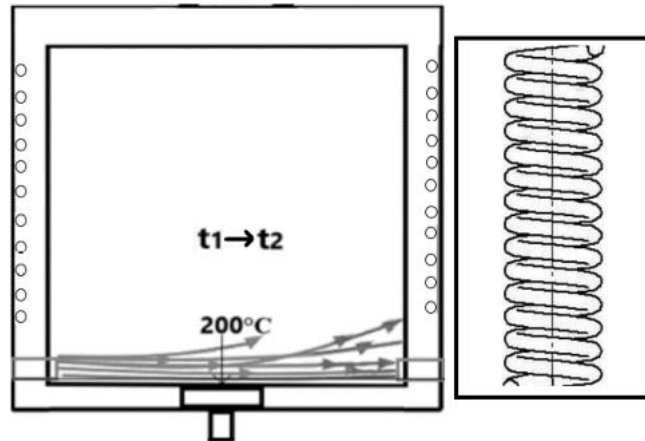


Рисунок 8 – Схема рабочей камеры с термостабилизатором

После разработки теплообменника в общую систему установки подключается чиллер. Из него вода с постоянной температурой 295K будет поступать через отверстия в обеих стенках, тем самым снимая некоторое количество тепла, пришедшего на них.

После выставления всех начальных и граничных условий с последующим запуском расчета получена траектория аргона внутри камеры (Рисунок 9), а также температура газа по мере его прохождения через подложку.

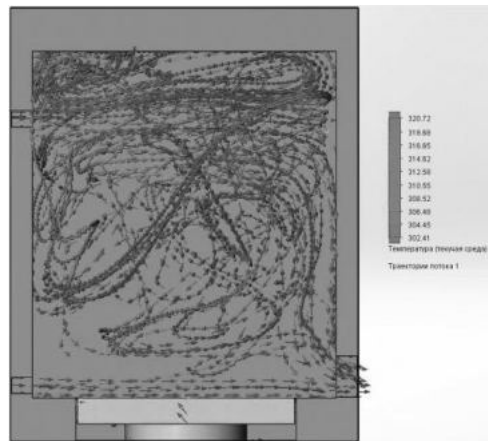


Рисунок 9 – Линии тока траектории молекул аргона

Для более точного анализа информации используется функция предоставления численных параметров температур (рисунок 10, 11).

Локальный параметр	Среднее	Площадь поверхности [m ²]
Температура (текущая среда) [K]	342.57	0.1301
Температура (твердое тело) [K]	345.00	0.1301

Рисунок 10 – Температурные параметры для стенки, из которой выходит газ

Локальный параметр	Среднее	Площадь поверхности [m ²]
Температура (твердое тело) [K]	338.41	0.1277

Рисунок 11 – Температурные параметры для стенки с входным соплом

Температура стенок отличается более чем на 6 К, что соответствует увеличению одной стенки по сравнению с другой на:

$$\Delta L_1 = L\alpha(T_1 - T_0) = 400 \cdot 22.2 \cdot 10^{-6} \cdot (345 - 298) = 0.42 \text{ мм}$$

$$\Delta L_2 = L\alpha(T_2 - T_0) = 400 \cdot 22.2 \cdot 10^{-6} \cdot (338.41 - 298) = 0.36 \text{ мм}$$

$$\Delta L = 0.42 - 0.36 = 0.06 \text{ мм} = 60 \text{ мкм},$$

где L – длина стенки в мм, α – коэффициент линейного расширения, T₂, T₁ – рассчитанные температуры стенок, T₀ – начальная температура.

При разнице стенок 60 мкм угол, на который отклонится сканирующая оптика потолочной части камеры, будет равен 0.15 мрад (при максимально предельном отклонении 50 мкрад). После выставления всех начальных и граничных условий и последующего запуска расчета получается вид траектории воды внутри теплообменника (рисунок 12).

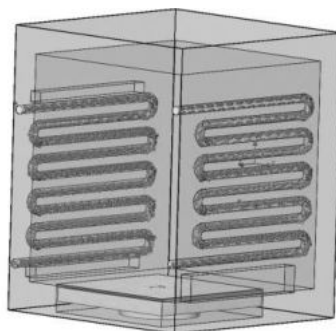


Рисунок 12 – Траектория движения воды с термостабилизатором

Для более точного анализа информации используется функция предоставления численных параметров температур (рисунок 13,14).

Локальный параметр	Среднее	Площадь поверхности [м ²]
Температура (текучая среда) [K]	303.05	0.1301
Температура (твердое тело) [K]	303.05	0.1301

Рисунок 13 – Температурные параметры для стенки, из которой выходит газ с термостабилизатором

Локальный параметр	Среднее	Площадь поверхности [м ²]
Температура (твердое тело) [K]	303.35	0.1276

Рисунок 14 – Температурные параметры для стенки с входным соплом с термостабилизатором

При данном термостабилизаторе температура выровнялась до ~303 К, а значит, его задача выполнена, так как угол отклонения близок к нулю.

В процессе изучения установки селективного лазерного плавления выявлены две актуальные проблемы современной системы, найдены пути ее совершенствования.

Библиографический список

1. Константинов В.В., Соколов Ю.А. Журнал «Аддитивные технологии» №2-2020- [Электронный ресурс] – [URL]: <https://additiv-tech.ru>
2. ГОСТ Р 2.0.182.-1.001.16. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть1. Термины и определения.
3. ГОСТ Р 2.0.182.-1.002.16. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть2. Термины и определения.

УДК 661.961.62

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ПРИСУТСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА НА МАРСЕ

Тютюнников М.С.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

В настоящее время в целом ряде стран ведется активная работа по моделированию космических полетов на другие планеты, в том числе Марс. Исследуются комплексные вопросы воздействия космической радиации на организм человека, способы защиты от галактического излучения, методы создания сооружений и конструкций на поверхности других планет и полноценного материально-технического обеспечения долгосрочных пилотируемых марсианских экспедиций. В этой связи исключительную роль играют современные способы производства деталей, позволяющие существенно снизить зависимость перспективных марсианских поселений от поставок технического оборудования, инструментов и материальных средств с Земли. При этом создание технологий, обеспечивающих достаточную степень автономности марсианских экспедиций, позволит ускорить освоение планеты и сократить затраты на отправку транспортных космических кораблей на Марс. Именно поэтому перед разработчиками перспективных марсианских экспедиций встает вопрос применения на Марсе способов производства, обеспечивающих автоматизированное изготовление деталей и конструкций с использованием наименьшего количества ресурсов и высокой производительностью, к которым относятся аддитивные технологии.

Ключевым вопросом использования аддитивных технологий в космосе является поиск пригодных для аддитивного производства материалов на Марсе, а также исследование технологических возможностей

марсианского сырья при сооружении конструкций и создании оборудования и инструментов. В этой связи одним из перспективных направлений исследований является синтез органических веществ из углеродной атмосферы Марса с последующим производством конструкций из полимерных соединений с помощью аддитивных технологий. В настоящее время учеными целого ряда стран доказана возможность получения углекислого газа из атмосферы Марса, что позволит в дальнейшем создавать более сложные органические соединения из CO_2 , являющемся сырьем для получения многих органических веществ.

Благодаря органическому синтезу на Марсе у космонавтов появится возможность создавать живые ткани, биологически активные добавки, медикаменты, лекарства и медицинские инструменты, которые будут жизненно необходимы при освоении далекой планеты. При этом современной науке уже известны способы печати лекарств и живых тканей с помощью аддитивных технологий, что в значительной мере поможет комплексно подготовиться к полету на Марс [4]. Более того, химия органических веществ отличается крайней многообразием соединений, которые могут быть сверхпрочными, сверхтвердыми, поглощать радиацию и обладать широчайшим спектром химических и физических свойств. Именно поэтому ключевое значение имеет вопрос рассмотрения перспектив использования синтезированных на Марсе органических соединений и материалов для печати сооружений и жилых помещений с помощью аддитивных технологий.

Для комплексной защиты космонавтов от космической радиации и пылевых марсианских бурь необходимо, чтобы материалы, из которых возводятся сооружения, обладали высокой прочностью и повышенной способностью поглощения радиоактивного излучения. В соответствии с последними исследованиями ученых, к таким материалам относятся органические соединения на основе углерода и редкоземельных металлов, а также полимерные вещества на основе полиамидов и сверхпрочных органических волокон, используемых для создания защитных покрытий космических кораблей [11], [16].

Тем не менее, в качестве сырья на Марсе могут быть применены не только синтезированные из атмосферного углекислого газа органические вещества. В структуру марсианского грунта входит целый спектр ферритных и кремниевых соединений, которые могут использоваться в качестве исходного сырья для создания радиационно-стойких конструкций. Несмотря на то, что наиболее очевидным вариантом размещения жилых блоков перспективной марсианской экспедиции являются подповерхностные сооружения, обеспечивающие максимальную радиационную безопасность, некоторые конструкции могут быть, так или иначе, возведены над поверхностью планеты, подразумевающие применение технологий защиты данных сооружений от радиации. В целом, перед разработчиками перспективных марсианских экспедиций стоит задача защиты космонавтов, космических кораблей, станций и перспективных постоянных поселений на других планетах от солнечной и галактической радиации. Радиационная опасность при осуществлении космических полетов является крайне высокой. До сих пор не создано эффективных способов прогнозирования всплесков солнечной активности и анализа влияния галактической радиации на организм человека, также в распоряжении науки не имеется эффективных способов полной защиты человека от проникновения космического излучения. Более того, у человека еще не имеется опыта длительного пребывания в условиях дальнего космоса под воздействием галактической радиации, в том числе вторичного излучения, возникающего при рассеивании радиоактивных частиц во внешних слоях металлических корпусов космических кораблей и не поддающегося прогнозированию.

Прикладные и фундаментальные исследования в области материаловедения позволяют проектировать перспективные марсианские сооружения для защиты организма человека от воздействия радиации. В этой связи крайне важным является создание перспективных материалов с высокой степенью поглощения радиации. В перспективе эффективная защита человека от космического излучения может быть осуществлена с помощью метаматериалов, свойства которых являются программируемыми [15]. Более того, некоторые метаструктуры могут служить исходным сырьем для аддитивного производства. Метаматериалы, которые будут использоваться в аддитивных технологиях позволят не только обеспечить высокую степень автоматизации производства, но и целый спектр до сих пор не достижимых свойств. Важно отметить, что условия микрогравитации откроют дополнительные возможности для развития направления создания метаструктур в материаловедении, так как во многом чистота полученных материалов будет зависеть от степени воздействия на них сил притяжения. В целом, использование метаматериалов на Марсе в качестве исходного сырья для аддитивного производства позволит создавать конструкции с высокой радиационной безопасностью благодаря программированию при создании материалов коэффициентов поглощения радиации.

В перспективе также может открыться возможность выращивания из метаматериалов органических тканей. Например, если какая-либо ткань человеческого тела поражена чужеродными организмами или ожогами, станет возможным напечатать некоторое количество данной ткани с помощью аддитивных технологий, которая обладала бы способностью борьбы с чужеродными организмами и была бы более пригодной для выживания в организме человека, тем самым постепенно вытесняя зараженную или поврежденную ткань и приводя к выздоровлению организма. При этом, как было сказано ранее, для создания сверхчистых и высокоточных структур искусственных биологических систем необходимо выращивать органические ткани в условиях микрогравитации, позволяющей исключить, во-первых, воздействие атмосферы и атмосферных газов на структуру биологических систем и, во-вторых, снизить влияние гравитации на конфигурацию атомов в выращенных системах, что может быть в полной мере осуществлено в рамках перспективной марсианской экспедиции.

При создании перспективных аддитивных технологий для обеспечения присутствия человека на Марсе стоит учитывать, что метод селективного лазерного спекания (СЛС) является наиболее пригодным в качестве основного способа получения деталей. Во-первых, СЛС может использоваться для создания деталей широкого диапазона точности и обеспечения целого спектра физико-химических параметров изделий [1]. Во-вторых, метод СЛС способен обеспечить наиболее автоматизированное изготовление деталей благодаря высокой степени автономности работы аддитивных технологий на основе СЛС, следовательно, СЛС будет требовать наименьшего участия человека в контроле производственного процесса. Более того, ввиду разреженности атмосферы Марса электрическую энергию для создания лазера возможно будет получать с помощью солнечных панелей.

В связи с необходимостью создания целого ряда деталей и изделий на базе аддитивных технологий для обеспечения полноценного присутствия человека на Марсе необходимо рассмотреть возможности использования

разных способов производства деталей. В таб. 1 указаны основные способы, используемые в аддитивном производстве, с приведением соответствия состояния исходного материала и способа производства [3].

Таблица 1

Основные способы производства деталей с помощью аддитивных технологий в зависимости от исходного материала и его состояния

Состояние материала	Материалы	Процесс
Жидкое	Полимеры	Стереолитография (SL) Изготовление объектов послойной наплавки (FDM) Струйная печать (JP)
Порошкообразное	Полимеры, металлы, керамика	3D-печать (3DP) Селективное лазерное спекание (SLS) Прямое лазерное спекание (DMLS) Селективная лазерная плавка (SLM)
Твердое	Металлы	Электронно-лучевая плавка (EBM) Прямое нанесение металлов (DMD) Точное лазерное формование (LENS)
	Полимеры, металлы, керамика, композиционные материалы	Послойное изготовление объектов из листового материала (LOM) Произвольное экструзионное формование (EFF)

В условиях автономного пребывания человека на Марсе не всегда будет иметься возможность изготовления сверхточных гранулированных металлических порошков, которые необходимы для метода селективного лазерного спекания, обеспечивающего наибольшую точность изготовления деталей. В этой связи необходимо использовать разные аддитивные технологии для различных целей. Так, для конструкций и деталей, к которым не предъявляются требования повышенной точности поверхностного слоя, можно использовать твердофазные аддитивные технологии, включающие в себя экструзионное формование и изготовление объектов из листового материала.

При этом для печати живых тканей на Марсе также могут быть применены лазерные способы производства, такие как селективное лазерное спекание и селективная лазерная плавка. Исходным материалом для печати живых тканей станут полимерные соединения, синтезированные из органических соединений, присутствующих в атмосфере Марса.

Несмотря на то, что в настоящее время область метаматериалов является еще не до конца изученной, в ближайшем будущем с развитием данной отрасли появится возможность использования метаматериалов в качестве исходного сырья для аддитивных технологий. Как было указано ранее, это необходимо, в первую очередь, для обеспечения наивысших параметров конструкций, изготовленных с помощью аддитивных технологий. В настоящее время науке уже известны метаматериалы с отрицательным коэффициентом преломления, что означает полное отражение материалом света [9]. Это стало возможным благодаря использованию определенным образом ориентированных нанозлементов, и тому обстоятельству, что свойства метаматериалов определяются не столько их химическим составом, сколько их структурой. Более того, метаматериалы являются полностью программируемыми, что означает возможность наделения их необходимыми свойствами. В этой связи, как указывалось ранее, наиболее перспективным направлением развития метаструктур применительно к обеспечению постоянного присутствия человека на Марсе является создание метаматериалов, экранирующих радиоактивное излучение.

Исходным сырьем для создания конструкций, поглощающих радиоактивное излучение, могут стать метаматериалы, состоящие из множества особым образом ориентированных наноспиралей, обладающих поляризационными свойствами, что обеспечивает необходимое поглощение радиации. В настоящее время рассматривается несколько видов наноструктур, обладающих электрической и магнитной поляризационной способностью, одним из которых является использование соединений на основе углерода [10].

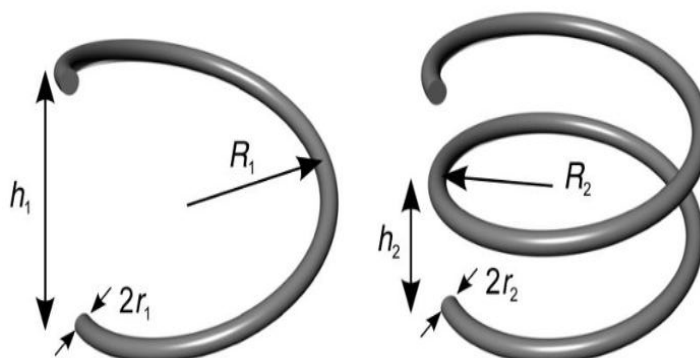


Рис. 1. Спиральные наноструктуры радиопоглощающих метаматериалов.

Источник: V. S. Asadchy, I. A. Faniayeu, Y. Ra'di, S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, S. A. Tretyakov. Broadband Reflectionless Metasheets: Frequency-Selective Transmission and Perfect Absorption. Phys. Rev. X 5, 031005 – 14 July 2015.

На рис. 1 можно видеть, что конфигурация единичных спиральных наноструктур может отличаться. В настоящее время рассматривается несколько способов ориентации элементарных ячеек метаматериалов. Количество витков в спиралевидных структурах напрямую влияет на частоту поглощаемого излучения. Так, наноструктуры с наибольшим числом витков способны поглощать высокочастотное излучение, однако неэффективны к низкочастотному. Структуры, имеющие меньшее количество витков, наоборот, более эффективны к поглощению низкочастотного излучения. Таким образом, в настоящее время метаматериалы пока не способны поглощать весь спектр радиоактивного излучения и эффективны только при поглощении одного диапазона излучения. Тем не менее, для расширения диапазона поглощаемого излучения возможно изготовление многослойных метаматериалов, которые будут сочетать в себе совокупность микроструктур с разной конфигурацией спиралей, что обеспечит широкий диапазон поглощения радиоактивного излучения.

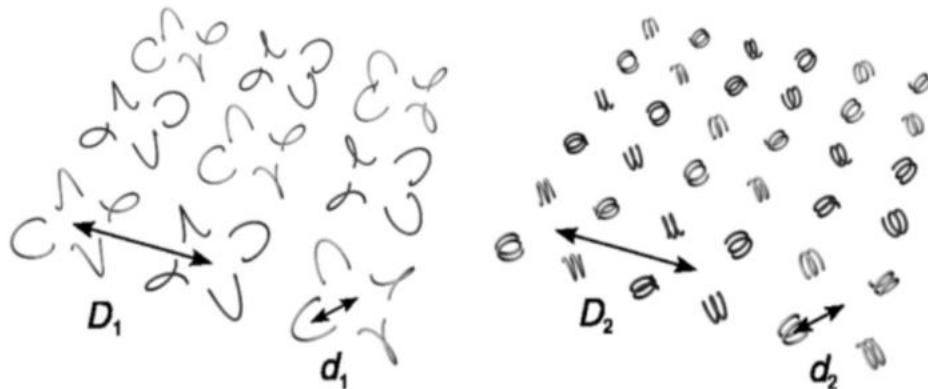


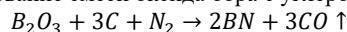
Рис. 2. Механизм поглощения метаматериалами радиоактивного излучения и взаимная ориентация спиральных наноструктур.
 Источник: V. S. Asadchy, I. A. Faniayeu, Y. Ra'di, S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, S. A. Tretyakov. Broadband Reflectionless Metasheets: Frequency-Selective Transmission and Perfect Absorption. Phys. Rev. X 5, 031005 – 14 July 2015.

На рис. 2 четко усматривается взаимная ориентация наноструктур в зависимости от количества спиралей единичных элементов. Низкочастотное излучение более эффективно поглощается одновитковыми спиральными структурами и не поглощается материалом, поэтому для поглощения радиоактивного излучения высоких частот более эффективно использовать многовитковые спирали, обеспечивающие экранирование радиации благодаря компактному расположению.

Метаматериалы также обладают значительным потенциалом в качестве исходного сырья для создания инженерных инструментов для перспективных марсианских экспедиций. В настоящее время сделан существенный скачок в печати полимерных метаматериалов, состоящих из пластичных ячеистых структур, с помощью аддитивных технологий. Изделия, имеющие в своей основе ячеистые структуры отличаются повышенной пластичностью, которая сочетается с высокой прочностью и простотой изготовления.

При использовании известных полимерных и металлических материалов в аддитивном производстве приходится осуществлять печать нескольких составляющих одного инструмента по отдельности и затем проводить их сборку. Применение ячеистых структур, наоборот, позволит проводить печать всего инструмента сразу за счет особых механических свойств материалов на основе ячеистых структур – изменение ориентации одной ячейки в пространстве приводит к соответствующему изменению положения другой ячейки, благодаря чему по принципу «домино» осуществляется работа всего инструмента. Следовательно, при использовании материалов с ячеистыми структурами отсутствует необходимость сборки составляющих частей и имеется возможность печати всего инструмента сразу. Более того, использование органических полимерных структур для инструментального обеспечения перспективных марсианских экспедиций позволит значительно сократить объемы потребления металла, добыча которого в условиях полной автономности на Марсе является весьма затруднительной.

В настоящее время одним из наиболее развивающихся направлений в создании перспективных материалов для аддитивных технологий является использование способов прогнозирования кристаллической структуры веществ с помощью программных средств. К таким методам относится эволюционный механизм USPEX, позволяющий предсказывать кристаллическую структуры веществ, зная только их состав [13], [14]. В настоящее время с помощью программного метода USPEX осуществлено прогнозирование структур сверхтвердого нитрида бора и обнаружено уникальное состояние вещества при сверхвысоких давлениях, в условиях которых нитрид бора по параметрам твердости приближается к характеристикам алмаза [12]. При этом использование сверхтвердых соединений будет играть важную роль при освоении других планет, так как для создания необходимых инструментов для механической обработки изделий и обеспечения производства деталей в условиях автономности пребывания человека необходимо обеспечить высокое качество изготавливаемых конструкций. При этом производство синтетических алмазов на Марсе может быть затруднительно в связи с необходимостью создания сверхвысоких давлений и использования специфических катализаторов. Именно нитрид бора, обладающий высокой твердостью и являющийся более простым в получении, представляет собой наиболее рациональный вариант сверхтвердого материала для обеспечения потребностей перспективных марсианских экспедиций. Исходной реакцией для получения нитрида бора является азотирование смеси оксида бора с углеродом при температуре более 1473 К.



В грунте Марса имеются залежи бора, обнаруженные в результате целого ряда автоматических марсианских миссий. Бор, содержащийся в марсианском грунте, может служить для получения оксида бора, необходимого для осуществления базовой реакции получения нитрида бора. В свою очередь, полученный нитрид бора может быть использован для изготовления порошков для аддитивных технологий.

Обеспечение перспективных марсианских экспедиций сверхтвердыми материалами, включая нитрид бора, позволит открыть дополнительные возможности для осуществления сложных технологических операций по механической обработке деталей на Марсе.

Таким образом, можно сделать целый ряд выводов в отношении перспектив использования аддитивных технологий для обеспечения постоянного присутствия человека на Марсе:

1) Аддитивные технологии позволят создать всеобъемлющее материально-техническое обеспечение перспективных марсианских экспедиций в условиях полной автономности и ограниченности поставок материалов с Земли

2) Содержащийся в атмосфере Марса углекислый газ, являющийся исходным сырьем для получения многих органических соединений, может использоваться для синтеза различных органических веществ, включая полимерные и нанокристаллические структуры

3) Синтез органических соединений на Марсе позволит осуществлять создание биоструктур и живых тканей с помощью аддитивных технологий

4) Наиболее эффективным методом получения изделий с помощью аддитивных технологий на Марсе является способ селективного лазерного спекания, ввиду высокой точности изготовления деталей и широкого диапазона работы, ввиду чего селективное лазерное спекание может быть использовано для изготовления целого ряда изделий, обладающих разными свойствами

5) Использование метаматериалов в качестве исходного сырья для аддитивных технологий позволит обеспечить радиационную защиту марсианских конструкций и сооружений

6) Достижение высокой радиационной защищенности перспективных марсианских экспедиций может быть достигнуто благодаря многослойной структуре сооружений на Марсе, оболочка которых будет состоять из нескольких слоев метаматериалов, единичные структуры которых будут представлять спиралевидные элементы с различным числом витков, соответствующим частоте поглощаемого радиоактивного излучения

7) Синтезированные на Марсе органические соединения могут быть использованы для создания полимерных метаматериалов на основе ячеистых структур, являющихся эффективным сырьем для печати инженерных инструментов и приспособлений

8) Использование эволюционных методов прогнозирования кристаллических структур химических соединений позволит сделать значительный прогресс в создании перспективных материалов для аддитивных технологий, обладающих свойствами сверхпластичности, высокой твердости и прочности.

В целом, использование аддитивных технологий в перспективных марсианских экспедициях позволит существенно повысить устойчивость долгосрочных экспедиций к любым изменениям внешней среды на Марсе, внештатным ситуациям и значительно ускорит освоение Красной планеты.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии - доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. 2015. № 2 (11). С. 52-55.
2. Циолковский К.Э. Труды по ракетной технике. Под редакцией М. К. Тихонравова. – М: Оборонгиз, 1947. – 368 с.
3. Кузнецов П.А., Васильева О.В., Теленков А.И., Савин В.И., Бобырь В.В. Аддитивные технологии на базе металлических порошковых материалов для российской промышленности // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2. С. 4-10.
4. Эксперимент по печати живых тканей на биопринтере на МКС признали успешным. [Электронный ресурс] // ТАСС; URL: <https://tass.ru/kosmos/6013293/> (дата обращения: 04.04.2022).
5. Новая орбитальная станция станет прообразом модулей для полетов к другим планетам. [Электронный ресурс] // ТАСС; URL: tass.ru/kosmos/12230573/ (дата обращения: 04.04.2022).
6. Рогозин рассказал о возможном методе получения порошков для 3D-печати в космосе. [Электронный ресурс] // ТАСС; URL: <https://tass.ru/kosmos/6705508/> (дата обращения: 04.04.2022).
7. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2014. № 78. С. 31.
8. В ракете «Амур» будут применяться композиты, 3D-печать и бионический дизайн. [Электронный ресурс] // Роскосмос; URL: <https://www.roscosmos.ru/30854/> (дата обращения: 04.04.2022).
9. В. М. Агранович, Ю. Н. Гартштейн. Пространственная дисперсия и отрицательное преломление света // Успехи физических наук. — Российская академия наук, 2006. — Октябрь (т. 176). — С. 1051—1068.
10. E.L. Dziridzuri, A.A. Vasiliev, A. Yu Nalivaiko, D. Yu Ozherelkov, N.S. Zakharova, A.S. Shinkaryov, A.A. Gromov. In-situ synthesis and characterization of powdery nanocomposite «carbon nanotubes/nanoalumina» // Composites Communications. Volume 22, 2020 // URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S245221392030262X>.
11. Gustavo Gonzalez, Annalisa Chiappone, Ignazio Roppolo, Erika Fantino, Valentina Bertana, Francesco Perrucci, Luciano Scaltrito, Fabrizio Pirri, Marco Sangermano. Development of 3D printable formulations containing CNT with enhanced electrical properties // Polymer. Volume 109, 2017. pp. 246-253.
12. Oganov A.R., Saleh G., Kvashnin A.G. Computational Materials Discovery. Royal Society of Chemistry. London: 2018.
13. Semenok D.V., Troyan I.A., Ivanova A.G., Kvashnin A.G., Kruglov I.A., Hanfland M., Sadakov A.V., Sobolevskiy O.A., Pervakov K.S., Lyubutin I.S., Glazyrin K.V., Giordano N., Karimov D.N., Vasiliev A.L., Akashi R., Pudalov V.M., Oganov A.R. Superconductivity at 253 K in lanthanum–yttrium ternary hydrides. Materials Today. – 2021. – pp. 18-28.
14. Weiwei Zhang, Artem R. Oganov, Alexander F. Goncharov, Qiang Zhu, Salah Eddine Boulfelfel, Andrey O. Lyakhov, Elissaios Stavrou, Maddury Somayazulu, Vitali B. Prokopenko, Zuzana Konopkova. Unexpected Stable Stoichiometries of Sodium Chlorides // Science. - 2013. - №Vol 342, Issue 6165. - pp. 1502-1505.
15. Zouhdi, Saïd; Ari Sihvola; Alexey P. Vinogradov. Metamaterials and Plasmonics: Fundamentals, Modelling, Applications. New York: 2008. - 106 pp.
16. Songa J.L., Lia Y.T., Dengb G.L. Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering // Journal of Materials Processing Technology, 2007. pp. 614-618.

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПРУЖИН В СУДОВОЙ И ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЕ ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Ленина В.А., Храмова Д.А., Беспалов Д. А.

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

Ключевые слова: пружины, заневоливание, титановый сплав ВТ23, релаксация, осадка.

При строительстве современных АЭС особое внимание уделяется безопасности. Немаловажную роль в системе АЭС занимает трубопроводная арматура, которая включает в себя запорную, регулирующую и предохранительную аппаратуру. При высоких давлениях и при больших диаметрах трубопроводов сама арматура может стать источником возникновения нештатных ситуаций, поэтому главное направление в развитии основных трубопроводов на атомной станции — применение, возможно, более простой и надёжной арматуры. Перед конструкторами-проектировщиками систем безопасности паровой арматуры стояла задача разработки клапана, назначение которого заключается в том, чтобы обеспечить быстрое отключение трубопровода для предотвращения аварии. В качестве конструкции выбран отсечный запорный тип клапана, такой вид арматуры выступает в качестве активного предохранителя от протечек и затопления. Необходимым требованием к работе данного клапана является его быстрдействие, которое обеспечивается срабатыванием пружины, входящей в конструкцию клапана. Кроме этого, при проектировании клапана необходимо иметь пружину, которая позволит использовать клапан длительное время. Выбор материала определяется условиями непосредственного воздействия: температуры, среды эксплуатации и вида нагружения. Конструкторами-проектировщиками при проектировании предохранительного клапана в качестве материала для пружины была выбрана рессорно-пружинная сталь марки 50ХФА. В качестве конструкции пружины выбрана винтовая цилиндрическая пружина сжатия. Геометрические размеры были рассчитаны из учёта требуемого рабочего усилия, расчётное касательное напряжение τ_2 , составило 569 МПа. Пружина эксплуатируется в условиях воздействия влаги, что требует дополнительного нанесения антикоррозийного покрытия. Для защиты от коррозии было выбрано нанесение цинкового покрытия.

Изготовленная пружина была установлена в клапан для проведения испытания на стенде при температуре эксплуатации 300 °С. По результатам испытаний оказалось, что клапан не срабатывает при заданном понижении давления. Для выявления причин обратились к специалистам ОАО «НИПИ «Пружинный Центр». Проведённое испытание пружины показало, что пружина после испытания на стенде имеет релаксацию напряжений и соответственно уменьшение силовой характеристики до 15 %, что привело к несрабатыванию клапана при испытании на стенде.

Для проверки стабильности работы пружины из стали марки 50ХФА были изготовлены макеты пружин с тремя уровнями максимальных касательных напряжений [τ_3]: 400, 600 и 800 МПа. И проведены тепловые испытания (горячее заневоливание) при температуре 300 °С. Результаты испытаний представлены на рисунке 1.

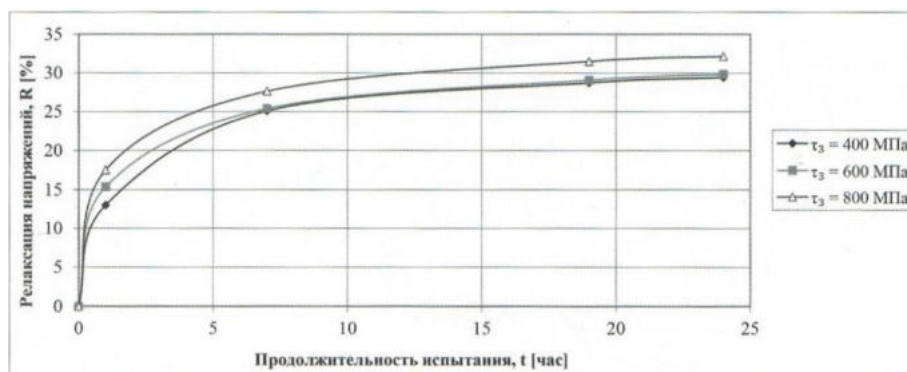


Рисунок 1 – Релаксация напряжений в винтовой цилиндрической пружине из титанового из стали марки 50ХФА в процессе горячего заневоливания при температуре 300 °С

Как видно из представленного графика, релаксация напряжений в пружине — более 30 %, независимо от уровня начальных максимальных касательных напряжений, уже при 24 часах выдержки. Испытания показали, что данный материал непригоден для пружины в данном клапане. Было предложено использовать титановый сплав ВТ23, а также заменить конструкцию пружины на пакет тарельчатых пружин. Цель, которую преследовали специалисты Пружинного Центра, - разработать конструкцию с сохранением силовых характеристик в имеющихся габаритах с минимальными напряжениями. Для стабилизации напряжений и повышения релаксационной стойкости изготовленные тарельчатые пружины подверглись горячему заневоливанию, результаты испытаний представлены на рисунке 2.

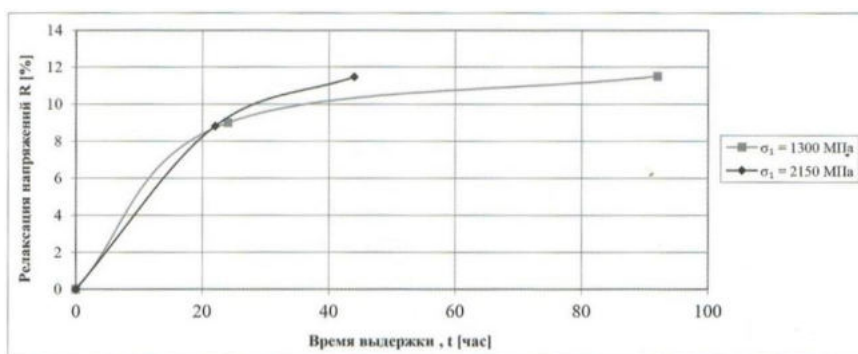


Рисунок 2 – Релаксация напряжений в тарельчатых пружинах из титанового сплава VT23 в процессе горячего заневоливания при температуре 300 °С

Полученные результаты показывают, что максимальная релаксация напряжений происходит на первой этапе при выдержке более 20 часов и составляет не более 9,0 %, а значения начальных напряжений σ_1 не влияют на релаксацию напряжений. При этом релаксация напряжений у винтовых пружин сжатия из стали 50ХФА при выдержке 1 час составляет от 13 до 17 % в зависимости от начальных напряжений τ_3 . Увеличение времени выдержки до 98 часов при горячем заневоливании титанового сплава VT23 не приводит к значительному росту релаксации напряжений и составляет +2...5%. Изготовленный пакет тарельчатых пружин из титанового сплава VT23 [5, 6] был испытан на стенде в составе клапана, результаты испытания показали стабильность срабатывания клапана, но при настройке клапана возникли сложности. Из-за высокой жесткости пружины настройка срабатывания на определенное значение давления была затруднительна ввиду особенностей узла настройки. Специалистами Пружинного Центра было предложено уменьшить жесткость пакета пружин за счёт уменьшения высоты тарельчатой пружины, при этом общая высота пакета и сохранение рабочего усилия обеспечивается увеличением количества пружин. Увеличение количества тарельчатых пружин в пакете позволило добиться снижения жёсткости практически вдвое, что позволило облегчить настройку срабатывания клапана. Для оценки распределения максимальных напряжений выполнен расчёт с использованием программы ANSYS, результаты расчёта приведены на рисунке 3. На приведенных иллюстрациях изображён вырезанный из пакета тарельчатых пружин сегмент 30° в плане и пара тарельчатых пружин. Картина распределения главных максимальных напряжений показана в диапазоне от 50 % условного предела текучести (465 МПа) до 100 МПа.

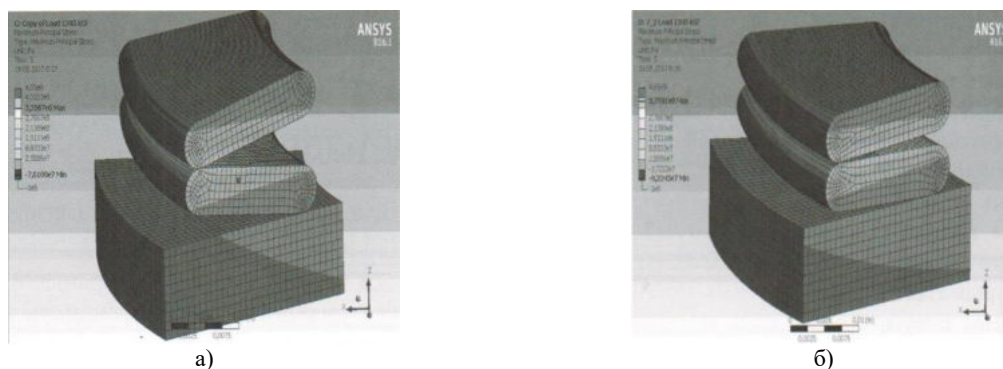


Рисунок 3 – Распределение главных максимальных напряжений в пакете: а – при первоначальной жесткости пакета; б – после уменьшения жесткости пакета

Для подтверждения правильности выбора материала и конструкции пружин проведены длительные испытания при температуре 300 °С, результаты испытания представлены в виде диаграммы на рисунке 4.

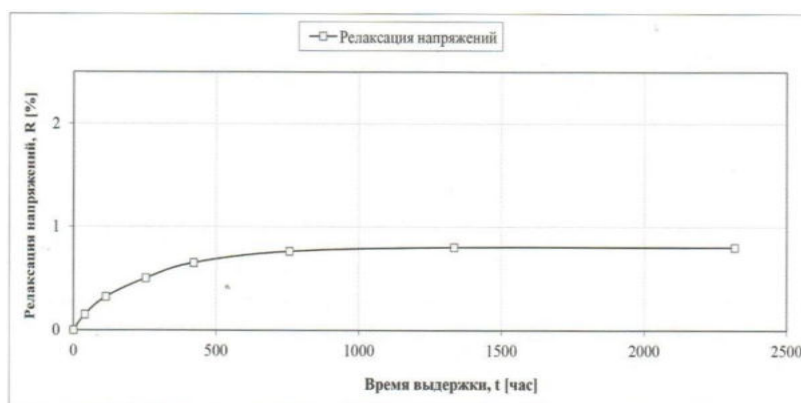


Рисунок 4 – Релаксационная стойкость тарельчатых пружин из титанового сплава VT23 при статистических испытаниях при температуре 300 °С

По результатам испытаний видно, что технология изготовления тарельчатых пружин из титанового сплава BT23 позволяет гарантировать стабильную работоспособность пакета пружин в процессе длительной эксплуатации. Тем самым подтверждается работоспособность титанового сплава BT23 при 300 °С. Ещё одно преимущество титанового сплава BT23 перед 50ХФА - это высокая коррозионная стойкость.

Результатами испытания на стенде пакета тарельчатых пружин с уменьшенной высотой была подтверждена работоспособность клапана при заданном падении давления. После испытаний пакет тарельчатых пружин был повторно испытан, по результатам испытаний изменение геометрических и силовых характеристик не наблюдалось. Проведённая работа ещё раз доказывает необходимость при проектировании узлов, в составе которых имеется пружина, принимать во внимание температуру воздействия на пружину [7,8], среду и вид нагружения, а конструкцию рассчитывать таким образом, чтобы напряжения в материале пружины соответствовали условиям её работы.

Библиографический список

1. ГОСТ 14959-79. Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия.
2. ГОСТ 13764-86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Классификация.
3. Рахштадт, А. Г. Пружинные стали и сплавы: 3-е изд., перераб. и доп. / А. Г. Рахштадт. - М.: Металлургия, 1982. — 400 с.: ил.
4. Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник / А. А. Ильин, Б.А. Колачёв, И. С. Полькин. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 520 с.: ил.
5. Ремшев Е.Ю. Применение метода акустической эмиссии для контроля качества тарельчатых пружин из сплава BT23 // Металлообработка. СПб. – 2012. - № 4.- С.27-33.
6. Беспалов Д. А., Силаев М. Ю., Ворошилин В. В., Ремшев Е. Ю. Оценка параметров качества винтовой пружины сжатия из стали 65С2ВА акустическими методами// Металлообработка. СПб. – 2014. - № 3. - С.48-51.
7. Беспалов Д.А., Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А. Воробьева Г.А., Пехов В.А. Влияние режимов термообработки на физико-механические свойства проволоки из никельхромкремнистой бронзы // Вестник машиностроения М. - 2017. - №10 - С. 65-68.
8. Ремшев Е. Ю., Данилин Г. А., Титов А. В., Ермоленков П. А. Контроль технологических и эксплуатационных свойств изделий из титановых сплавов методом акустической эмиссии // Труды МАИ №99. М.-2018.- №99.-С.22-24

УДК 621.079.01

ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Маликов И. О., Ведер Б. Р., Дуров Д. С.

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Аннотация: В работе рассмотрено влияние, виды, характер и причины дефектов, возникающих на границе зоны сварного соединения, зоны термического влияния и основного металла, на прочность сварных соединений. Сформулировано предложение по применению поверхностной отделочно-упрочняющей обработки для создания сжимающих напряжений в зоне перехода наплавленного металла в основной с целью повышения усталостной прочности сварного соединения.

Ключевые слова: сварное соединение, усталостная прочность, дефекты, поверхностная отделочно-упрочняющая обработка.

По линии сплавления на участках сварного шва могут возникать продольные и поперечные трещины, начинающиеся обычно от пор и окисных включений [1, 2]. Такие дефекты располагаются в основном на границах сплавления подварочных валиков с металлом основного шва, а многократные подварки швов повышают остаточные напряжения, снижают механические свойства и эксплуатационную надежность сварной конструкции, особенно при воздействии переменных нагрузок. Сварные соединения с мягким (менее прочным) швом чувствительны к дефектам, особенно с увеличением степени их механической неоднородности. Смещение плоскостного дефекта из центральной части шва к границе сплавления твердого и мягкого металлов приводит к изменению напряженного состояния сварных соединений [1]. При расположении дефекта на границе сплавления предельное напряжение меньше, чем когда дефект расположен в центральной зоне шва, при условии совпадения размеров дефектов и механических свойств менее прочного металла [3].

Поверхностные дефекты опаснее внутренних, т.к. коэффициент концентрации напряжений по краям для поверхностного дефекта больше, чем для внутреннего. Из приведенных в работе [4] данных известно, что показатель деформационного упрочнения термообработанного металла ниже, чем нетермообработанного, а его повышение будет способствовать улучшению работоспособности. Актуальными являются исследования, которые нацелены на снижение количества сварных дефектов или их видоизменение на менее чувствительные, а также на применение методов поверхностного пластического воздействия на материал сварного шва и околошовной зоны. Упрочнению могут подвергаться сварные соединения конструкций, изготовленных из малоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей, а также сплавов алюминия и титана.

Поверхностное упрочнение сварных соединений, направленно на создание в зоне перехода наплавленного металла в основной металл пластических деформаций сжатия для повышения циклической долговечности сварного соединения. Пластические деформации сжатия могут создаваться различными методами, в частности при помощи игл – ударников, металлической дроби, щеток и других видов ударников с использованием специального оборудования. Поверхностное упрочнение следует применять на сварных соединениях, работающих в условиях коррозии и вибрации, при циклических нагрузках, в ответственных узлах. В некоторых особо ответственных конструкциях, а также в конструкциях, к которым предъявляются повышенные требования к точности, рекомендуется дополнительно проводить послешовое упрочнение сварных швов, за исключением корневого прохода. Поверхностное упрочнение на ответственных стыковых соединениях, работающих в условиях циклической нагрузки, а также для повышения коррозионной стойкости рекомендуется выполнять с двух сторон [5].

Металлическое тело характеризуется напряженным состоянием, обусловленным неоднородностью пластических, линейных или объемных деформаций [6, 7]. Возникновение и распределение остаточных напряжений связано с деформацией конструкции, которая в общем случае определяется изменением взаимного расположения материальных точек внутри или на поверхности изделия, а также с различными процессами, происходящими в металле, причем в течение одной технологической операции могут действовать несколько факторов различной природы, порождающие их появление. Обычно сварные конструкции состоят из большого числа элементов и сварных швов, внутренние напряжения которых взаимодействуют и могут распределяться различным образом, а последовательность при сварке и жесткость свариваемых элементов оказывают существенное влияние на их уровень.

Выбор способа упрочнения обоснован требованиями качества поверхностного слоя, конструктивно-технологическими особенностями упрочняемых узлов и условиями работы конструкций. Конкретный метод выбирается с учетом возможности его применения в реальных производственных условиях, наличии необходимого оборудования, его мобильности, обеспечения наиболее благоприятных санитарно-гигиенических условий труда, наименьшей трудоемкости и максимальной производительности процесса упрочнения. Среди известных и наиболее часто применяемых методов поверхностной отделочно-упрочняющей обработки может быть применена обработка шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ), при которой оказывается ударное воздействие тонких стержней инструмента на сварной шов вблизи его границы, благодаря чему в поверхностном слое материала формируются сжимающие напряжения, что способствует сокращению размеров поверхностных и подповерхностных дефектов сварного шва, а также сдерживает формирование и развитие усталостных трещин.

Дефекты поверхности, образовавшиеся в процессе деформации. Задир поверхности основного металла – повреждение поверхности, вызванное удалением путем отрыва временного технологического крепления.

Дефект от вдавливания в слиток кернов клещей крана – углубления на блюмах и слябах, образовавшиеся от вдавливания острых кернов клещей крана в горячие слитки при их транспортировке. По виду дефект напоминает единичную чечевицеобразную, широко открытую сравнительно короткую трещину [12].

Трещины напряжения образуются в слитках и в деформированном металле при его переделах и имеют ряд разновидностей. Наиболее часто встречаются трещины, образовавшиеся при:

- охлаждении стали, в процессе которого произошло мартенситное превращение;
- вылеживании стали с мартенситной структурой;
- медленном нагреве наклепанных дисперсионнотвердеющих сплавов;
- нагреве или охлаждении высокохромистых сталей ферритного класса;
- при быстром нагреве сталей с высокой твердостью и малой пластичностью.

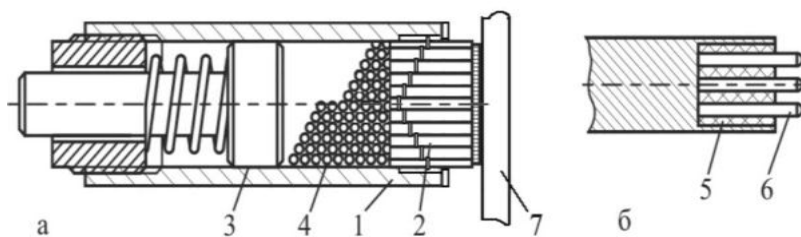
Образование трещин напряжения при мартенситном превращении зависит от состава стали и режимов охлаждения металла и практически не зависит от способа выплавки. Наиболее склонны к трещинам напряжения, возникающим при охлаждении после

горячей деформации, стали мартенситного и мартенсито-ферритного классов. После ускоренного охлаждения (в воде, масле и других средах) появление трещин наблюдается и у сталей перлитного класса.

Для предупреждения образования трещин при нагреве дисперсионнотвердеющих сталей и сплавов следует интервал температур выделения упрочняющей фазы проходить по возможности быстро до температуры растворения фазы и рекристаллизации металла. Если из-за больших размеров изделий осуществить быстрый нагрев сложно, то не следует допускать низкой температуры окончания горячей деформации в целях предупреждения наклепа. В сталях ферритного и феррито-мартенситного класса, главным образом высокохромистых, причиной возникновения трещин напряжения может быть выделение α -фазы в интервале температур от 750 до 850 °С как при охлаждении, так и при нагреве. Наряду с изменениями объема в этом случае происходит охрупчивание металла. Для предупреждения трещин необходимо избегать длительного пребывания стали при температурах выделения α -фазы и обеспечивать быстрое охлаждение ее от 850 °С [12].

С увеличением размеров трещиноподобных дефектов при одинаковой относительной толщине мягкого шва характеристики пластичности сварного соединения резко уменьшаются, хотя форма внутреннего дефекта, близкая к кругу в меньшей степени провоцирует развитие трещин [8]. Следует полагать, что после обработки ШСУ дефекты, которые ранее имели вытянутое строение, могут принимать более округлую форму, что положительным образом влияет на снижение коэффициента концентрации напряжений, а дефект, ранее вытянутый вдоль направления поверхности детали, начинает испытывать сжимающие напряжения, которые не дают ему развиваться в трещину. При этом он оказывает меньшее влияние на процесс трещинообразования, чем дефект, расположенный перпендикулярно поверхности. Обработка ШСУ осуществляется системой стержней, а радиус скругления дна отпечатков на детали зависит от радиуса их заточки.

Обработка стержнями малого диаметра позволяет улучшить напряженное состояние поверхностного слоя, но имеет ограничения из-за потери осевой устойчивости самих стержней, из-за чего их диаметр при их обычных линейных размерах, как правило, не должен быть менее 2-2,5 мм. На торец каждого стержня должен воздействовать хотя бы один шар, их максимальный диаметр, ограничен диаметром применяемых стержней, а минимальный диаметр шаров обусловлен требованиями отсутствия их просыпания в зазорах между стержнями. В связи с этим для поверхностной отделочной упрочняющей обработки может быть использовано устройство ШСУ, схема которого представлена на рисунке 1, а, а его деформирующий элемент на рисунке 1, б [9, 10]. Устройство способствует созданию сжимающих напряжений в материале поверхностного слоя ближе к поверхности детали, что позволяет обеспечить повышение удельной энергии, прикладываемой к обрабатываемой поверхности материала, без увеличения мощности самого инструмента. При этом может быть обеспечена возможность простой замены контактной деформирующей части инструмента в соответствии с требуемыми характеристиками упрочняющего воздействия, конфигурацией детали и иными факторами.



1 – сборный корпус; 2 – деформирующие стержневые элементы;
3 – плунжер; 4 – распределительный элемент (слой шариков);
5 – упругая вставка; 6 – индентор; 7 – обрабатываемая поверхность

Рисунок 1 – Устройство для поверхностной отделочно-упрочняющей обработки – а; деформирующий стержневой элемент – б

При работе устройства [9] происходит передача ударного импульса от плунжера 3, размещенного в сборном корпусе 1 и приводимого в движение пневмомо- или электромагнитным молотком, а также специальным виброударным устройством (не показано), через замкнутый объем слоя закаленных стальных шариков 4. Плунжер 3, получивший ударный импульс в направлении обрабатываемой поверхности 7, передает его шарикам, а те в свою очередь цилиндрическим стержням 2 с зацепами, предотвращающими их свободное выпадение из сборного корпуса 1. После взаимодействия с поверхностью стержней 2 контактной деформирующей частью со вставкой из упругого материала 5 с закрепленным в ней пучком инденторов, цилиндрические стержни 2 получают импульс отдачи, передают его шарикам 4, а те – плунжеру 3. Далее процесс продолжается по той же схеме.

Благодаря свойству псевдотекучести объема шариков расположение сферических вершин инденторов, расположенных на стержнях, может меняться, что позволяет применять данный способ для обработки как плоских, так и локальных поверхностей. Для создания регулярной топографии отпечатков требуется соблюдение энергии и количества ударов, нанесенных в одну точку, а сам пучок стержней должен двигаться по заданной траектории с необходимой скоростью [11]. Могут применяться деформирующие стержневые элементы и без инденторов, поскольку при обработке пластичных материалов инденторами с малым радиусом скругления рабочей поверхности может наблюдаться ухудшение шероховатости обработанной поверхности сварной детали.

Обработка предлагаемым устройством может найти применение при устранении дефектов сварных швов на границе сплавления, для улучшения распределения остаточных напряжений, параметров микротвердости и повышения усталостной прочности, в том числе при ремонтных работах с применением сварки.

Библиографический список

1. Остемин А.А., Дильман В.Л. Влияние дефектов сварки, расположенных на границе сплавления, на прочность сварного соединения // Вестник машиностроения. 2006. № 2. – С. 21-26.
2. Дуров Д.С., Диденко Д.И., Рыбинская Т.А. Устранение дефектов сварки на границе сплавления методами поверхностного пластического деформирующего упрочнения // Тяжелое машиностроение. 2009. № 8. – С. 26-29.
3. Дильман В.Л., Остемин А.А. Прочность механически неоднородных сварных соединений с шелевидным дефектом // Сварочное производство. 1999. № 2. – С. 12-15.
4. Исследование несущей способности труб большого диаметра / В.В. Чельшев, В.Г. Мурдуковский // Проблемы прочности. 1978. № 1. – С. 32-36.
5. Зарезин В.Е. Повышение ресурса соединений сварных узлов и конструкций железнодорожной техники. // Техно-технологические проблемы сервиса. № 4(34). 2015. – С. 26-29.
6. Технологические основы сварки и пайки в авиастроении: учебник для вузов / Фролов В.А., Пешков В.В., Коломенский А.Б., Казаков В. А. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 455 с.
7. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов (2-е изд., перераб. и доп.). – Киев: Наукова думка, 1990. – 512 с.
8. Остемин А.А., Уткин П.Б. Расчет коэффициентов концентрации напряжений внутренних технологических сварочных дефектов // Вестник машиностроения. 2008. № 12. – С. 14-17.
9. Бутенко В.И., Диденко Д.И., Рыбинская Т.А. Устройство для поверхностной отделочной упрочняющей обработки. Патент №2283744 В 24 В39/00, 20. 09. 2006 г.
10. Дуров Д.С., Диденко Д.И., Рыбинская Т.А. Поверхностно-упрочняющая обработка с предварительным нагревом поверхностного слоя детали // Тяжелое машиностроение. 2010. № 8. – С. 38-39.
11. Ягудина Р.З., Флек М.Б. Проектирование технологических процессов обработки деталей шарико-стержневым упрочнителем. // Вестник ДГТУ. 2013. Т 13, № 1-2 (70-71). – С.127-134.
12. Калининченко Н.П., Васильева М.А., Радостев А.Ю.. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебное пособие. Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011.-71с.

УДК 621.791.725

ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ГИБКИХ ВОЛНОВОДОВ ИЗ МЕДНОГО СПЛАВА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ

Самойленко Д. А.¹, Ходосов В. В.²

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева»

²Балтийский государственный технический университет ВОЕМЕХ им. Д. Ф. Устинова

В настоящее время на предприятии АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева проводится ряд исследовательских работ по получению технологии лазерной сварки заготовок гибких волноводных секций, включающий в себя разработку оснастки, методики контроля и теоретический расчет режимов сварки.

Ключевые слова: заготовка, лазерная сварка, гибкая секция, медный сплав

Отработка технологии изготовления заготовок ГВС с помощью лазерной сварки. Проведенная работа была направлена на освоение и внедрение на предприятии технологии изготовления гибких секций волноводных трактов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу создания и отработки технологи изготовления сварной трубной заготовки из которой в дальнейшем будет сформирована гофрированная часть гибкой секции.

Для определения влияния подготовки поверхности деталей под сварку, были изготовлены 7 образцов с различным видами очистки поверхности: образец №1 электрохимическое обезжиривание и травление в соляной кислоте; образец №2 электрохимическое обезжиривание, травление в соляной кислоте, снятие шлама после травления и декапирование в серной кислоте; образец №3 электрохимическое обезжиривание и глянцевое травление 1 раз 3 секунды; образец №4 электрохимическое обезжиривание и глянцевое травление 3 раза по 3 секунды; образец №5 электрохимическое обезжиривание; образец №6 электрохимическое обезжиривание и декапирование в серной кислоте; образец №7 без гальванической подготовки, обезжиривание х/б салфеткой, смоченной нефрасом. По результатам исследований способ подготовки поверхности не оказывает влияния на качество сварных швов.

В качестве способа изготовления заготовки ГВС была выбрана лазерная сварка.

Проведена экспериментальная отработка технологии изготовления сварных заготовок для гибких секций ЗГВС волноводных трактов сечением WR90 (22,9*10,16 мм) из бронзовой ленты БрБ2 толщиной 0,1 мм с применением оборудования для лазерной сварки. По результатам работ были:

Отработаны технологические режимы лазерной сварки ЗГВС. Опробована сварка 12 шт. ЗГВС сечения WR90 (22,9*10,16 мм). По результатам исследования, качество сварного шва соответствует ОСТ92-1741 и требованиям КД (фотография №1).



Фотография №1 – Внешний вид образца

Провели контроль сварного шва, выполненного методом лазерной сварки

Деталь (WR 90)

Материал БрБ2Т, t=0,1 мм

Результаты исследования

Результаты металлографического контроля поперечных сечений сварного шва с усл.



Фотография 2. Поперечное сечение № 2 сварного шва , ×200.

Из сваренного ГВС были вырезаны 3 образца (№1, №2, №4) для механических испытаний на разрыв, полученные данные сравнивались с механическими свойствами основного металла образец (№3).

Таблица №1. Испытание на разрыв.

№ образца	Максимальная нагрузка (kgf)
1	75,71
2	69,08
3	75,65
4	67,93

Образцы с 1 по 4

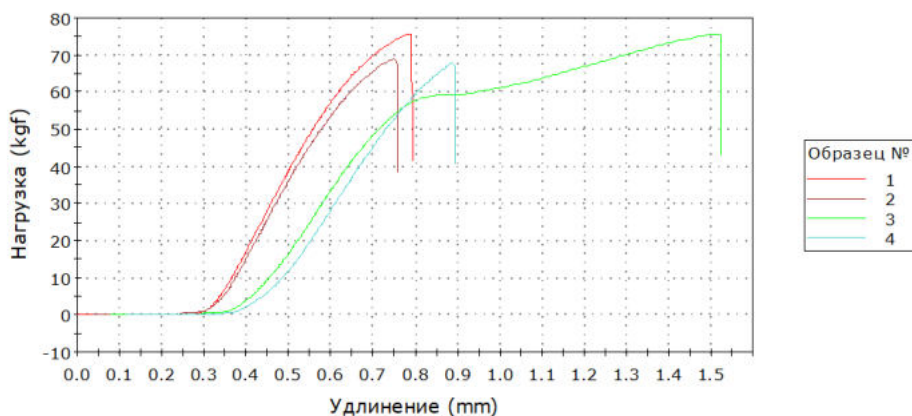
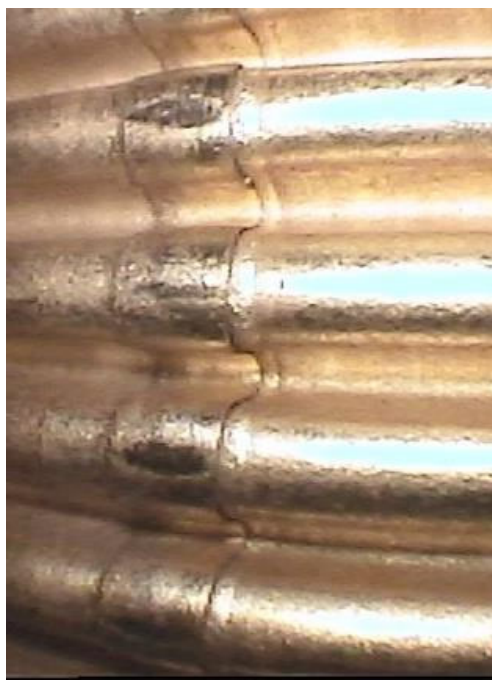


Рисунок №1. Зависимость kg*f к удлинению мм.

Полученные сварные швы соответствуют 90-100% прочности основного металла.
Из полученной ЗГВС был изготовлен образец гибкой волноводной секции (фотография №3)



Фотография №3. Внешний вид гибкой волноводной секции, полученной из сварной заготовки ГВС



Фотография №4 – Внутренняя сторона гофрированной заготовки ГВС в области сварного соединения

С помощью эндоскопического исследования был проведён контроль внутренней поверхности гибкой волноводной секции в области сварного соединения.

Библиографический список

1. Сварка лазером [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сварка_лазером [дата обращения 30.07.2019].
2. Григорьянц А. Лазерная сварка сталей больших толщин с применением мощных оптоволоконных и CO₂ – лазеров / Григорьянц А., Грезев А., Грезев В. // Фотоника. – 2012. – 6 с.
3. Лазерная сварка металлов: преимущества и недостатки [Электронный ресурс]. – URL: <https://svarka.guru/vidy/thermo/lazernaja.html> [30.07.2019].
4. Кузнецов М. В. Лазерная сварка. – С.-Пб., 2017. – 14 с.

На этапе разработки эскизного проекта инженерами прорабатываются основные технические решения, которые предлагается применить в проектируемом изделии. В числе прочего, к таким техническим решениям относится конструкция отдельных узлов и агрегатов, являющихся частью изделия, как системы. Подобные технические решения должны быть показаны на чертеже общего вида, дающего представление о компоновке изделия, расположении, устройстве и функционировании его составных частей. Как правило, проектирование и, в особенности, создание эскизов для выносных видов отдельных узлов изделия занимает значительную часть рабочего времени инженера-конструктора. Для ускорения процесса проектирования существует большое количество систем автоматизации проектных работ. Однако, подобные системы и их функционал ориентированы на широкий спектр инженерных задач и не содержат в себе инструментов для автоматизации работы над уникальными элементами, применение которых возможно в узкоспециализированной области.

В статье рассказывается о результатах разработки САПР для проектирования отдельных узлов изделий РКТ, и демонстрируется работа системы на примере проектирования коаксиального соединительного узла маршевой ступени противокорабельной ракеты и стартового ускорителя.

Общий принцип работы САПР заключается в следующем: пользователь выбирает один из типовых узлов изделия, который требуется рассчитать и изобразить на эскизе, вводит требуемые проектные параметры, программа рассчитывает проектные характеристики и, при необходимости, по требованию пользователя, формирует эскиз проектируемого узла.

Для реализации расчетной части системы требуется построить математическую модель, позволяющую по заданным проектным параметрам проектируемого узла рассчитать его проектные характеристики. В качестве одного из подобных узлов могут выступать различные соединительные узлы, устройства систем разделения (толкатели), воспламенители для РДТТ и т.д.

С целью апробирования технологии разработки задуманной системы, исходя из соображений простоты математической модели и небольшого количества отображаемых на эскизе элементов, для проектирования был выбран коаксиальный соединительный узел. Принцип работы такого узла достаточно прост. Два отсека изделия соединены коаксиально («цилиндр в цилиндре»): отсоединяемый отсек (предыдущая ступень – как правило, стартовый ускоритель) имеет соединительный торцевой шпангоут большего диаметра, чем отсек, присоединяемый к нему (последующая ступень). Шпангоут меньшего диаметра вставляется в шпангоут большего диаметра. Фиксация положения шпангоутов друг относительно друга осуществляется с помощью штифтов, расположенных по периметру узла в количестве не менее 3 штук и запрессованных в сквозные отверстия, выполненные радиально. В процессе транспортировки, хранения и предстартовой подготовки соединенные подобным образом ступени сохраняют свое устойчивое положение. После старта изделия, в результате воздействия на узел тяги твердотопливного ускорителя, штифты по всему периметру узла срезаются и далее, пока работает ускоритель, ступени, фактически разделены. Вторая ступень опирается в специально выполненную на торцевом шпангоуте первой ступени «полку». Таким образом, ускоритель «толкает» вторую ступень по направлению полета. После завершения работы стартового ускорителя, когда включается маршевый двигатель, ступени разделяются, так как на тот момент конструктивно они уже не соединены. Подобный принцип был реализован в зенитной управляемой ракете 4К90 ЗРК М-1 «Волна» [1].

Для создания математической модели, прежде всего, был проанализирован принцип работы узла и составлена его расчетная схема. Основными элементами системы являются соединительные шпангоуты ступеней и штифты. Штифты, расположенные в сквозных радиальных отверстиях, работают на срез. Формула (1) для расчета диаметра штифта круглого сечения на срез выглядит следующим образом:

$$d_{шт} \geq 1,13 * \sqrt{\frac{F}{\sigma_{ср}}} \quad (1)$$

, где $d_{шт}$ – диаметр штифта (мм), F – нагрузка на штифт (Н), $\sigma_{ср}$ – напряжение на срез для материала штифта (МПа).

Из формулы ясно, что для расчета штифта на срез, в нашем случае, понадобятся следующие исходные данные: наседающая масса (масса второй ступени), тяга ускорителя, напряжение материала штифта на срез, количество штифтов (не менее 3). Подставляя эти исходные данные в формулу (1) получаем новую формулу (2), которая и будет первой в нашей математической модели:

$$d_{шт} = 1,13 * \sqrt{\frac{(P - m_{2ст}) * g}{\sigma_{ср} * n}} \quad (2)$$

, где $d_{шт}$ – диаметр штифта (мм), P – тяга стартового ускорителя (кгс), $m_{2ст}$ – наседающая масса второй ступени (кг), g – ускорение свободного падения (m/c^2), n – количество штифтов, $\sigma_{ср}$ – напряжение на срез для материала штифта (МПа).

Отдельно стоит сказать о том, что полученный результат расчета округлялся в меньшую сторону, для того, чтобы гарантировать срез штифта под действием заданных нагрузок.

Ещё одним важным моментом является расчет толщины стенки шпангоутов. По крайней мере, тех их частей, которые входят в непосредственный контакт друг с другом. Стенка малого шпангоута должна быть такой толщины, чтобы, опираясь в «полку» большего шпангоута после среза штифтов, выдерживать нагрузку, приходящуюся на площадь «кольца». Для расчета этой толщины, исходя из теории прочности, была выведена следующая формула (3):

$$\frac{(P - m_{2ст}) * g * 4}{\pi * (D_{нар}^2 - d_{внутр}^2)} \leq \sigma_{0,2} \quad (3)$$

, где P – тяга стартового ускорителя (кгс), $m_{2ст}$ – насаждающая масса второй ступени (кг), g – ускорение свободного падения (m/c^2), $D_{нар}$ – наружный диаметр шпангоута второй ступени (м), $d_{внутр}$ – внутренний диаметр второй ступени (м), $\sigma_{0,2}$ – предел текучести для материала шпангоутов. (МПа).

Сам расчёт требуемой толщины шпангоута был реализован внутри цикла, где толщина шпангоута ($s = D_{нар} - d_{внутр}$) изначально равна 0,001 метра и постепенно увеличивается вплоть до достижения такой площади «кольца», которое выдержит заданную нагрузку.

По большому счёту, формулы (2) и (3) составляют всю математическую модель расчётной части системы, позволяя определить две проектные характеристики: диаметр штифта и толщину стенки шпангоута. Однако, для построения эскиза, так же потребовалось установить параметрические зависимости между этими характеристиками, и размерами остальных элементов. Ввиду того, что количество отображаемых на эскизе элементов не позволяет описать процесс установления параметрических зависимостей между ними в рамках одной статьи, далее будет рассказано о нескольких отдельных элементах. Так, например, рекомендуемая толщина стенки шпангоута складывается из полученной в результате расчетов требуемой толщины и 2 мм, отводимых на выполнение посадочной фаски. Длина штифта складывается из двух толщин примыкающих друг к другу шпангоутов и 5 мм, отводимых на выступающую часть штифта, позволяющую гарантировать посадку шпангоутов на штифт всей своей толщиной.

Реализация расчётной части системы, и, прежде всего, графического интерфейса для удобства её использования, была выполнена в среде разработки Microsoft Visual Studio. Код программы написан на языке программирования C#. Исходный код в статье не приводится. Интерфейс показан на рисунке 1.

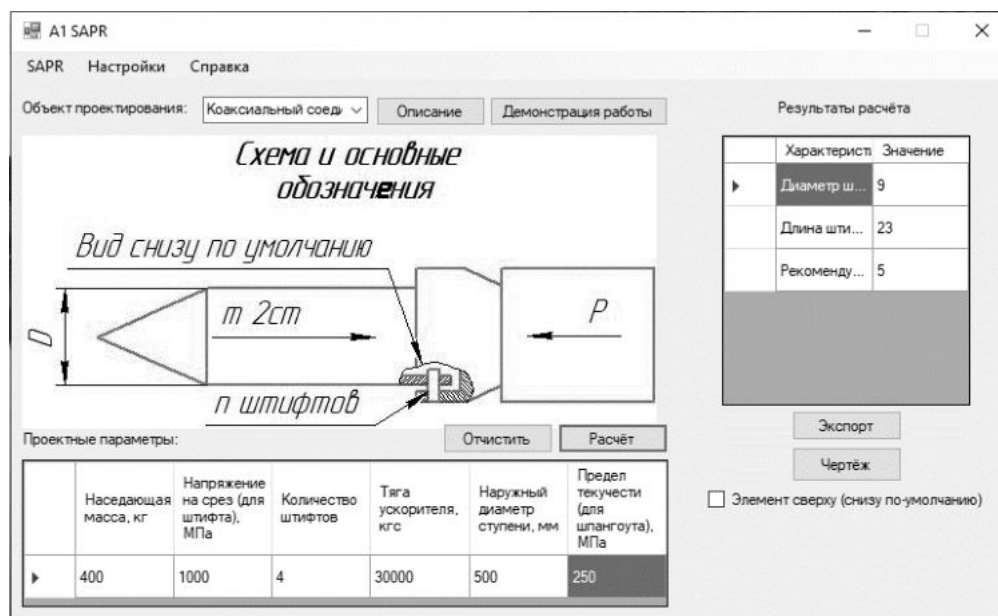


Рис. 1. Интерфейс САПР при расчете коаксиального соединительного узла.

В верхней части окна расположен выпадающий список тех элементов, которые пользователь может выбрать для автоматизированного проектирования. В данном случае, выбран «коаксиальный соединительный узел». Ниже расположен эскиз, показывающий пользователю принципиальную расчётную схему и дающий дополнительные пояснения к перечню исходных данных. Также, на ближайшую перспективу предусмотрена возможность просмотра подробных описательных и демонстрационных материалов, после нажатия на соответствующие кнопки. Под рисунком располагается таблица с требуемыми от пользователя исходными данными. Таблица уже заполнена конкретными значениями, соответствующими характеристикам уже упомянутой ракеты 4K90. Именно на этой ракете была проверена адекватность математической модели. Справа над таблицей расположена кнопка «Расчет», запускающая процесс вычисления проектных характеристик. Вся правая часть окна занята таблицей с результатами расчёта и интерфейсом, позволяющим продолжить работу над ними. Так, например, с помощью кнопки «Экспорт» можно экспортировать результаты в текстовый файл. Кнопка «Чертеж», в свою очередь запускает процесс создания эскиза по имеющимся данным.

Разработка графической части системы осуществлялась по средствам подключенной к Visual Studio библиотеке API КОМПАС-3D [2]. Листинг программы, создающий графический файл и изображающей в нем эскиз проектируемого узла так же не приводится. На рисунке 2 показан результат работы графической части системы.

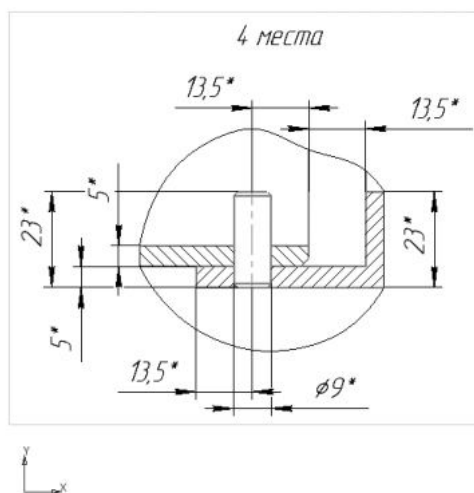


Рис. 2. Эскиз, полученный с помощью САПР

Стоит заметить, что показанные на эскизе (рис.2) размеры элементов полностью соответствуют результатам расчёта. Более того, предусмотрена возможность выбора месторасположения выносного вида – снизу или сверху. По умолчанию, эскиз строится для выносного вида снизу.

На данный момент, на примере коаксиального соединительного узла, успешно опробован и отработан весь процесс создания САПР, позволяющей значительно упростить проектирование отдельных узлов изделий РКТ и создание эскизов для чертежей общего вида. В ближайшей перспективе, в уже существующий «каркас» системы будут добавлены новые узлы и агрегаты. В дальнейшем так же возможно применение этой системы в учебных целях.

Библиографический список

1. В.С. Вельгорский, Н.И. Слесарев Устройство и функционирование зенитной управляемой ракеты 4К90: Учебное пособие. – Л.: ЛМИ 1963г. 45с.
2. АСКОН Руководство пользователя КОМПАС-Invisible (API КОМПАС-3D) [Электронный ресурс] // URL: <https://kompas.ru/source/documents/2021/%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20KOMPAS-Invisible.pdf> (дата обращения: 31.01.2022).

УДК 667.661.2

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОРСУНКИ МЕТОДАМИ ПОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТИ

Гуманенко Я.Д.¹, Полетаев В.В.¹, Полетаева М.В.¹, Мещеряков С.А.²

¹ Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение «Академия машиностроения имени Ж. Я. Котина»

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

Форсунка – это деталь используется для распыления жидкостей. Конструктивные особенности зависят от назначения изделия. Форсунки разделяют на два типа внутреннего смешивания или внешнего. Исходя из названия, форсунка внутреннего смешивания использует принцип перемешивания разных веществ внутри изделия, жидкость и воздух поступают по отдельным каналам в камеру, где производится предварительное смешивание и в последствии, распыляется, продолжая смешиваться за её пределами [1].

В форсунках внешнего смешивания подача жидкости и газа происходит независимо друг от друга и только при выбросе из форсунки смешиваются в результате, получается распыление и область покрытия лучше, чем при форсунке внутреннего смешивания. На процесс формирования покрытия и его качество влияет много технологических факторов, среди которых можно выделить наиболее существенные [2].

1. Вид сопел и характер истечения струй рабочего газа.
2. Конструкция канала подачи распыляемой композиции и характер ее истечения из этого канала.
3. Компонировка распылительной головки.
4. Точность и стабильность дозировки композиции по времени.
5. Скорость и характер взаимного перемещения распылительной головки и обрабатываемой поверхности.
6. Физико-химические особенности компонентов покрытия.

Влияние перечисленных факторов определяет большое разнообразие конструктивно-технологических решений распылительных головок [3-4].

Основываясь на полученных данных предложена следующая модель форсунки, эскиз форсунки представлен на рисунке 1.

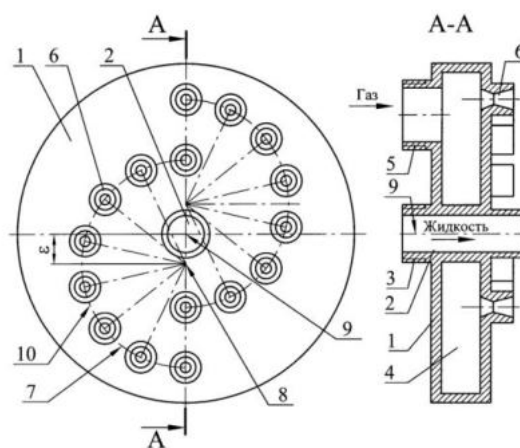


Рисунок 1 – Эскиз многосопловой распылитель Андрюшкина А.Ю.

1. корпус; 2. центральный канал; 3,5; штуцер; 4. коллекторная полость; 6 сопла; 7. незамкнутый контур; 8. центр; 9. ось; 10. дуга

На рисунке 1 прототип форсунки внешнего смешивания, разработанная Андрюшкиным Александром Юрьевичем [10]. Основываясь данной моделью, была предложена новая конструкция, сохраняющая динамику процессов, при этом имеющая более простую форму. Используя методы послойного синтеза выращена, следующая модель рисунок 2[3].



Рисунок 2 – Разработанная модель форсунки внешнего смешивания

Для получения кода, который поймет аддитивная установка необходимо предварительно подготовленную 3D модель обработать в слайсере. Слайсер – это программы для разделения 3D модели на слои, установки поддержек и трансформации данных в код понятный для 3D-принтера (G-код). Данное изделие обработано перед печатью в Poligon X. В данной программе расположены растворимые поддержки внутри, а снаружи задана форма PETG пластика. После расставления поддержек слайсер переводит готовый результат в G-код, который понимает аддитивная установка.

Для получения качественных внутренних каналов применялись растворимые поддержки. Для поддержек использовался материал HIPS. После печати деталь дорабатывалась от поддержек и дефектов пластика. Два дня деталь находилась в растворителе “D-лимонен/Апельсиновый терпен”, для растворения внутренних поддержек. Для удаления остатков растворенного пластика и жидкости из внутренних каналов детали применялся воздушный компрессор с давлением в 4 атмосферы.

С хорошим качественным получена поверхность на котором расположены отверстия воздуховодные и для подачи жидкости. Геометрические формы получены, верно.

Технологические параметры выращивания форсунки внешнего смешивания.

Параметры печати:

- Температура печати сопла PETG: 250+/- 5 °C;
- Температура печати сопла HIPS: 235+/- 5 °C;
- Температура стола 110 +/- 5 °C;
- Высота слоя 0.2 мм;
- Диаметр сопла (ширина трека) 0.3 мм;
- Температура катушки (предварительный разогрев материала) 45°C;
- Для повышения адгезии стола с деталью нанесен адгезивный полимер (клей на спиртовой основе);
- Скорость линейного движения при печати 60 мм/с.

Прототип печатался на двухкомпонентном 3D принтере PICASO 3D DESIGNER X PRO, изображение аддитивной установке на рисунке 3. Первый и основной компонент PETG пластик 1.75 мм для 3D-принтеров, второй, выполняющий поддержки, компонент HIPS.



Рисунок 3 – Фотография 3D принтере PICASO 3D DESIGNER X PRO на котором производилась печать

По окончании операций по доработке детали, были проведены испытания. При проверке на герметичность произошло разрушение внешней части канала для подачи жидкости. Для оценки качества печати, выполнена разделенная детали. Разрез показал, что HIPS поддержки были растворены полностью, также хороший уровень адгезия с PETG пластиком обеспечил качественные поддержки. Канал для подачи жидкости получился с дефектом. В связи с низкими показателями межслойной адгезии и особенностями построениями кода управляющей программы, произошло образование дефекта, расслоение.

Судя по дефекту, произошло несоблюдение режимов работы устройства. Следует откорректировать G-код, чтобы на завершающих операциях температура сопла не отклонялась от предустановленного 250°C. Пластик хуже начал наноситься при вертикальном расположении канала, что привело к потере устойчивости получаемого слоя и последующего расслоения по форме пружины.

В дальнейшем технологический процесс будет совершенствоваться. Планируется выращивание под различными углами с целью подбора оптимального расположения слоев, что позволит повысить межслойную адгезию внешних частей каналов. Такое исполнение печати обеспечит повышение механических свойств.

*Научный руководитель – Афанасьев Е.О.*²

Библиографический список

1. Андрюшкин А.Ю., Галинская О.О., Засухин О.Н., Цыплаков О.Г. Патент на изобретение №2216410 от 20.11.03. Приоритет от 29.04.02. Устройство для распыления жидкости и других текучих веществ.
2. Андрюшкин А.Ю. Патент на изобретение №2350402 от 27.03.09. Приоритет от 09.01.08. Распылитель с согласованием расхода жидкости и рабочего газа.
3. Андрюшкин А.Ю., Засухин О.Н. Патент на изобретение № RU 111779 U1 от 27.12.2011. Приоритет от 17.06.2011. Многооспловой распылитель.
4. Андрюшкин, А. Ю. Оптимальная организация узла диспергирования с многоструйной подачей газа / А. Ю. Андрюшкин // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2012. № 2. С. 17-23

УДК 62-772.2

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПЛОТНЕНИЙ ГИДРОЦИЛИНДРА

Е.С. Ефремова, Д.В. Васильков

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

В настоящее время наблюдается быстрое распространение гидропривода машин, что можно объяснить неоспоримыми преимуществами гидравлических устройств по сравнению с другими. Гидроцилиндры способны передавать большие усилия при сравнительно малых габаритах и массе применяемого оборудования, обладают высокой надежностью и быстродействием [1-2].

Значительная часть отказов работы гидравлических систем связаны с износом уплотнительных элементов гидроцилиндров [3-5]. Проблема стандартных резиновых уплотнений состоит в их недостаточной надежности для всей гидросистемы в целом. Основная причина неисправности гидроцилиндра – износ уплотнений. Износу уплотнений способствуют также загрязнения, попадающие на шток. Абразивные частицы изнашивают грязесъемную манжету, далее - уплотнения и сам шток. Резиновые манжеты, кроме изнашивания, со временем твердеют. В результате возникает течь масла по штоку. Такие дефекты, кроме расхода гидравлического масла, содействуют попаданию посторонних частиц в гидросистему и загрязнению рабочей жидкости (масла). В итоге возникают проблемы с другими узлами, и, как следствие, происходят неполадки в работе всего гидроцилиндра и встает вопрос о необходимости ремонта. Во избежание отказов гидросистемы необходимо внедрять и использовать более современные материалы уплотнений, чтобы продлить срок эксплуатации гидроцилиндра.

Самыми нагруженными элементами силового гидроцилиндра двустороннего действия являются уплотнения и шток. На рисунке 1 представлен исходный сборочный чертеж силового гидроцилиндра. Позициями 2 и 3 обозначены особо важные элементы конструкции, входящие в сборку, - шток и поршень силового гидроцилиндра, соответственно.

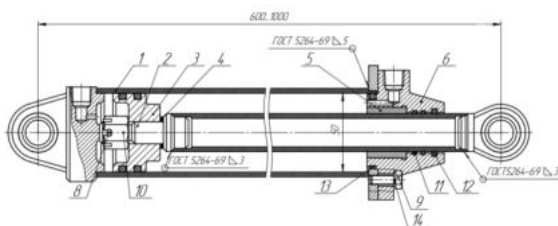


Рисунок 1 – Исходный чертеж силового гидроцилиндра двустороннего действия

Поршень (рисунок 2) является основным рабочим звеном гидроцилиндра. Под воздействием рабочей среды, которая поступает в его полость, поршень движется возвратно-поступательно. Поршневые уплотнения используются в гидравлических цилиндрах, защищая поршень от утечки жидкостей и газа. Они устанавливаются внутри цилиндра и гарантируют максимальную герметичность.

В действующей системе применены 2 поршневых уплотнения, изготовленные из резины по ГОСТ 9833-73. Кольца круглого сечения отличаются простотой конструкции, возможностью герметизации радиального соединения независимо от направления действия давлений, широкой универсальностью и взаимозаменяемостью, низкой стоимостью. При всех достоинствах резиновые кольца обладают значительным недостатком – ограниченной долговечностью, что сказывается на долговечности самого гидроцилиндра в целом и приводит к отказам. Резиновые кольца в подвижных соединениях работают в температурном диапазоне - 60...+200°C [6] и максимальном давлении до 32 МПа со скоростью перемещения штока не более 2 м/с. Рабочие кромки резиновых колец деформируются под давлением и подвергаются спиральному скручиванию, нарушается ассиметричная форма, которая обеспечивает насосный эффект резиновых колец - $P_n < 5$ МПа, что на сегодняшний день относительно пластмассовых уплотнений не так много. Ресурс работы резиновых уплотнений при его характерном рабочем давлении 32 МПа не превышает 200 км пробега. Кроме того, большое влияние на уплотнения из резины оказывает наличие агрессивной среды (т.е. циркулирующей жидкости – масла), что сказывается на уменьшении срока службы.

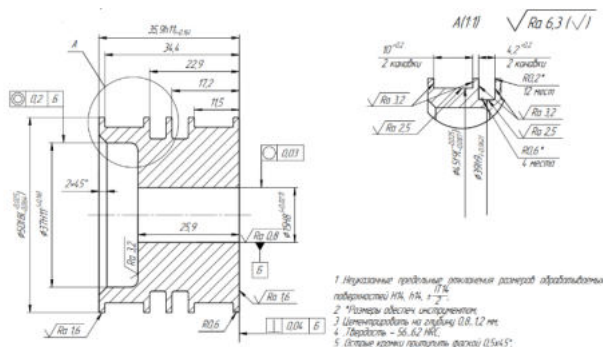


Рисунок 2 – Чертеж поршня силового гидроцилиндра с конструктивными изменениями

Усилие поршня передает шток. Штоковые уплотнения в гидросистеме выполняют наиболее значимые функции: удерживают рабочую жидкость внутри гидроцилиндра, а также предотвращают попадание загрязнений. В действующей системе применены 3 штоковых резиновых уплотнения. Недостатком такого выбора является отсутствие грязеёмника, в результате чего всевозможные загрязнения (пыль и т.д.) попадают в штоковую полость, поэтому необходимо его предусмотреть (рисунок 3).

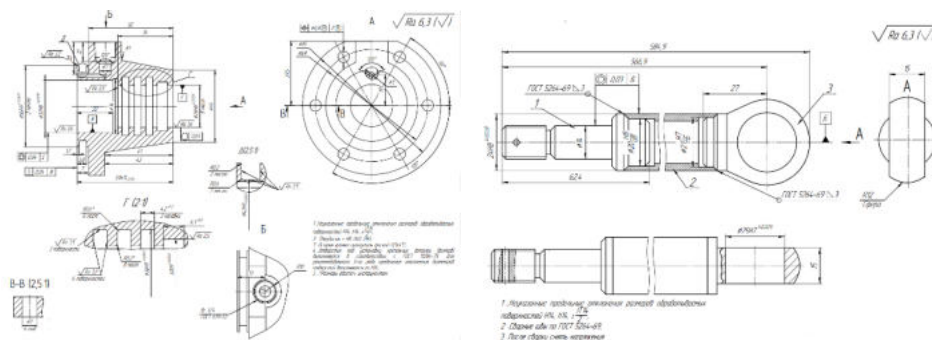


Рисунок 3 – Чертежи деталей «крышка» и «шток» с конструктивными изменениями

Одним из требований, предъявляемых к гидроцилиндрам, является устойчивость их деталей к коррозии и износу. Чтобы обеспечить долговременную работоспособность цилиндра и поршня, используются высокопрочные

конструкционные материалы. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что резиновые уплотнения неактуальны и необходимо новое конструктивное решение по переходу к современным пластмассовым уплотнениям.

Полимерные и композиционные уплотнения [7-9], состоящие из неразрезного скользящего кольца и поджимного резинового элемента, превосходят традиционные резиновые уплотнения по всем качественным показателям. Переход от резиновых уплотнений к более прочным полимерным уплотнениям поможет многократно повысить надежность гидравлического оборудования.

В качестве нового конструктивного решения для штока выбираем два штоковых уплотнения, грязесъемник и опорное кольцо. Поршень снабжаем двумя поршневыми уплотнениями, а также двумя опорными кольцами, которые очищают грязь с поверхности, где происходит взаимодействие с внешней средой со стороны штока.

Поршневые уплотнения (рисунок 4) различаются по типу, исполнению, серии, материалу уплотнительного и резинового колец, что позволяет выбрать уплотнения наиболее отвечающее конкретным условиям эксплуатации.



Рисунок 4 – Поршневые уплотнения

Опорно-уплотнительные узлы поршней при наибольших требованиях по безотказности рекомендуется снабжать двумя уплотнениями типа E15M из материала группы 5 и двумя опорными кольцами типа E20 из материала группы 15. Рекомендации по проектированию опорно-уплотнительных узлов поршня указаны на рисунке 5.

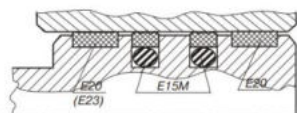


Рисунок 5 – Схема установки уплотнений типа E15 и опорных колец типа E20

Обязательными составляющими всех типов уплотнений являются кольца уплотнительные из полимерных материалов (фторопласта наполненного и полиэфира) и поджимные кольца из резины. Благодаря многокромочной конфигурации, уплотнения типа E15M не уступают по герметичности более мягким резиновым уплотнениям при работе на маловязких средах. Буква М (модернизированное уплотнение) означает, что рабочая кромка уплотнительного кольца выполнена зубчатой, что снижает трение и повышает надежность. Уплотнение E15M представлено как основной, так и легкой сериями. Уплотнения легкой серии имеют уменьшенные посадочные канавки, однако надежность уплотнения меньше, чем основной серии. Исходя из этого выбираем уплотнение в исполнении основной серии.

В качестве нового конструктивного решения рекомендуется применять уплотнения типа E15M по той причине, что они являются наиболее эффективными и универсальными, в то время как поршневые уплотнения других конфигураций являются менее эффективными. Наиболее надёжны уплотнения E15M из материала группы 5 (полиэфира). Они рекомендуются как основной тип уплотнения поршня. Наружный и внутренний диаметральные размеры выполнены по 9-му качеству точности. Требования к посадочным местам под установку поршневых уплотнений E15M-050/5 (15-тип; М-модернизированное уплотнения; 50 – уплотняемый диаметр; 5 – группа материала уплотнительного кольца - полиэфир) указаны на рисунке 6.

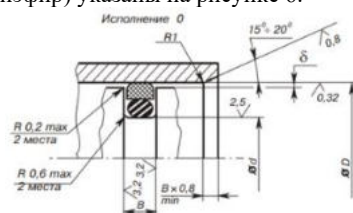


Рисунок 6 – Требования к посадочным местам под установку поршневых уплотнений E15M-050/5

Опорные кольца (рисунок 7) изготавливаются разрезными с «косым» или ступенчатым замком, а также допускается изготовление с прямым замком. В новых разработках рекомендуется применять кольца типа E20, соответствующие международному стандарту ISORP 10766 и имеющее наиболее жесткие требования по точности изготовления. Кольца E20 изготавливаются из фторопластовой ленты (группа материала 3), а также из наполненного полиамида (группа материала 15), являющегося одним из наиболее жестких и прочных антифрикционных материалов.



Рисунок 7 – Поршневые опорные кольца

Требования к посадочным местам под установку опорных колец на поршень E20-045-050/15 (20-тип; 45-диаметр канавки; 50 –диаметр цилиндра; 15 – группа материала кольца - наполненный полиамид) показаны на рисунке 8. Наружный и внутренний диаметральные размеры выполнены по 9-му качеству точности.

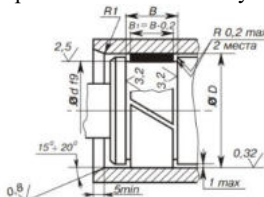


Рисунок 8 – Требования к посадочным местам под установку опорных колец на поршень типа E20-045-055/15

Штоковые уплотнения (рисунок 9) также различаются по типу, исполнению, серии, материалу уплотнительного, защитного и резинового колец, что позволяет выбрать уплотнение, наиболее отвечающее конкретным условиям эксплуатации.



Рисунок 9 – Штоковые уплотнения

Опорно-уплотнительные узлы штоков для гидроцилиндров, имеющих интенсивный режим работы или отвечающих требованию максимальной безотказности рекомендуется снабжать двумя уплотнениями типа E06 и грязесъемником E50 из материала группы 5. Такой комплект уплотнений обеспечивает гидроцилиндру высокую герметичность и достаточную надежность за счет двукратного резервирования уплотнительных элементов. В качестве опорных колец наиболее эффективно использовать высокоточные кольца E20 (рисунок 5), число которых определяется величиной расчетной радиальной силы. Опорные кольца рекомендуется располагать перед уплотнениями, со стороны штоковой полости для защиты уплотнений от грязевых частиц из рабочей жидкости. Рекомендации по проектированию опорно-уплотнительных узлов штока указаны на рисунке 10.

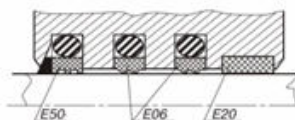


Рисунок 10 – Схема установки двух штоковых уплотнений типа E06, грязесъемника типа E50 и одного опорного высокоточного кольца типа E20

Уплотнения состоят из уплотнительного кольца из материала групп 3 или 5 и поджимного кольца из резины. Уплотнения устанавливаются в неразъемную глухую канавку. Рекомендуется установка в один уплотняемый узел двух комплектов уплотнений, и только в случаях, когда конструкция узла не позволяет разместить два уплотнения, можно допустить установку одного уплотнения E06 в сочетании с грязесъемником E50, выполняющим дополнительную роль дублирующего уплотнения. Уплотнения легкой серии имеют уменьшенные посадочные канавки, однако, надежность уплотнений меньше, чем основной серии. В новых разработках рекомендуется применять уплотнения типа E06, размеры посадочных канавок которых соответствуют ISO DP7425/2. Наиболее надежные двухромочные уплотнения типа E06 из материала группы 5, рекомендуются как основной тип уплотнений. Требования к посадочным местам под установку штоковых уплотнений E06-025/5 (06-тип уплотнения; 25-уплотняемый диаметр; 5-группа материала уплотнительного кольца – полиэфир по рекомендациям) указаны на рисунке 11.

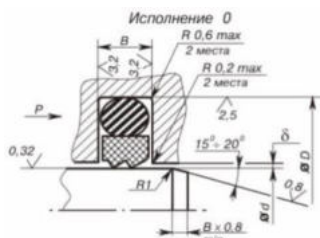


Рисунок 11 – Требования к посадочным местам под установку штоковых уплотнений E06-025/5

Грязесъемники (рисунок 12) различаются по типу, исполнению, серии, материалу уплотнительного и резинового колец, что позволяет выбрать грязесъемники наиболее отвечающие конкретным условиям эксплуатации.



Рисунок 12 – Грязесъемник

Грязесъемник типа E50 рекомендуется использовать как дополнительное уплотнение для повышения надежности при давлении до 40 МПа. Использование этого элемента необходимо, т.к. рабочее давление в гидросистеме составляет 32 МПа. Посадочные места под данный тип грязесъемника соответствуют ISODP 7425/2. Поэтому, такой грязесъемник из материала группы 5 и поджимного кольца из резины группы 7 рекомендуется как основной тип. Требования к посадочным местам под установку грязесъемника E50-025/5 (50- тип грязесъемника; 25- диаметр штока; 5-группа материала грязесъемного кольца– полиэфир по рекомендациям) указаны на рисунке 13. Наружный и внутренний диаметральные размеры выполнены по 9-му качеству точности.

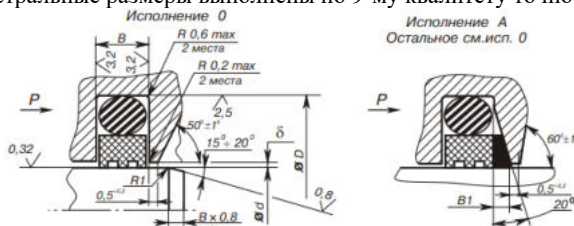


Рисунок 13 – Требования к посадочным местам под установку грязесъемника E50-025/5

Требования к посадочным местам под установку опорных колец на шток E20-025/15 (20-тип; 25-диаметр штока; 15 – группа материала кольца - наполненный полиамид) показаны на рисунке 14. Наружный и внутренний диаметральные размеры выполнены по 9-му качеству точности. Среднее контактное давление не должно превышать 100 МПа – из материалов группы 15. Для обеспечения этого условия необходимо рассчитать необходимое количество колец, каждое из которых устанавливается в отдельную канавку.

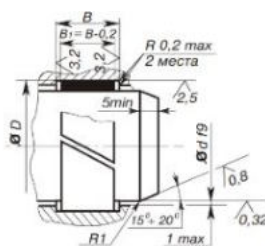


Рисунок 14 – Требования к посадочным местам под установку опорных колец на шток типа E20-045-055/15

Среднее контактное давление зависит от относительной деформации сжатия. При установке кольца диаметром d в закрытую канавку H на уплотняемых поверхностях возникает начальное контактное давление $P_{\text{конт}}$, определяемое относительной деформацией сжатия ε , модулем упругости E и формой кольца (влияние формы сечения кольца на модуль упругости E материала детали учитывает коэффициент формы K_{ϕ}). Определим контактное давление с помощью следующих формул, записанных в таблице 1.

Таблица 1

Методика нахождения среднего контактного давления для определения количества опорных колец штока

Рассчитываемый параметр	Формула	Численное значение
Гидравлический диаметр (эквивалентный диаметр) прямоугольного сечения	$D_r = \frac{2 * a * b}{a + b}$ $a = 5; b = 6,3 - 0,2 = 6,1$	$D_r = 5,5 \text{ мм}$
Относительная деформация сжатия	$\varepsilon = \frac{D_r - h}{D_r}$ $h = 5 \text{ мм}$ – глубина канавки для уплотнительного кольца	$\varepsilon = 0,09$
Модуль упругости полиамида	const	$E = 8000 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = 785 \text{ МПа}$
Коэффициент формы	$K_{\phi} = 1 + \left(\frac{0,5}{h}\right)^2$	$K_{\phi} = 1,01$
Среднее контактное давление	$P_{\text{конт}} = K_{\phi} * E * \varepsilon$	$P_{\text{конт}} = 71,3$

По результатам расчетов становится ясно, что среднее контактное давление не превышает 100 МПа, поэтому потребуется одно опорное кольцо для штока.

В результате проведенных исследований были проанализированы недостатки действующей системы используемых резиновых уплотнений и предложено новое конструктивное решение с применением новых более

совершенных комбинированных уплотнений, которые кратно повышают долговечность силового гидроцилиндра. Предложенные конструктивные изменения элементов силового гидроцилиндра имеют большие преимущества по сравнению с исходными конструктивными данными. Предложенную конструкцию можно применять в гидроцилиндрах силовых агрегатов, используемых в тяжелых условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. Башта Т.М. Гидроприводы и гидроавтоматика. М: Машиностроение, 1978. 240 с.
2. Чудинов А.М., Гольчак И.П. Конструкции силовых гидроцилиндров сельскохозяйственных машин // Международный журнал «Инновационная наука», №2, 2016. С. 149-1512.
3. Зенков А.С. Разработка уплотнений силовых гидроцилиндров сельскохозяйственных машин [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://min.usasa.ru/uploads/article/attachment/4633/Зенков.pdf> (дата обращения 03.04.2022).
4. Водяков В.Н. Повышение ресурса уплотнительных соединений активного типа модификацией посадочных мест / В.Н. Водяков, В.В. Кузнецов, М.А. Березин, В.И. Борисов // Тракторы и сельхозмашины. - 2009. - № 8. - С. 33 - 37.
5. Чудинов А.М., Нагорских В.С. Сравнительные испытания уплотнительных манжет силовых гидроцилиндров из полимерных материалов / I научно-практическая конференция: Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях. М.: Московский государственный строительный университет, 2009. - С.327-328.
6. ГОСТ 9833-73. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Конструкция и размеры [Текст] – Москва: Изд-во стандартов, 1998. – 62 с.
7. Комбинированные уплотнения и опорно-направляющие элементы из полимерных и композиционных материалов для гидро-пневмо систем/ Каталог продукции. – 2007. – 72 с.
8. Производство уплотнений из полимерных и композиционных материалов. Волгоград: ООО «Константа-2», 2020. 24 с.
9. ПТФЭ уплотнения. Руководство по подбору и приектрированию. Berlin: Parker Hannifin GmbH, 2017/ - 196 с.

УДК 539. 421

УСТАЛОСТНАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ

В. Кеишьян, А.Н. Жолудев, А.С. Воронов, Н.С. Дубасов

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

Заклепочные соединения находят широкое применение в авиационной технике. Одним из их достоинств является высокое сопротивление переменным нагрузкам, проявляющееся в сопротивлении развитию усталостных трещин. Это обусловлено оптимальной формой нарушений исходной геометрической формы соединяемых листов в виде рядов круглых отверстий. А также сохранением механических свойств материала соединяемых листов в технологическом процессе клепки. С помощью заклепок производится соединение листов обшивки крыла летательного аппарата к элементам силового набора – продольным (лонжероны и стрингеры) и поперечным (нервюры).

Ряд нагрузок, действующих на крыло на крыло летательного аппарата являются стационарными. К ним можно отнести вес крыла с оборудованием (подвесные двигатели, стойки шасси) и элементами механизации, а также аэродинамические силы. Другие нагрузки являются нестационарными – вибрации подвесных двигателей, пульсации аэродинамических нагрузок. Второй вид воздействий является определяющим при анализе усталостного разрушения авиационных конструкций.

Процесс разрушения складывается из двух стадий – зарождения трещины и её распространения, причём каждая из этих стадий подчиняется своим законам. Среди критериев прочности есть такие, которые описывают как условия зарождения трещины, так и условия её распространения. Первые из них фактически есть условия наступления опасного состояния в точке тела (классические теории прочности). Вторые исходят из наличия в теле трещины.

Анализ напряженно-деформированного состояния соединения без трещины.

Через ряды заклепок передаются нагрузки, действующие в плоскости соединяемых листов. В данной работе рассматривается соединение заклепками двух листов. Сначала рассматривается задача определения напряженно-деформированного состояния растянутой пластины, растяжение в которой возникает из-за передачи усилия через одну заклепку. Расстояние между соседними заклепками принимается согласно рекомендациям, в 4 раза больше их диаметра. Геометрическая модель соответствует симметричной части между соседними заклепками.

Рассматриваются листы обшивки самолёта и соединённые с ними стрингеры, изготовленные из алюминиевого деформируемого сплава марки Д16. Его высокие прочностные свойства и сравнительно малая плотность обеспечили ему широкое применение в авиационных конструкциях. Заклёпки, соединяющие обшивку с силовыми элементами конструкции, выполнены из алюминиевого сплава В65. Данный материал используется для соединения деталей из алюминиевых сплавов высокой и средней прочности.

На первом этапе производился расчёт заклепочного соединения без трещины. Геометрическая модель с построенной на ней сеткой конечных элементов приведена на рисунке 1.

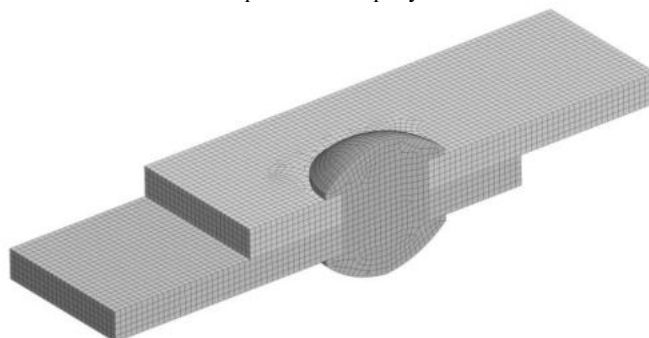


Рис. 1. Разбивка на конечные элементы заклепочного соединения

Существенным фактом является наличие постоянного давления, создаваемого стержнем заклепки. Оно возникает вследствие пластического деформирования материала заклепки в процессе её установки. В результате расклепывания материал заклепки полностью заполняет всё отверстие. Из-за этого можно предполагать, что контактное давление передается на лист по всей поверхности отверстия.

При действии на отверстие радиусом a силы P , считаем давление заклепки на контуре отверстия распределённым по косинусоидальному закону:

$$q = \frac{P}{2 \cdot a \cdot h} \cdot \cos\theta$$

где h – толщина листа.

В этом случае компоненты напряжений в полярной системе координат определяются формулами [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{P}{h} \cdot \frac{a}{r} \cdot \cos\theta \cdot \left[1 - \frac{1-\mu}{4} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)\right] \\ \sigma_t &= \frac{P}{h} \cdot \frac{a}{r} \cdot \cos\theta \cdot \frac{1-\mu}{4} \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \\ \tau_{rt} &= \frac{P}{h} \cdot \frac{a}{r} \cdot \sin\theta \cdot \frac{1-\mu}{4} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \end{aligned}$$

Наибольшие напряжения возникают в радиальных направлениях, перпендикулярных действию силы. Распределение нормальных напряжений вдоль действия силы для отверстия без трещины показано на рисунке 2.

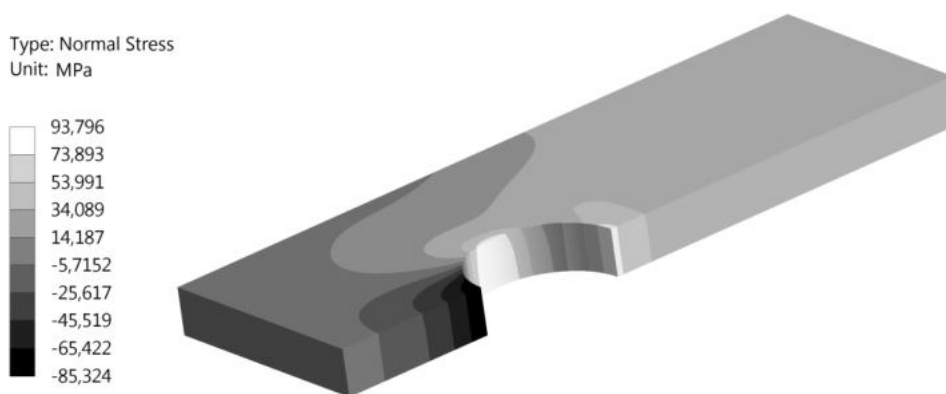


Рис. 2. Нормальные напряжения в пластине без трещины

Моделирование поверхностной трещины на контуре отверстия.

Основным принципом расчёта трещиностойкости является допущение о наличии трещин в исходном материале конструкции. Они могут появиться как в процессе изготовления деталей и частей конструкции, так и в процессе эксплуатации. Дальнейшие расчёты проводятся на основе трещин заданного расположения и размеров. Размер трещины принимался равным 2, 5 и 8 мм. Схема разбиения на конечные элементы для трещины длиной 2 мм показана на рисунке 4. Фронт трещины является плоским, перпендикулярным поверхности листов.

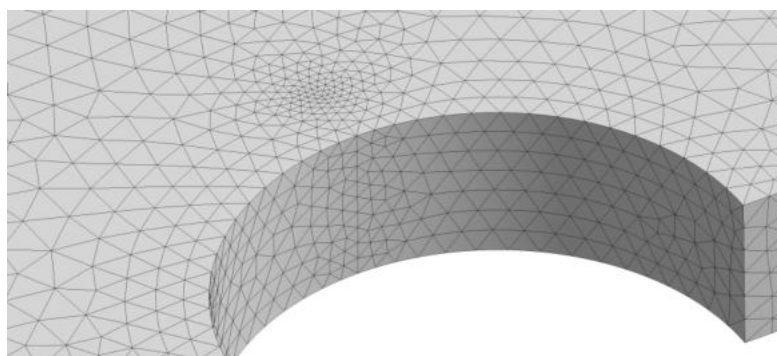


Рис.3 Сетка конечных элементов в окрестности вершины трещины

Расчёт характеристик механики разрушения с помощью метода конечных элементов имеет некоторые особенности по сравнению с расчётом традиционных характеристик напряжённо-деформированного состояния. Фронт трещины окружён специальными элементами, распределение напряжений в которых имеет особенность, соответствующую распределению напряжений в вершине трещины [2]. Для этого промежуточные узлы на сторонах конечных элементов 2-го порядка сдвигаются к фронту трещины. Коэффициент интенсивности напряжений в

каждом узле фронта трещины вычисляется по нескольким концентрическим контурам, окружающим фронт. Результаты расчёта нормальных напряжений в направлении действия внешней силы показаны на рисунке 4.

Критерий начала распространения трещины, составляющий основу механики разрушения, не следует из уравнений равновесия и движения механики сплошной среды. Он является дополнительным крайним условием при решении вопроса о предельном равновесии тела с трещиной.

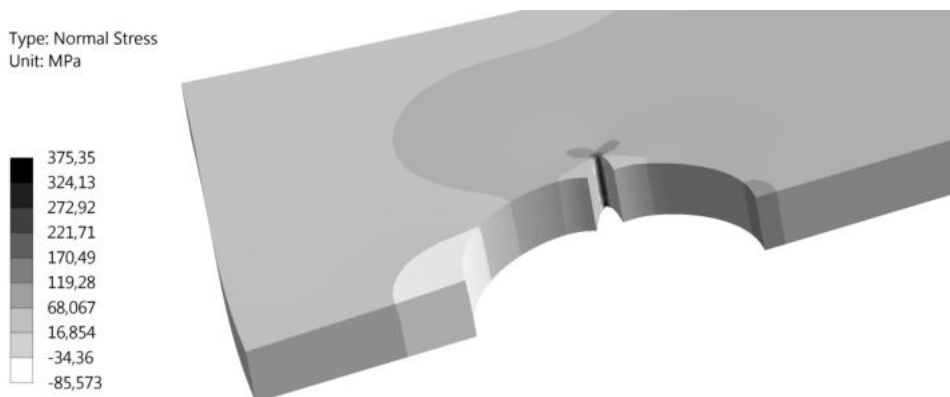


Рис. 4. Нормальные напряжения вдоль действия силы в отверстии с трещиной

Коэффициент интенсивности напряжений для краевой трещины, исходящей из отверстия находится по формуле:

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

где $Y = 1.12$ – тарировочный коэффициент для краевой трещины [3].

Критерием начала роста статической трещины является достижение коэффициентом интенсивности напряжений критической величины для сплава Д16: $K_I = 28 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$. Результаты численного и аналитического расчёта оказались близкими (рис.5) и показали, что этому значению соответствует длина трещины $a = 6,5 \text{ мм}$.

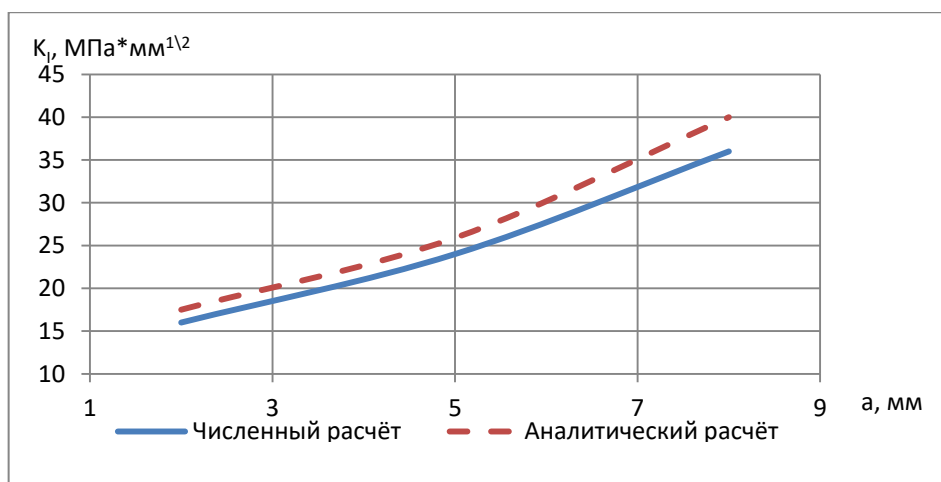


Рис.5. Коэффициент интенсивности напряжений

Увеличение длины трещины при циклических нагрузках на среднем установившемся участке её роста описывается законом Париса:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

Коэффициенты в уравнении Париса для сплава Д16: $C = 3.2 \cdot 10^{-8}$, $m = 2.4$ [4]. Размах напряжений, возникающих при отсутствии трещины, принимался равным 10 МПа. Диапазон скоростей роста трещины в рассматриваемом диапазоне её длин оказался равным $1 \cdot 10^{-8} \div 9 \cdot 10^{-8} \text{ мм / цикл}$.

Библиографический список

1. Bickley W.G. Distribution of stress round of circular hole of a plane // W.G.Bickley - Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, vol.227, 1928. - p.383-415.
2. Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения // Е.М.Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – М.: Ленанд, 2008. – 456 с.
3. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах. Т.2. Под ред. Ю.Мураками. - М.: Мир, 1990. – 1016 с.
4. Игнатович С.Р. Многоочаговое разрушение авиационного конструкционного сплава Д16АТ // С.Р.Игнатович, Е.В.Каран, В.С.Краснопольский – Вестник двигателестроения, 2013. № 2. – с.261-264.

Введение: Современные методы оценки напряженно-деформированного состояния конструкций базируются на использовании в расчетах номинальных значений физико-механических характеристик материалов, установленных в технических условиях на их изготовление. Такой подход не учитывает возможный разброс параметров, напрямую влияющих на напряженно-деформированное состояние. При определении надежности таких конструкций, необходимо учитывать возможное отклонение физико-механических характеристик, что приводит к риску получения значения вероятности безотказной работы ниже требуемого и возврату на ранние этапы проектирования для учета возможных отклонений параметров.

Пример: Рассмотрим для примера проектирование трехслойного прецизионного рефлектора.

Для упрощения логических выводов рассмотрим в качестве критерия для определения уровня надежности превышение частоты собственных колебаний рефлектора какого-то значения, например, $f_{кр} = 170$ Гц. Представим формулу для определения f в виде:

$$f = \sqrt{NEI} \quad (1)$$

Здесь:

f – частота собственных колебаний, Гц;

N – коэффициент, зависящий от формы изделия, условий закрепления и т.д.;

E – модуль Юнга материала, Па;

I – момент инерции, м⁴.

При изготовлении конструкции величины E и I имеют допуск, определяющий разброс этих значений. Более наглядно диапазон изменения представлен на рисунке 1.



Рис. 1 – Графическое представление диапазонов E и I

Для определения отклонений физико-механических характеристик от их среднего значения введем величины K_E и K_I – коэффициенты разброса значений модуля упругости и момента инерции соответственно (формулы 2 и 3 соответственно):

$$K_E = \frac{E_{cp} - E_{min}}{E_{cp}} * 100\% = \frac{E_{max} - E_{cp}}{E_{cp}} * 100\% \quad (2)$$

$$K_I = \frac{I_{cp} - I_{min}}{I_{cp}} * 100\% = \frac{I_{max} - I_{cp}}{I_{cp}} * 100\% \quad (3)$$

Где:

E_{min}, I_{min} – минимальные значения модуля упругости и момента инерции;

E_{cp}, I_{cp} – средние значения модуля упругости и момента инерции;

E_{max}, I_{max} – максимальные значения модуля упругости и момента инерции.

В этом случае величины отклонений $E_{cp} - E_{min}$, $E_{max} - E_{cp}$, $I_{cp} - I_{min}$ и $I_{max} - I_{cp}$ определяются коэффициентами разброса. Для упрощения рассмотрим их, полагая отклонения от номинального значения в большую и меньшую сторону равными.

Рассмотрим зависимость величины f от значений E и I на примере композиционного рефлектора со следующими параметрами: диаметр апертуры $D = 2$ м и глубина $L = 0.8$ м (рис. 2).

Рассматриваемый параболический оболочечный рефлектор имеет слоистую структуру: 3 слоя внешней обшивки (монослои № 1-3 по таблице 1) из композиционного материала (КМ), слой сотового заполнителя (СЗ), 3 слоя внутренней обшивки (монослои № 5-7 по таблице 1) из КМ; слои КМ имеют схему ориентации $0/\pm 60$.

Схема ориентации и материал слоев представлены в таблице 1.

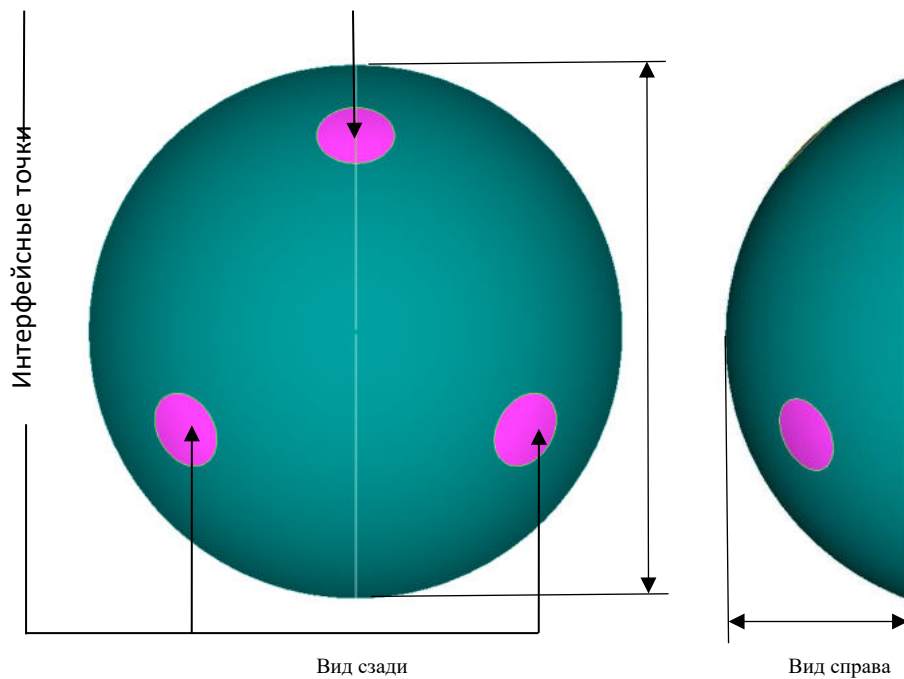


Рис. 2 – Модель рефлектора

Т а б л и ц а 1. Ориентация слоев рефлектора

Номер монослоя	Материал слоя	Толщина монослоя, м	Угол выкладки, °
1	КМ	0.00007	60
2	КМ	0.00007	-60
3	КМ	0.00007	0
4	СЗ	0.01	-
5	КМ	0.00007	0
6	КМ	0.00007	-60
7	КМ	0.00007	60

Параметры КМ и сотового заполнителя [1]:

$$E_{\text{КМ}0} = 2.55 \cdot 10^{11} \text{ Па}, K_{E_{\text{КМ}0}} = 20\%;$$

$$E_{\text{КМ}90} = 6.9 \cdot 10^9 \text{ Па}, K_{E_{\text{КМ}90}} = 20\%;$$

$$E_{\text{СЗ}} = 1.31 \cdot 10^9 \text{ Па}, K_{E_{\text{СЗ}}} = 7\%.$$

Приведенный модуль упругости обшивки [2]:

$$E = (6.895 \pm 1.305)10^9 \text{ Па}.$$

Учет разброса по моменту инерции осуществляется с помощью учета разброса высоты соты:

$$h = 10 \pm 0.05 \text{ мм}, K_h = 0.5\%.$$

Вычисление момента инерции (формулы 4, 5) производится для прямоугольного сечения (рис. 3):

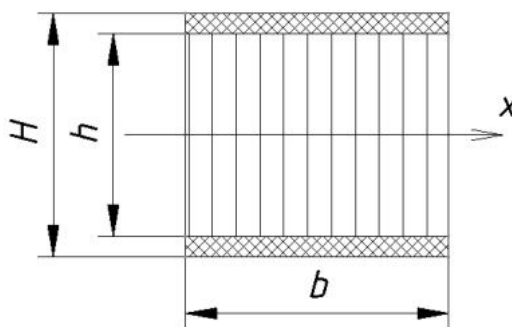


Рис. 3 – Схема рассматриваемого сечения

Расчет приведенных моментов инерции рефлектора [3] производился по формулам 4 и 5:

$$I_{\text{КМ}} = b \frac{H^3 - h^3}{12} \quad (4)$$

$$I_{\text{СЗ}} = b \frac{h^3}{12} \quad (5)$$

В рамках данной работы рассмотрим суммарную жесткость EI , ее вид:

$$EI = E_{\text{КМ}}I_{\text{КМ}} + E_{\text{СЗ}}I_{\text{СЗ}} = E_{\text{КМ}}b \frac{H^3 - h^3}{12} + E_{\text{СЗ}}b \frac{h^3}{12} \quad (6)$$

По формуле 6, приняв ширину рассматриваемого сечения за 1, можно вычислить значения комплекса EI для различных соотношений модулю Юнга материала и высоты сотового заполнителя:

Т а б л и ц а 2. Значения комплекса EI

E , Па	I , м ⁴	EI , Па*м ⁴	$E_{cp}I_{cp}$, Па*м ⁴	Отличие от среднего значения, %
$E_{max} = 8.190 * 10^9$	$I_{h max} = 9.564 * 10^{-8}$	$7.833 * 10^2$	$6.491 * 10^2$	20.7
	$I_{h min} = 9.293 * 10^{-8}$	$7.611 * 10^2$		17.3
$E_{min} = 5.580 * 10^9$	$I_{h max} = 9.564 * 10^{-8}$	$5.337 * 10^2$		17.8
	$I_{h min} = 9.293 * 10^{-8}$	$5.185 * 10^2$		20.1

С помощью вычислений в программе NASTRAN для номинального значения EI было определено значение частоты собственных колебаний $f_{ном} = 179.5$ Гц, вычислим по формуле 1 значение коэффициента N :

$$N = \frac{f^2}{EI} = \frac{179.5^2}{649.1} = 49.627 \frac{\text{Гц}^2}{\text{Па} * \text{м}^4}$$

Далее для различных сочетаний EI можно определить величину f . Графически диапазон изменения f в зависимости от E , I и EI для рассматриваемого рефлектора (формула 1) можно представить в виде:

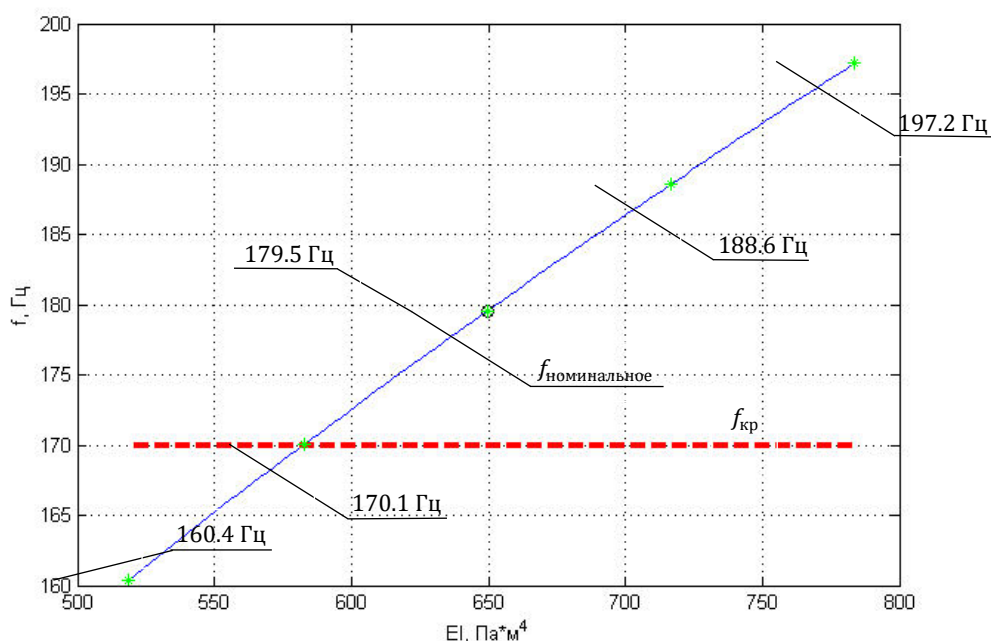


Рис. 4 Диапазон изменения f в зависимости от величины $EI = 518.5 \dots 783.3$ Па * м⁴ ($E = 5.580 * 10^9 \dots 8.190 * 10^9$ Па, $I = 9.293 * 10^{-8} \dots 9.564 * 10^{-8}$ м⁴)

Из графика, представленного на рис. 4) видно, что при учете разброса физико-механических характеристик материала наблюдается сильный разброс частоты собственных колебаний рефлектора. При этом номинальное значение f , соответствующее средним значениям E и I , превышает критическое, однако, при учете разброса физико-механических характеристик, частота собственных колебаний может оказаться меньше $f_{кр}$.

На рисунках 5 и 6 показано изменение частоты собственных колебаний в зависимости от параметров I и E соответственно. Можно заметить, что изменение момента инерции не сильно влияет на величину f и, при $E = E_{cp}$ не приводит к снижению частоты собственных колебаний ниже критической, а изменение модуля упругости материала, напротив, приводит к сильному отклонению частоты собственных колебаний от номинального значения, вследствие чего можно сделать вывод о необходимости более тщательно контролировать значение модуля упругости материалов на этапе изготовления.

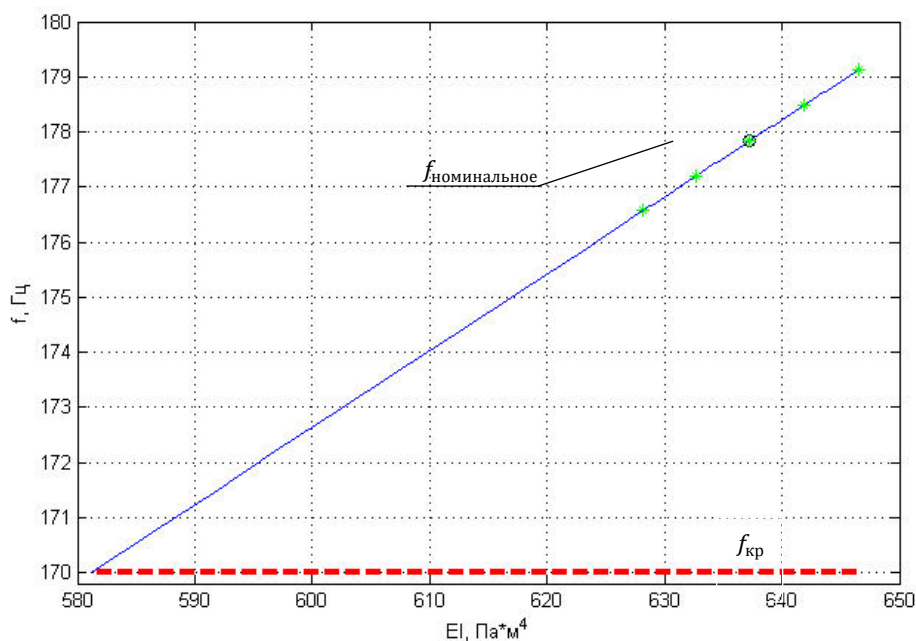


Рис. 5 Диапазон изменения f при $E = E_{cp} = 6.885 * 10^9 \text{ Па} = const$, $I = 9.293 * 10^{-8} \dots 9.564 * 10^{-8} \text{ м}^4$, аппроксимация на промежутке $I \in [8.597 * 10^{-8} \dots 9.293 * 10^{-8}] \text{ м}^4$

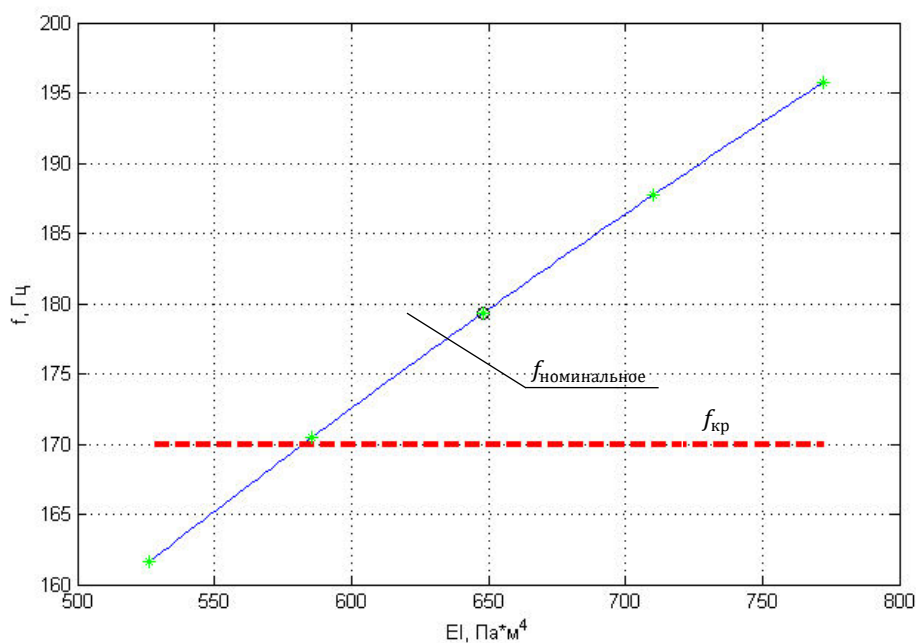


Рис. 6 Диапазон изменения f при $E = 5.580 * 10^9 \dots 8.190 * 10^9 \text{ Па}$, $I = I_{cp} = 9.4285 * 10^{-8} = const$

Вывод: Полученные результаты расчетов позволяют сделать вывод, что при проектировании необходим учет разброса физико-механических характеристик материалов, так как он напрямую влияет на показатели надежности конструкции. Также, при проектировании конструкции, необходимо проведение анализов, аналогичных представленному в работе, для определения влияния физико-механических параметров материалов на надежность изделия.

Библиографический список

1. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым наполнителем. – М.: Машиностроение, 1982. – 152 с., ил.
2. Fiber-reinforced composites : materials, manufacturing, and design / P.K. Mallick. – 3rd ed.
3. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.– 3-е изд., перераб. и доп.– К.: “Издательство Дельта”, 2008.– 816 с.

ЦИФРОВОЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ*С. А. Чубарев, В. А. Светлаков, В. И. Гарюн, А.Е. Суровцев**Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н. А. Семихатова.*

Развитие цифровых источников питания в промышленности долгое время находилось на уровне концептуальной идеи. Считалось, что аналоговые источники питания являются надёжными и не заменимыми на промышленных производствах, в военной и космической отраслях. Но данные источники имели недостатки: большие габариты, вследствие, большой вес; сильная тепловыделенность элементов; для контроля выходных параметров необходимо применение сторонних устройств. Большой опыт безотказного использования и простота изготовления аналоговых источников питания, долгое время не давали толчок разработчикам для перехода на более сложные для разработки, но более эффективные при эксплуатации, цифровые источники питания.

Использование цифрового управления в источниках питания открывает реализацию множества возможностей, таких как:

- уменьшение габаритов источника, за счёт работы на более высоких частотах;
- контроль тока и напряжения без внедрения дополнительных устройств;
- простота организации защит по току и напряжению;
- автоматическое ведение учета наработки устройств;
- возможность передачи диагностических и управляющих данных по цифровым интерфейсам, что позволяет организовать дистанционное управление;
- выполнение динамических изменений в процессе работы;
- возможность отработки сложных алгоритмов включения питания, цифровых фильтров и др.

Высокая эффективность цифровых источников, работающих в широком диапазоне нагрузок, позволяет экономить энергию, что приводит к уменьшению тепловой нагрузки на компоненты, упрощает задачу по обеспечению теплоотвода и увеличивает время работы без отказов, что очень важно в космической отрасли. Все эти факторы привели к решению о разработке цифрового источника питания, который можно применять для организации вторичного питания оборудования на космодромах и различных военных объектах.

Структуру источников питания для космической и военной отраслей необходимо организовывать максимально надёжной, способной работать при возникновении неисправностей. Для выполнения данного требования все источники питания имеют минимум два канала управления и две сети первичного питания. В разрабатываемом цифровом источнике питания решено применить блочную структуру, обеспечивающую высокую надёжность. Источник имеет два канала управления, подключённых к блоку связи (БС). Для организации стабильного вторичного питания четыре блока питания (БП) подключаются к двум независимым сетям переменного напряжения. Контроль входных и выходных параметров осуществляется блоком контроля (БК). Все блоки устанавливаются в модуль монтажа (ММ), который связывает их между собой. Взаимодействие всех блоков осуществляется через интерфейс CAN. Источник питания рассчитан на бесперебойную работу при возникновении любой одной неисправности. Структурная схема цифрового источника питания приведена на рис. 1.

Основные функции цифрового источника питания:

1. Преобразование переменного напряжения в диапазоне от 85В до 256 В, в постоянное, номиналом от 25 В до 36 В, с возможностью регулировки в реальный момент времени.
2. Выдача стабильной мощности 2 кВт, в независимости от различных внешних факторов.
3. Постоянный контроль выходного напряжения.
4. Проведение самопроверки (проверка работоспособности микроконтроллера, наличия входного питания, связь между блоками источника по линии CAN и др.) перед началом работы.
5. Управление источником питания через интерфейс Ethernet.
6. Проведение проверки кабельных сетей, подключённых к источнику питания.
7. Стабильная работа в случае возникновения одной неисправности любого типа.
8. Универсальное применение в различных сферах деятельности.
9. Использование радиоэлементов российского производства.

Структура силовой части выполнена несколькими блоками питания, каждый максимальной мощностью 1 кВт. Данная структура позволяет сделать источник питания универсальным, так как выбор нужной мощности осуществляется набором разного количества блоков питания, т.е. для источника мощностью 1,4 кВт нужно взять 2 блока питания, которые будут работать на мощности 700 Вт каждый. В разрабатываемом устройстве требуется выходная мощность 2 кВт, чтобы не работать в максимальных режимах и иметь возможность продолжать работу при отказе одной из сети первичного питания использовано 4 блока питания.

В настоящее время, в ракетно-космической тематике (РКТ), получили большее развитие блоки питания, делящиеся на два типа: AC/DC преобразователи – преобразователи переменного напряжения в постоянное; DC/DC преобразователи – преобразователи постоянного напряжения в постоянное.

Класс преобразователей AC/DC структурно включает в себя две ступени: выпрямитель, преобразующий переменное напряжение (AC) в постоянное (DC), и ступень преобразования постоянного напряжения, для формирования одного или нескольких номиналов стабилизированного значения. Базовая структура современных блоков питания приведена на рис. 2.

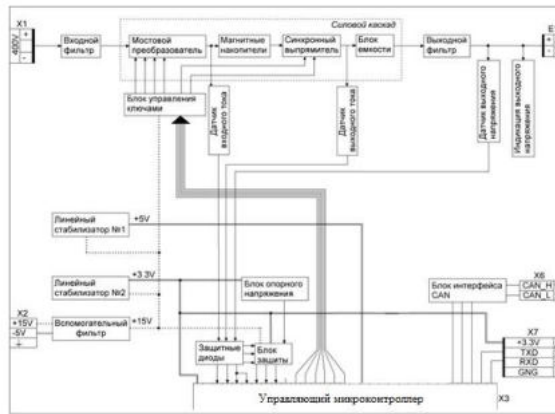


Рис. 4. Структурная схема КМП

В схему КМП внедрено «мягкое» переключение транзисторов[7], так как при стандартном переключении транзисторов появляются большие ударные токи и коммутационные потери. Использование «мягкого» переключения позволяет переключать транзистор при «нулевых» токах через сток-исток, что позволяет избавиться от ударных токов и, в результате, уменьшить динамические потери и увеличить КПД.

Внедрение в ККМ и КМП управляющих микроконтроллеров позволяет использовать цифровые интерфейсы для взаимодействия между собой (внутренний интерфейс UART) и для передачи управляющих данных между всеми БП и БС (интерфейс CAN). Также, для синхронизации блоков питания между собой, добавлен дополнительный цифровой интерфейс CAN, обеспечивающий контроль стабильности выдаваемой мощности на шину нагрузки, в независимости от количества рабочих блоков. Так, при отказе одной сети входного питания, отключаются два БП, но благодаря возможности синхронизации по CAN два работающих блока получают информацию о неисправности и увеличивают свою выходную мощность до требуемых параметров.

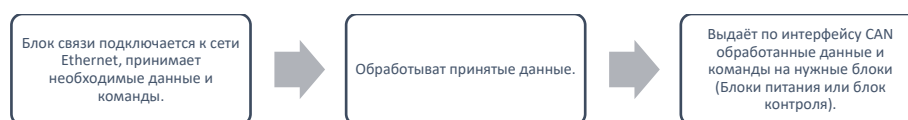
Таким образом, применение ККМ и КМП, с мягким переключением транзисторов и цифровым управлением микроконтроллерами позволило снизить тепловыделение элементов и позволило получить расчётное КПД 90% при относительно компактных габаритах.

Для реализации связи блоков питания с управляющим компьютером был разработан блок связи, а интерфейсом взаимодействия выбран Ethernet. Данный интерфейс позволяет «завязать» в одну локальную сеть множество устройств, что позволяет управлять несколькими источниками питания с одного компьютера.

Для передачи данных внутри прибора выбран интерфейс CAN. Выбор данного интерфейса обоснован структурой источника питания, так как необходимо управлять несколькими блоками питания и блоком контроля. Интерфейс CAN хорошо зарекомендовал себя в автомобилестроении, где требуется управление множеством систем в сложных условиях эксплуатации, что, несомненно, подходит под жесткие требования космической отрасли. Ещё одна важная функция блока связи – это хранение и сбор времени наработки всех блоков, а так же сбор диагностических данных прибора.

Структура блока сообщения сделана двухканальной, что позволяет работать при неисправности какой-либо линии связи, отсутствия питания одной из сетей, и любой другой одной возможной неисправности.

Принцип работы блока связи весьма прост:



Блок контроля служит для различных проверок кабельных сетей, подстыкованных к источнику питания. Блок контроля позволяет проверить цепи на их стыковку с источником, проверить сопротивление цепей, целостность кабельных линий, позволяет контролировать выходное напряжение.

Вывод. Современный уровень развития отечественной элементной базы позволяет внедрять цифровое управление в серийно-изготавливаемые источники вторичного питания. Внедрение микроконтроллерного управления позволило добиться высокого расчётного КПД при малых габаритах источника, что было не возможно в аналоговых источниках питания. Дополнительные диагностические функции, реализация которых стала возможна за счёт использования микроконтроллеров, обеспечивают большую надёжность, важную для ракетно-космической отрасли. При этом, возможность изменения выходных параметров цифровых источников питания делает данные блоки универсальными и позволяет использовать их при решении разных задач.

Библиографический список

1. Васильев А., Худяков В., Хабuzов В. Анализ современных методов и технических средств коррекции коэффициента мощности у импульсных устройств // Силовая Электроника, №2'2004, С. 72-77.
2. Полищук А. Методы измерения тока в активных корректорах коэффициента мощности// Силовая Электроника, №1'2005, С. 80-83.
3. Белов Г., Павлова А., Серебрянников А. Сравнение однофазного и двухфазного корректоров коэффициента мощности с отпиранием силовых транзисторов при нуле токов дросселей // Силовая Электроника, №3'2009, С. 36-39
4. Климов В., Климова С., Карпиленко Ю. Корректоры коэффициента мощности однофазных источников бесперебойного питания // Силовая Электроника, №3'2009, С. 40-42.

5. Гусев Б., Овчинников Д. Транзисторный двухтрансформаторный мостовой преобразователь постоянного напряжения // Силовая Электроника, №2'2005, С. 48-52.
6. Ланцов В., Эраносян С. Квазирезонансные источники питания: проблемы, новый взгляд // Силовая Электроника, №3'2007, С. 78-84.
7. Мелешин В., Овчинников Д. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии // Техносфера, Москва, Часть 1, 5.

УДК 621.45.022.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Мелузов Р.А., Дмитриев Д.К.

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

Газотурбинные двигатели имеют широкую область применения. Развитие технологии изготовления двигателей в сочетании с использованием методов математического моделирования позволили целому ряду предприятий перейти к полномасштабному производству малоразмерных двигателей [1].

Применение традиционных технологий при изготовлении малоразмерных газотурбинных двигателей является неоправданным, так как при уменьшении габаритов двигателя технологические особенности сборки его составных частей оказывают существенное влияние на физические процессы протекающие внутри двигателя. Решением этой проблемы может послужить применение аддитивных технологий. Основным преимуществом аддитивных технологий является возможность изготовления сложнопрофильных конструкций, как единого целого, а также будет достигнуто снижение прямых и косвенных затрат [2].

Одним из важных узлов авиационного двигателя является камера сгорания, которая способствует преобразованию химической энергии топлива в тепловую. Организация высокоэффективного и устойчивого процесса горения керосина в потоке сжатого воздуха в условиях малого объема и времени пребывания топливно-воздушной смеси в жаровой трубе является сложной технической задачей. Камера сгорания должна обеспечивать надежную стабилизацию пламени и высокую полноту сгорания топлива [3].

В работе рассматриваются семь исполнений камер сгорания, которые были получены путем оптимизации исходной геометрии (Рисунок 1), сконструированной в студенческом конструкторском бюро. Первые три модели имеют закругленный выходной канал, остальные модели имеют прямой выходной канал для исследования возможности установки осевой турбины. Система подачи топлива представлена испарительными трубками, как самой удачной для двигателей данных габаритов.

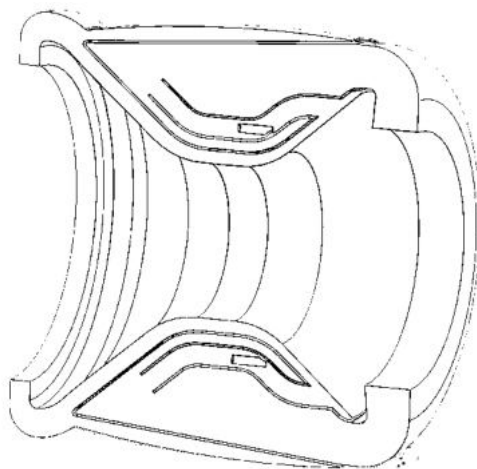


Рисунок 11 - Разрез исходной геометрии

Целью данной работы является численное моделирование процесса горения на двух режимах работы двигателя: максимальная тяга и малый газ, а также оценка влияния теплового воздействия топливно-воздушной смеси на внутренний контур жаровой трубы. Моделирование выполнялось в пакете программ Ansys Fluent.

Газодинамика процесса математически описывается системой уравнений Навье-Стокса, осредненной по Фавру. Применяется двухслойная модель турбулентности Ментера. Подключается модель горения Species Transport, основанная на уравнении переноса и сохранения химических веществ. Используется модель диссипации вихря Eddy-dissipation, в основе которой лежит модель разрушения вихрей, предложенная Сполдингом. Важной составляющей решения системы является корректное задание граничных условий, которые представлены в таблице 1 для разных режимов работы двигателя

При анализе распределения параметров первого исполнения геометрии на режиме максимальной тяги было выявлено, что происходит устойчивое горение в жаровой трубе и, керосин сжигается полностью, что свидетельствует о правильном проектировании камеры в целом. На режиме малого газа горение возникает в испарительной форсунке. Максимальные температуры приходятся на внутренний контур жаровой трубы. Подобное тепловое воздействие может оказать отрицательное влияние на термостойкость материала и эксплуатацию двигателя в целом.

Таблица 1 - Граничные условия

Граничное условие	Значение	
	МТ	МГ
давление воздуха на входе	230 кПа	1,05 атм
давление воздуха на выходе	210 кПа	1 атм
давление топлива	3 атм	1,05 атм
расход воздуха	0,05 кг/с	6,667 г/с
расход топлива	0,001 кг/с	0,02 г/с
температура воздуха на входе	386 К	386 К
температура топлива на входе	350 К	350 К
температура продуктов сгорания на выходе	1040 К	800 К

Во втором исполнении геометрии (Рисунок 2) был расширен внешний канал камеры над второй половиной жаровой трубы и сокращено количество отверстий подачи воздуха при сохранении общей площади. При анализе распределения параметров на режиме максимальной тяги было выявлено, что фронт пламени сместился ближе к выходу. Расширение внешнего канала над второй половиной жаровой трубы привело к дополнительному поступлению окислителя, а уменьшение количества отверстий подачи воздуха на внутренней стенке привело к тому, что большая масса потока стала поступать в испарительные форсунки. Все это поспособствовало повышению скорости истечения смеси. На режиме малого газа область горения возникла в нижней части испарительной форсунки.

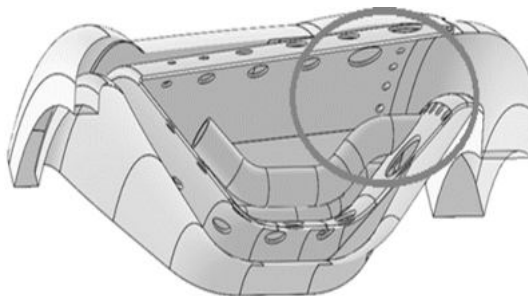


Рисунок 12 - Вторая модель

В третьем исполнении геометрии (Рисунок 3) были взяты конструктивные решения, из двух предыдущих моделей, улучшающие процесс горения, а именно – расширение канала над внешней стенкой жаровой трубы и возвращение изначального количества отверстий подачи воздуха на внутренней стенке, также был расширен канал у внутренней стенки, чтобы отодвинуть процесс горения от неё. При анализе распределения параметров на режиме максимальной тяги было выявлено, что зона горения заняла все пространство двух предыдущих вариантов, а на режиме малого газа тепловое воздействие на внутренний контур жаровой трубы стало меньше.



Рисунок 13 - Третья модель

Начиная с четвертого исполнения геометрии (Рисунок 4) был смоделирован прямой выходной канал. При анализе результатов в режиме максимальной тяги видно, что изменение геометрии привело к увеличению скорости истечения продуктов сгорания из камеры, а это означает, что пламя будет забрасываться на турбину.

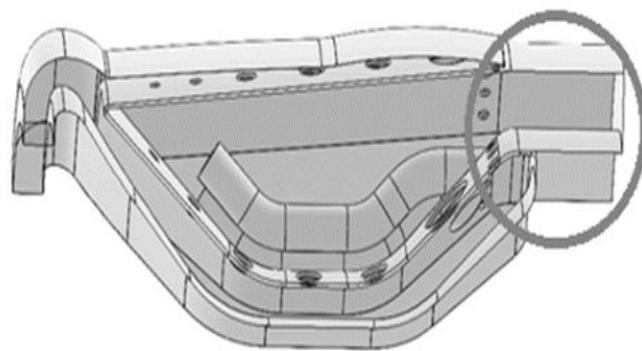


Рисунок 4 - Четвертая модель

В пятом исполнении геометрии (Рисунок 5) испарительной форсунка была увеличена в длину. Модель оказалась самой неудачной, так как тепловое воздействие на внутренний контур жаровой трубы оказалось самым большим.

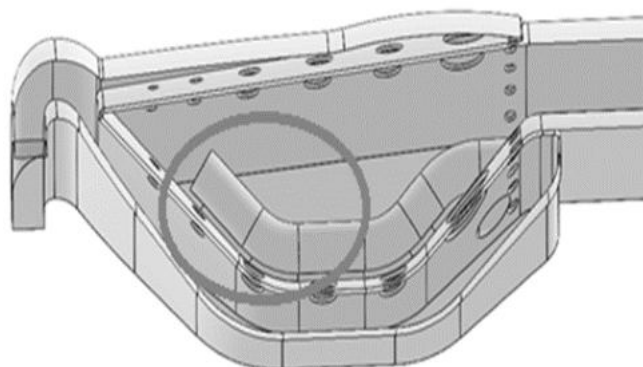


Рисунок 5 - Пятая модель

В шестом исполнении геометрии (Рисунок 6) был смоделирован прямоугольный канал испарительной форсунки. С точки зрения наилучшего расположения ядра горения на режиме максимальной тяги среди моделей с прямым выходным каналом эта модель оказалась самой удачной. При анализе распределения температуры на режиме малого газа было выявлено, что внутренняя стенка жаровой трубы ощущает наименьшее тепловое воздействие по сравнению с остальными исполнениями геометрии.

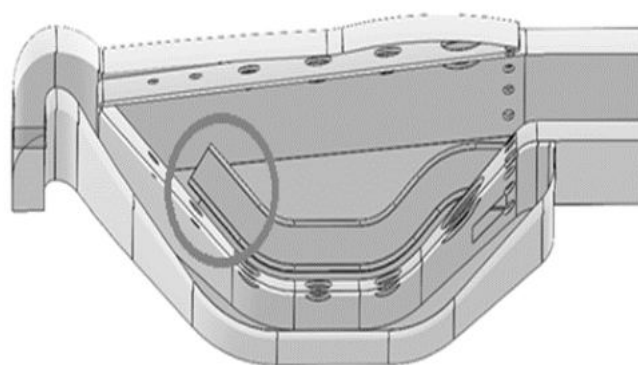


Рисунок 6 - Шестая модель

В седьмом исполнении геометрии (Рисунок 7) прямоугольные испарительные форсунки были заменены на квадратные и обрезаны на выходе. В результате был получен отрицательный результат. Зона горения на режиме максимальной тяги поднялась к верхней стенке жаровой трубы за счет поворота потока на выходе из испарительной форсунки.

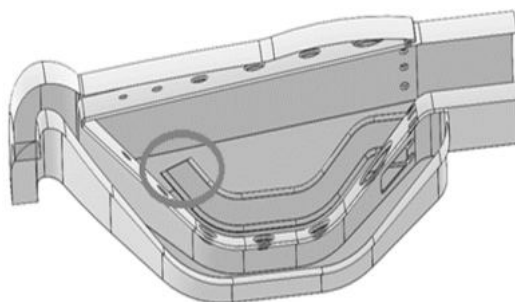


Рисунок 7 - Седьмая модель

Для наглядной оценки теплового воздействия потока на конструкцию камеры сгорания была измерена температура в характерных областях каждого исполнения геометрии (Рисунок 8-9), значения которой представлена в таблицах 2-3.

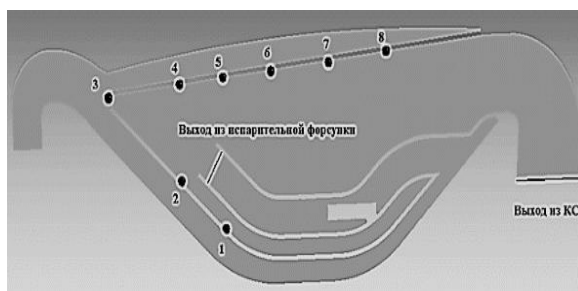


Рисунок 8 - Расположение замеров температуры в исполнениях геометрии с закругленным выходным каналом

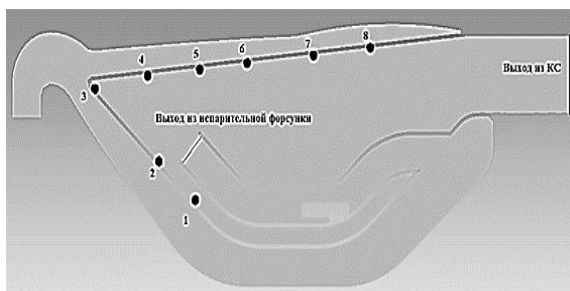


Рисунок 9 - Расположение замеров температуры в исполнениях геометрии с прямым выходным каналом

Среди исполнений геометрии с закругленным выходным каналом приемлемой оказалась первая модель, для которой необходимо охладить верхний внутренний контур во второй половине жаровой трубы.

Таблица 2 - Температурные значения для моделей с закругленным выходным каналом

Исследуемая геометрия №	Режим – максимальная тяга									
	Выход из КС	Выход из испарительной форсунки	Точка №							
			1	2	3	4	5	6	7	8
	Температура, К									
1	1287	1320	1108	1556	1458	2142	2202	2126	2257	2458
2	1229	696	1894	1818	1663	1651	2094	2126	2227	2331
3	1308	1236	1612	1523	1359	1929	1816	2026	2179	2311
	Режим – малый газ									
1	531	1986	548	2363	2303	1987	995	697	688	698
2	561	1752	615	2269	2293	2238	1935	978	967	888
3	549	1485	644	2278	2303	1727	1571	956	956	904

Таблица 3 - Температурные значения для моделей с прямым выходным каналом

Исследуемая геометрия №	Режим – максимальная тяга									
	Выход из КС	Выход из испарительной форсунки	Точка №							
			1	2	3	4	5	6	7	8
	Температура, К									
4	1302	1160	1556	1455	1335	1983	1894	2049	2218	2345
5	1225	1239	1918	1185	1330	1386	1352	1341	2068	2321
6	1562	733	1354	1126	1179	1558	1274	1415	1777	1787
7	1509	752	1780	1635	1778	2008	2303	2267	2269	2442
	Режим – малый газ									
4	553	1424	647	2255	2314	1837	1895	1021	1009	939
5	598	1472	865	2176	2223	1906	1475	1104	1006	867
6	714	1698	628	2118	2164	2232	2010	1597	1341	1056
7	611	1646	551	2384	2335	1825	1435	1239	1000	841

Среди исполнений геометрии с прямым выходным каналом приемлемой оказалась шестая модель, для которой также необходимо охладить верхний внутренний контур во второй половине жаровой трубы, и снизить температуру продуктов сгорания на выходе на турбину.

В результате анализа табличных данных можно сделать вывод, что все геометрические модели испытывают значительную тепловую нагрузку и требуют доработки. Необходимо не допустить соприкосновения горячих газов с внутренней стенкой жаровой трубы и уменьшить температуру продуктов сгорания на выходе из камеры.

Результаты моделирования показали, что камеры сгорания, адаптированные под аддитивные технологии, обеспечивают необходимые параметры для горения топлива.

Перспективы темы работы связаны с процессом оптимизации данной геометрии и созданием усовершенствованной камеры, которая в последствии может быть установлена на испытательный стенд для дальнейшей студенческой научно-исследовательской работы.

Библиографический список

1. Микро-ТРД для беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Официальный сайт Studmed.ru – Электрон. дан. – [Б. м.], 2020. – URL: https://www.studmed.ru/view/rostopchin-vv-mikro-trd-dlya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov_ca4c532a999.html (дата обращения 10.03.2021).
2. Побелянский А.В., Исследование возможностей аддитивных технологий при создании элементов двигательных установок [Текст] / Побелянский А.В., Левихина А.А. / В сборнике: Аддитивные технологии: настоящее и будущее. Сборник докладов VI Международной конференции. Москва, 2020. С. 19-36.
3. Дмитриев Д. К., Модульная малоразмерная газотурбинная энергетическая установка весом 200 гр. [Текст] / Дмитриев Д. К., Побелянский А. В. / «Молодежь. Техника. Космос: труды XI Всероссийской молодежной науч.-техн. конф.». Том 1 / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2019. – 485 с. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 56). с. 146-149.
4. Дмитриев Д. К., Учет влияния микроразмерности двигателя на коэффициент полезного действия лопаточных машин микроразмерных ГТД [Текст] / Дмитриев Д. К., Побелянский А. В. / «Молодежь. Техника. Космос: труды двенадцатой общерос. молодежн. науч.-техн. конф.». Том 2 / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 330 с. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 67). с. 191 - 195.
5. Мелузов Р.А., Численное моделирование внутрикамерных процессов микроразмерного газотурбинного двигателя [Текст] / Мелузов Р.А., Тетерина И.В. / Информационные технологии в области науки и техники: материалы XIX Открытой научно-практической конференции учащихся, студентов и аспирантов. ГБНОУ «СПБ ГДТЮ». – СПб., 2021. с. 38-42.
6. Дмитриев Д.К., Анализ персональных микроэнергетических установок с удельной мощностью от 10 до 1000 Вт/кг [Текст] / Д.К. Дмитриев, Д.Г. Кравченко, А.В. Побелянский / «КАЛАШНИКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ. V Всероссийская научно-практическая конференция: материалы конференции» / Институт компьютерных исследований – Ижевск; 2018 — с. 152-155.
7. Мелузов Р.А., Численное моделирование внутрикамерных процессов микроразмерного газотурбинного двигателя [Текст] / Мелузов Р.А., Дмитриев Д. К. / «Молодежь. Техника. Космос: труды XIII Общероссийской молодежной науч.-техн. конф.». Том 1 / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2019 с. 219-225.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ СОПЛА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА FLUENT ANSYS

Михайлов М.В., Анисимов И.О., Гнедов Н.М.

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

В современных эксплуатируемых ракетных двигателях при конструировании соплового устройства летательных аппаратов, движущихся со сверхзвуковой скоростью применяется принцип сопла Лавала. Наиболее распространённые в ракетной технике сопла – колоколообразные. В зависимости от степени расширения сопла возможны следующие режимы истечения реактивной струи ракетного двигателя:

- оптимальный режим расширения сопла;
- режим перерасширения;
- режим недорасширения.

При режимах перерасширения и недорасширения в условиях переменного атмосферного давления теряется часть удельного импульса двигателя. Данная проблема характерна для большинства современных эксплуатируемых ракетных двигателей. Для определённой высоты выбранное сопло может быть сконструировано идеально, и оно будет работать в расчётном режиме на данной высоте и при данном давлении. Однако, для других высот будут реализовываться нерасчётные режимы истечения газовой струи. Одним из способов решения данной проблемы может быть использование клинообразного сопла вместо колоколообразного в ракетном двигателе.

На практике, вокруг центрального тела устанавливается ряд камер сгорания, направленных к центру сопла, струи газа падающие на тело формируют струю определённой формы, спутный поток воздуха также вносит вклад в формирование газовой струи. Основная идея такой конструкции состоит в том, что на малых высотах атмосферное давление прижимает газ, выходящий из камер сгорания, к выступающему клину. Затем рециркуляция в основании клина повышает давление до значений окружающей атмосферы. Из-за такой конструкции, тяга летательного аппарата не достигает предельно возможных значений и не претерпевает значительного снижения, по сравнению с обычным соплом.

На рисунке 1 показано изменение свободной поверхности расширения и давления вдоль контура поверхности центрального тела при различных режимах работы сопла [1].

В данной работе для численного моделирования газодинамики сопла с центральным телом использовался пакет программ *Fluent Ansys*.

При выполнении работы рассматривалась задача истечения газа через сопло с заданной геометрией при различных условиях внешней среды спутного потока атмосферного воздуха на различных высотах.

Граничные условия на входе в расчётную область ставились следующие:

- скорость спутного потока воздуха – 2 Маха;
- рассматриваемые высоты: 0, 5 и 10 километров над морем.

Параметры в критическом сечении сопла:

- давление – 2 МПа;
- температура газовой струи – 1500 К.

Сопловой аппарат состоит из центрального тела и направляющей стенки (рисунок 2). Геометрия центрального тела представляет собой конусообразную поверхность длиной 1 м. и диаметром 0,3 м. Толщина направляющей стенки – 0,005 м., длина – 0,25 м. Критическое сечение сопла – 0,08 м.

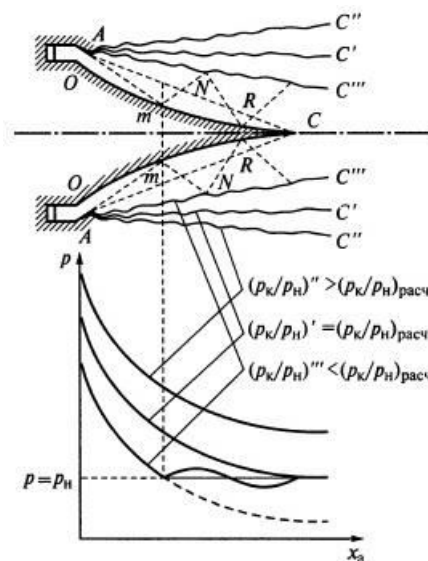


Рисунок 14 – изменение свободной поверхности расширения и давления вдоль контура центрального тела при различных режимах работы сопла

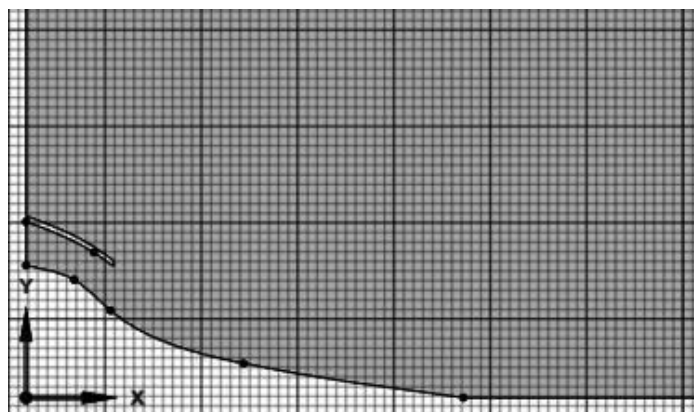


Рисунок 2 – геометрия расчётной задачи

Математическая модель рассматриваемой задачи представляет собой осредненные уравнения Навье–Стокса для сжимаемого совершенного газа (знаки осреднения опущены) представлены в общем виде системой уравнений (1) и состоят из уравнений сохранения массы, импульса и энергии:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0; \\ \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_m + \tau_t) + \rho \vec{g} + \vec{F}; \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \vec{u} \cdot (\tau_m + \tau_t) \right] + S_h; \end{array} \right. \quad (1)$$

где \vec{u} – вектор скорости осредненного течения с компонентами u, v и $w, \tau_m + \tau_t$ – молекулярная и турбулентная составляющие тензора вязких напряжений, $E = c_v T + 0,5(u^2 + v^2 + w^2)$ – полная энергия газа, $H = E + p/\rho = c_p T + 0,5(u^2 + v^2 + w^2)$ – его полная энтальпия, T – температура, $c_v = (c_p - R)$ – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, R – газовая постоянная, $\rho \vec{g}$ – гравитационная сила, \vec{F} – внешние силы, $k_{eff} = k + k_t$ – эффективный коэффициент теплоотдачи, \vec{J}_j – диффузионный член, h_j – энтальпия образования компонента, S_h – источниковый член энергии (позволяет учесть процесс образования и поглощения тепловой энергии).

Система уравнений (1) является незамкнутой, поэтому необходимо использовать дополнительно модель турбулентности. Модель типа $k - \varepsilon$ (2 – 5) является высоко-рейнولدсовой, предложенной Spalding, Launder:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \varepsilon; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (3)$$

$$P_k = -\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \nu_t S^2; \quad (4)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где ε – удельная диссипация; k – кинетическая энергия турбулентности; P_k – генерационный член в уравнении для кинетической энергии; ν_t – турбулентная вязкость. Константы найдены на основе зависимости $c_2 = c_1 - k^2/\sigma_\varepsilon \sqrt{C_\mu}$ и струйных течений: $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $c_\mu = 0.09$.

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 3-9. Из полученных численным моделированием результатов целесообразно обратить внимание на поля распределения температуры, давления, числа Маха, числа Рейнольдса, кинетической энергии, а также графики зависимости температуры и давления по длине центрального тела. Анализируя полученные поля распределения можно заметить, что изменение температуры внутри газовой струи незначительно; полное давление в центре потока значительно меньше, чем вблизи границы струи и потока атмосферного воздуха (в 1,3-1,5 раза); с увеличением высоты (рассматривается диапазон от 0 до 10 км. с шагом 5 км.), наибольшее значение числа Маха также увеличивается.

Графики давления и температуры позволяют сделать вывод о равномерном распределении данных величин по длине центрального тела.

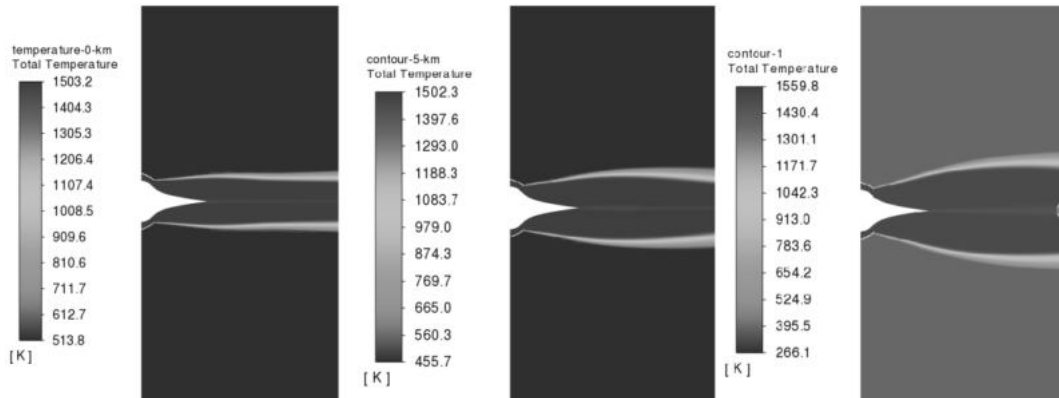


Рисунок 3 – поля полной температуры для высот 0, 5, 10 км. над уровнем моря

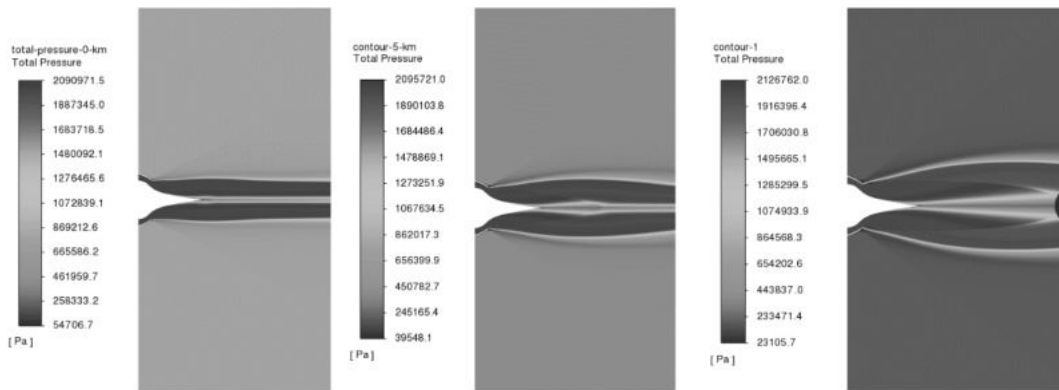


Рисунок 4 – поля полного давления для высот 0, 5, 10 км. над уровнем моря

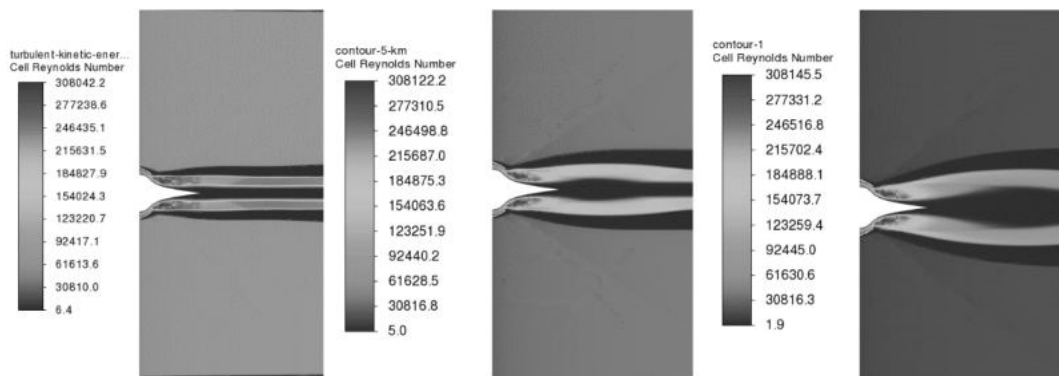


Рисунок 5 – поля числа Рейнольдса для высот 0, 5, 10 км. над уровнем моря

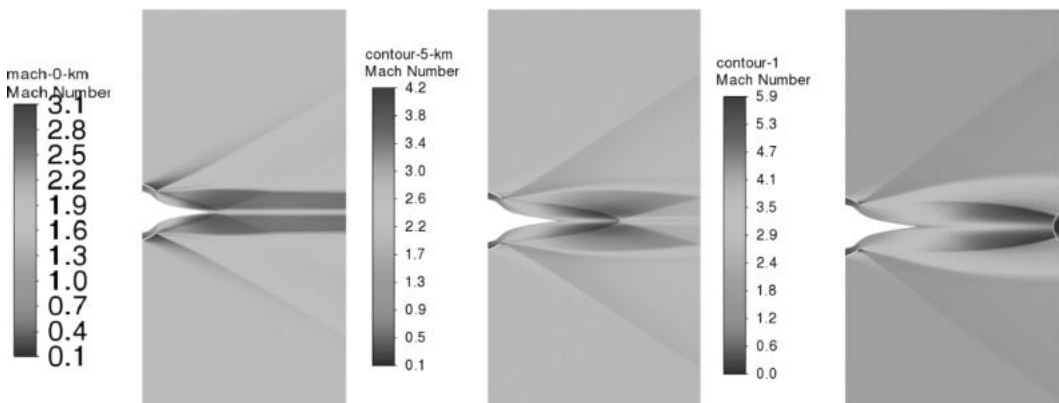


Рисунок 6 – поля числа Маха для высот 0, 5, 10 км. над уровнем моря

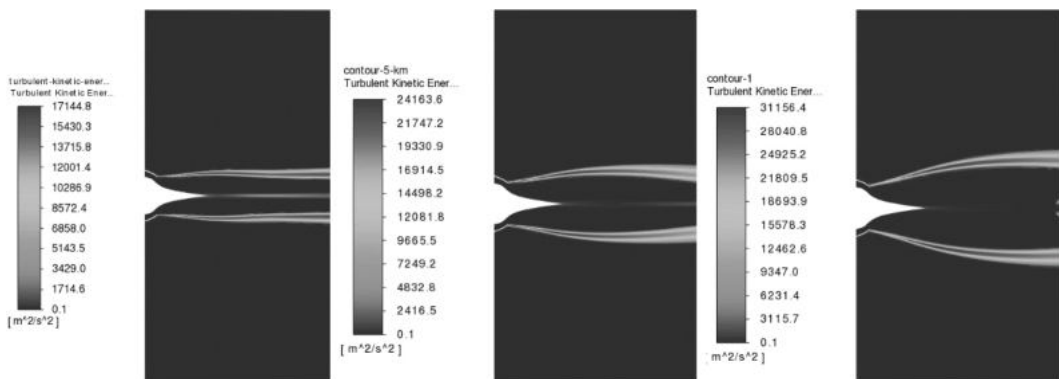


Рисунок 7 – поля турбулентной кинетической энергии для высот 0, 5, 10 км. над уровнем моря

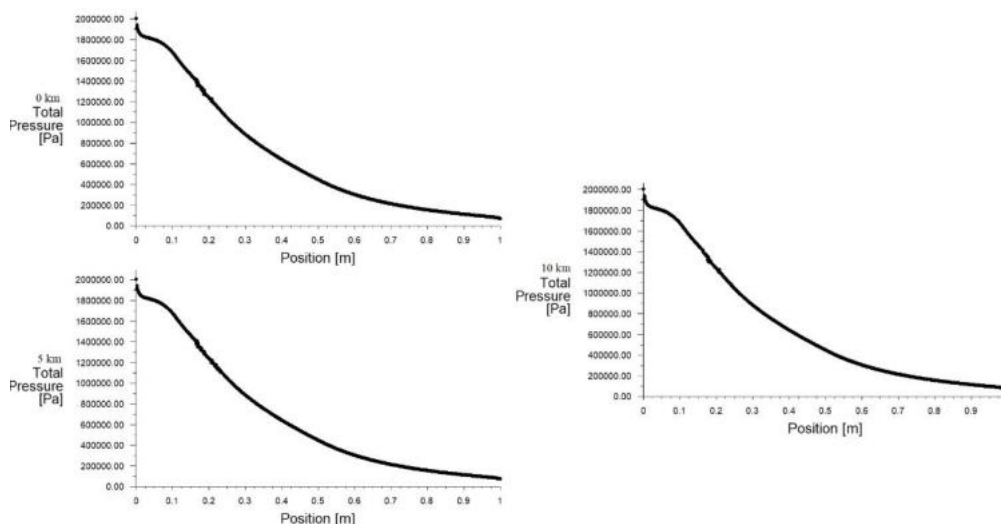


Рисунок 8 – график распределения полного давления на стенку центрального тела по длине сопла

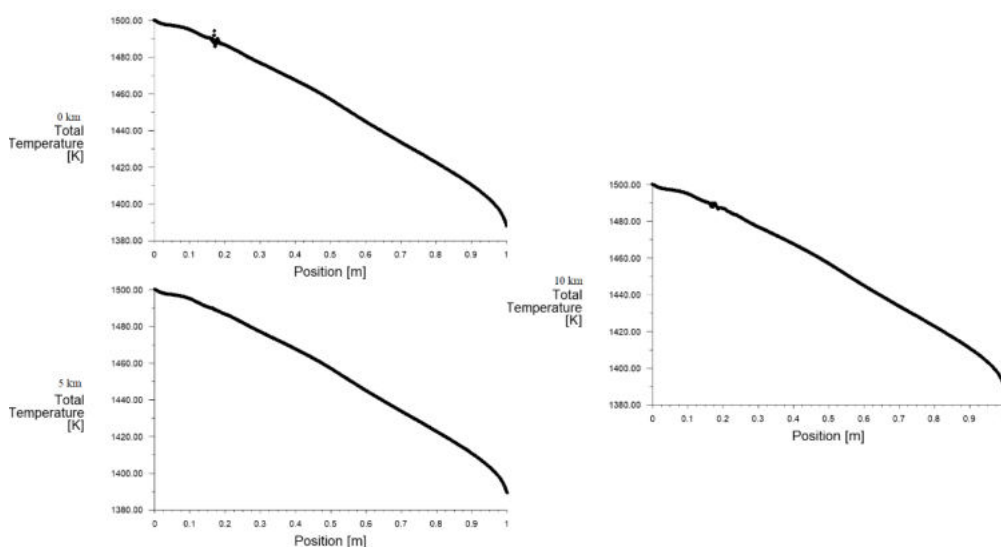


Рисунок 9 – график распределения полной температуры на стенку центрального тела по длине сопла

Значения тяги, действующей на центральное тело для всех рассматриваемых высот над уровнем моря представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения тяги, действующей на центральное тело

Рассматриваемая высота над поверхностью Земли (км.)	Значение тяги на стенку центрального тела (Н)
0	272395
5	272428
10	272233

Теория о том, что при истечении реактивной струи через сопло с клинообразной частью предполагает, что, струя газа выходящая из камеры сгорания двигателя при взаимодействии с центральным телом будет стягиваться к центру потока, из – за образования в центре зоны пониженного давления. В процессе движения, реактивная струя прилипает к стенке центрального тела и не позволяет потоку отрываться от него и уходит в атмосферу.

Проанализировав результаты численного моделирования, можно увидеть подтверждение теории течения газа в сопле с центральным телом: при попадании в сопло скорость газа растет, давление падает; в центре потока образуется зона пониженного давления, к которой прижимается газовая струя; с ростом высоты уменьшается отношение давлений в камере и в окружающей среде, сопло выходит из расчетного режима в область недорасширения, где струя газа начинает все больше отрываться от центрального тела.

Всё вышеперечисленное доказывает, что при расчетах представленной геометрии для высот до 10 км. над уровнем моря можно использовать пакет программ Fluent Ansys. Для моделирования газодинамики сопла с центральным телом вместо более трудоемкого теоретического расчета.

Библиографический список

1. Добровольский М.В., Ягодникова Д.А. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учебник для вузов. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005 – 488 с.
2. Лаврухин Г.Н. Аэрогазодинамика реактивных сопел. Т. 1. Внутренние характеристики сопел. – М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 376 с.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Ч. 1. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит, 1991. – 600 с.

Одной из важнейших задач, возникающих при проектировании авиационных и ракетных транспортных систем, является задача определения параметров течения в сверхзвуковых струях, истекающих из связки сопел. В современных ЛА достаточно часто применяются газодинамические методы управления, разновидностью которых являются струйные органы управления, выполняющие выдув газа из нескольких сопел в основной поток. Такой способ применения ОУ позволяет в некоторой степени управлять процессом движения ЛА на больших скоростях, а именно воздействовать на момент и аэродинамические силы за счет образованной тяги.

Создание аппаратов РКТ невозможно без решения ряда научных задач, связанных с газовой динамикой высокоскоростных потоков, а именно истечением струй в затопленное пространство и спутный поток, а также со струйными течениями в каналах и емкостях различных назначений.

Эффективным методом исследования струйных течений является численное моделирование. Очевидно, что для создания универсальных методов расчета рассматриваемой задачи необходимо решить систему уравнений Навье-Стокса, что не всегда целесообразно, поэтому целью этой работы можно назвать рассмотрение упрощенных математических моделей и алгоритмов, максимально учитывающих особенности рассматриваемых течений.

В данной статье рассматривается продувка сжимаемого совершенного газа в паре сопел и блочное течение струй в зоне за ними. Геометрические характеристики сопла представлены на рисунке 1. Начальными параметрами на входе берется давление 5.85 МПа и температура 3520 К.

Расчеты проводятся со спутным потоком 3 Мах на высотах 0, 10 и 30 км.

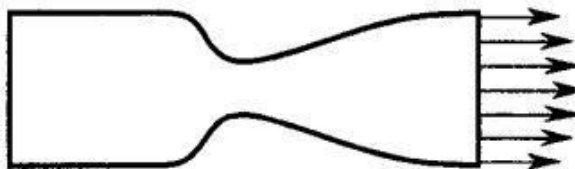


Рисунок 1 – Геометрический профиль сопла [1]

Математическая модель

Осредненные уравнения Навье-Стокса для сжимаемого совершенного газа (знаки осреднения опущены) представлены в общем виде системой уравнений (1) и состоят из уравнений сохранения массы, импульса и энергии [2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0; \\ \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_m + \tau_t) + \rho \vec{g} + \vec{F}; \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \vec{u} \cdot (\tau_m + \tau_t) \right] + S_h; \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{u} – вектор скорости осредненного течения с компонентами u, v и w , $\tau_m + \tau_t$ – молекулярная и турбулентная составляющие тензора вязких напряжений, $E = c_v T + 0,5(u^2 + v^2 + w^2)$ – полная энергия газа, $H = E + p/\rho = c_p T + 0,5(u^2 + v^2 + w^2)$ – его полная энтальпия, T – температура, $c_v = (c_p - R)$ – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, R – газовая постоянная, $\rho \vec{g}$ – гравитационная сила, \vec{F} – внешние силы, $k_{eff} = k + k_t$ – эффективный коэффициент теплоотдачи, \vec{J}_j – диффузионный член, h_j – энтальпия образования компонента, S_h – источниковый член энергии (позволяет учесть процесс образования и поглощения тепловой энергии).

Система уравнений (1) является незамкнутой, поэтому необходимо использовать дополнительно модель турбулентности. Модель типа $k - \varepsilon$ (2–5) является высокорейнольдсовой, предложенной Spalding, Launder [2]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \varepsilon; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (3)$$

$$P_k = -\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \nu_t S^2; \quad (4)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где ε – удельная диссипация; k – кинетическая энергия турбулентности; P_k – генерационный член в уравнении для кинетической энергии; ν_t – турбулентная вязкость. Константы найдены на основе зависимости $c_2 = c_1 - k^2/\sigma_\varepsilon \sqrt{C_\mu}$ и струйных течений: $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $c_\mu = 0.09$.

Результаты расчетов

Результаты моделирования течения блочных струй в поставленных задачах представлены на рисунках 2-4.

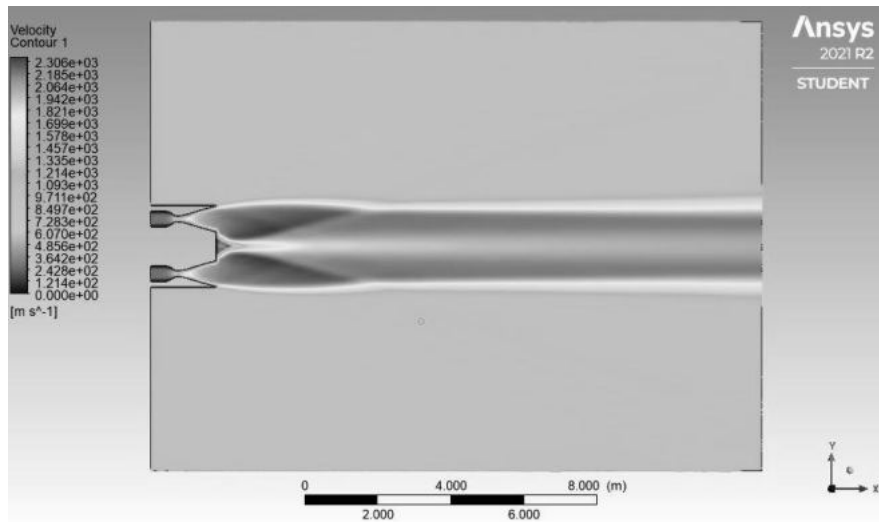


Рисунок 2 - Поле скорости течения блочных струй при расчете на высоте 0 км

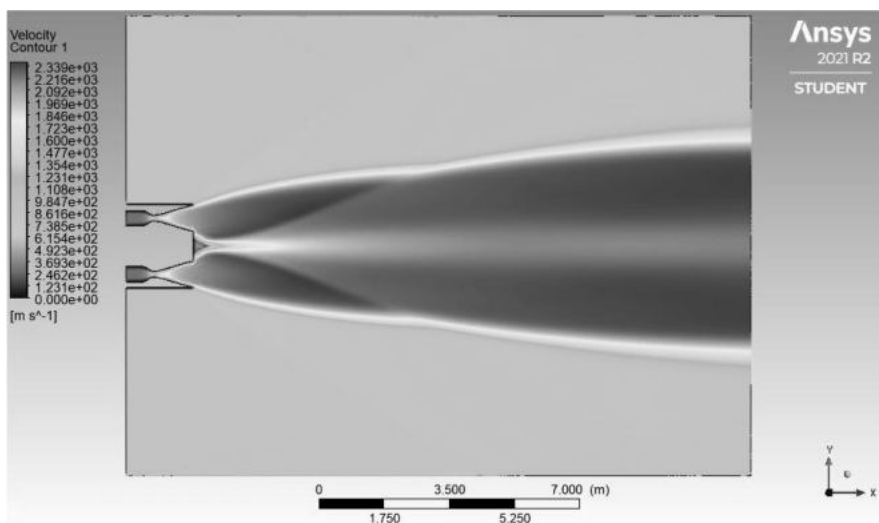


Рисунок 3 - Поле скорости течения блочных струй при расчете на высоте 10 км

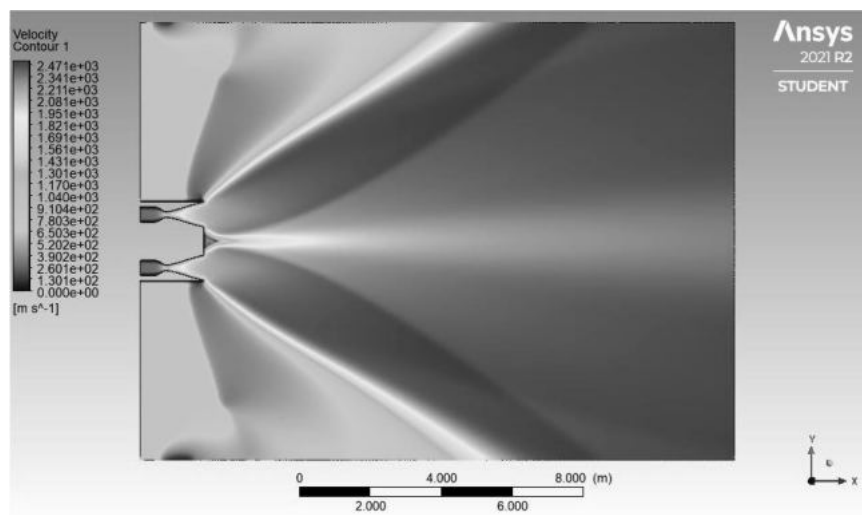


Рисунок 4 - Поле скорости течения блочных струй при расчете на высоте 30 км

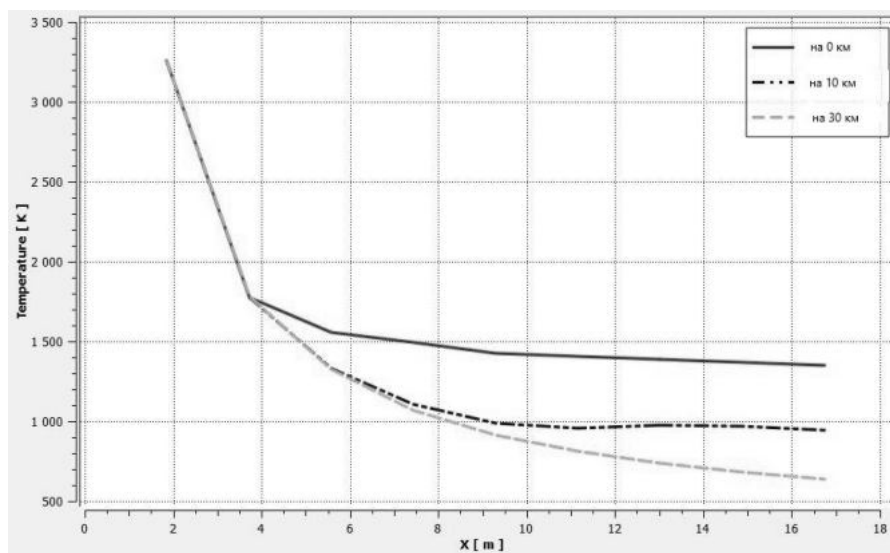


Рисунок 5 – Графики распределения температуры вдоль оси OX

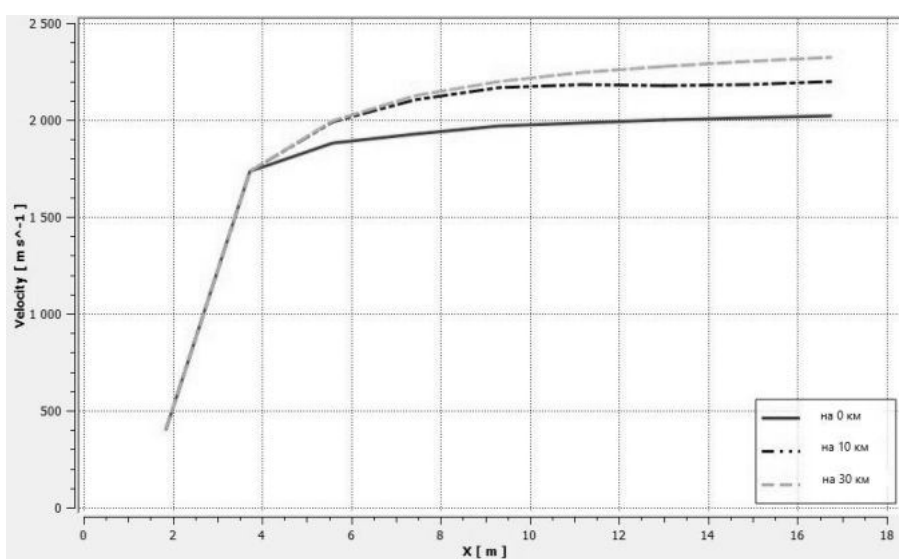


Рисунок 6 – Графики распределения скорости вдоль оси OX

Исходя из полученных результатов можно сделать заключение, что с увеличением высоты полета растет ширина струй, истекающих из сопел, постепенно объединяясь. Это вызвано тем, что на большом расстоянии от уровня моря давление внешней среды становится настолько мало, что струи перестают удерживаться в том виде, в котором они находятся на малых высотах.

На рисунках 5, 6 наблюдаются расхождения значений газодинамических параметров после выхода из сопел: чем больше высота полета, тем меньше температура и выше скорость. Это вызвано тем, что с ростом высоты падает температура среды и сопротивление воздуха.

Библиографический список

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика: Учеб. для вузов. -3-е изд., перераб. и доп. -М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 1969. - 824 с.
2. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Зазимко В.А. Турбулентные струи – статические модели и моделирование крупных вихрей. – М.: Физматлит, 2013. – 360 с.
3. Лойцанский Л.Е. Механика жидкости и газа. –М.: Наука, 1987. – 840 с.
4. Frederick S. Simmons. Rocket Exhaust Plume Phenomenology. The Aerospace Press El Segundo, California, 2000. – 286 с.

УДК 621.165.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СТУПЕНИ ТУРБОМАШИНЫ

А.Д. Карнов

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

Введение. Целью работы является сравнительный анализ газотермодинамики проточных частей турбомашин. В работе производится трехмерный стационарный расчет ступени турбомашин в двух пакетах для численного моделирования: Ansys Fluent и Numeca Fine/Turbo.

Методы вычислительной газодинамики (CFD) в настоящее время являются незаменимыми инструментами при проектировании лопаточных аппаратов. Использование одномерных и двумерных методов недостаточно для

достижения высокой точности моделирования. Поэтому появляется необходимость использовать трехмерные CFD методы уже на процессе проектирования объекта, а не только для определения финальных характеристик машины. В задачах газодинамики турбомашин одним из основных пунктов является моделирование «ротор-статор» взаимодействия.

Постановка задачи. В данной работе был проведен трехмерный стационарный расчет ступени турбомашин, с использованием метода вращающейся системы координат. Для валидации полученных результатов расчет производился в двух CFD пакетах: Ansys Fluent и Numeca Fine/Turbo.

Геометрия проточной части представлена на рисунке ниже. Движение потока пара происходит по направлению оси Z (Рис. 1.). Проточный тракт был рассчитан в периодической постановке.

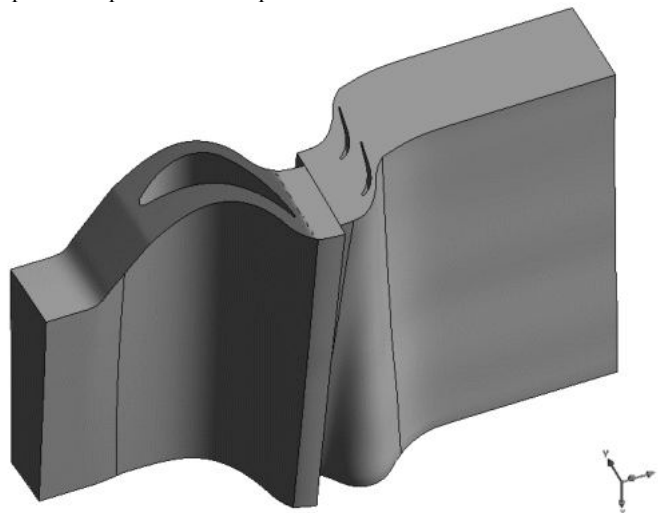


Рис. 1. Геометрия проточной части

Построение сетки. Расчетная сетка с блочной структурой была создана в сеточном генераторе Autogrid5, который предназначен для автоматического построения высококачественных блочно-структурированных гексаэдральных расчетных сеток в проточной части лопаточных машин, и состоит из 1.1 миллиона ячеек, (Рис.2.). Количество лопаток в венцах указано в таблице 1. Оно было скорректировано для обеспечения их кратности, что позволяет сократить количество моделируемых межлопаточных каналов при использовании RANS подхода.

Таблица 2
Количество лопаток

Номер венца	1	2
Кол-во лопаток	80	160

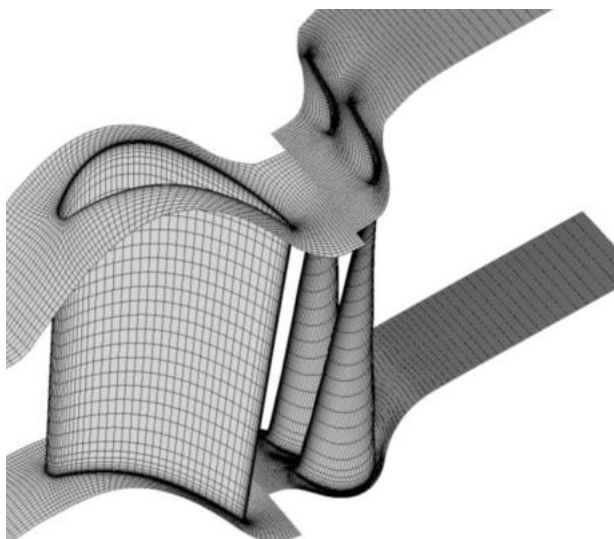


Рис.2. Расчетная сетка

Задание граничных условий. На входную границу была имитирована подача пара с расходом 125 кг/с на все лопаточные аппараты. Поскольку задача решалась в периодической постановке, с воспроизведением одного лопаточного канала, расход составил 1,6 кг/с.

На выходе из ступени задается статическое давление. Учет вращения ротора производится за счет вращающейся системы координат, с заданной частотой вращения. Использовался решатель типа Pressure-based, схема Coupled, с числом Куранта 50. Для контроля сходимости, отслеживалась разница расхода на входе и на выходе, и степени невязок.

Начальные условия представлены в таблице 2.

Таблица 2
Начальные условия

T_0^* , (К)	404
G (кг/с)	1.6
$p_{\text{вых}}$, (Па)	144600
T_2 , (К)	394
n , (об/мин)	3000

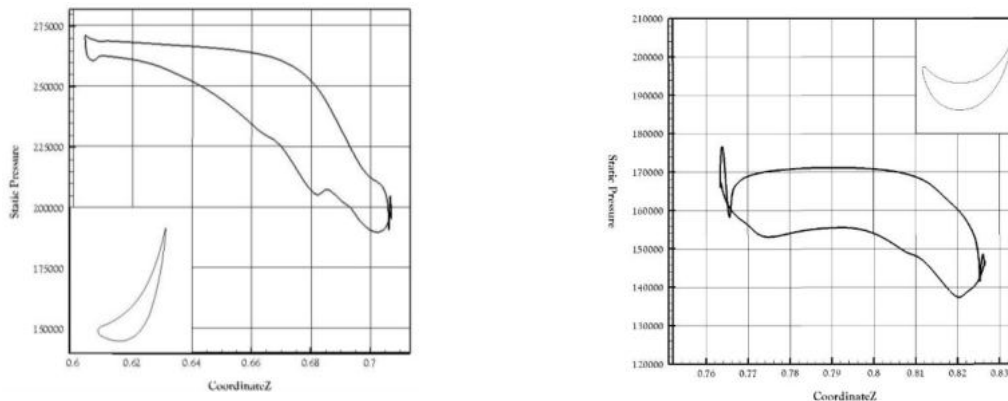


Рис.3. Распределение давления по поверхности лопатки на сечении, расположенном на высоте 20% от длины направляющей лопатки(слева) и рабочей лопатки (справа)

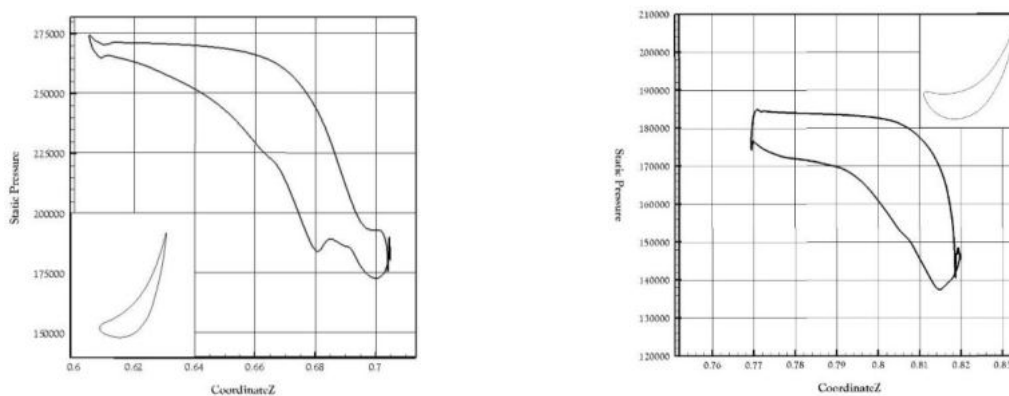


Рис.4. Распределение давления по поверхности лопатки на сечении, расположенном на высоте 50% от длины направляющей лопатки(слева) и рабочей лопатки (справа)

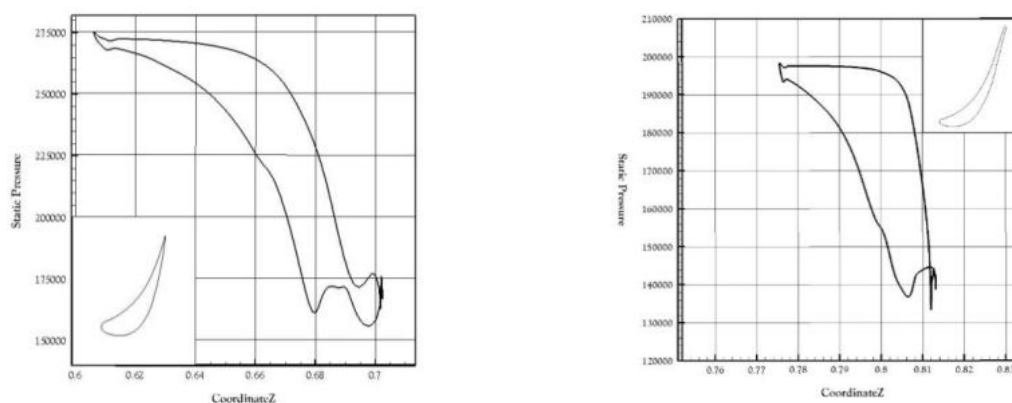


Рис.5. Распределение давления по поверхности лопатки на сечении, расположенном на высоте 80% от длины направляющей лопатки(слева) и рабочей лопатки (справа)

На основе этих графиков можно сделать вывод, что как в направляющей лопатке, так и в рабочей, несколько точек на спинке лопаток, ближе к выходной кромке, «выпадают» из консервативного распределения давления по сечениям лопатки. Проанализировав работы других авторов [1,2], можно увидеть схожую картину, при расчете RANS уравнений.

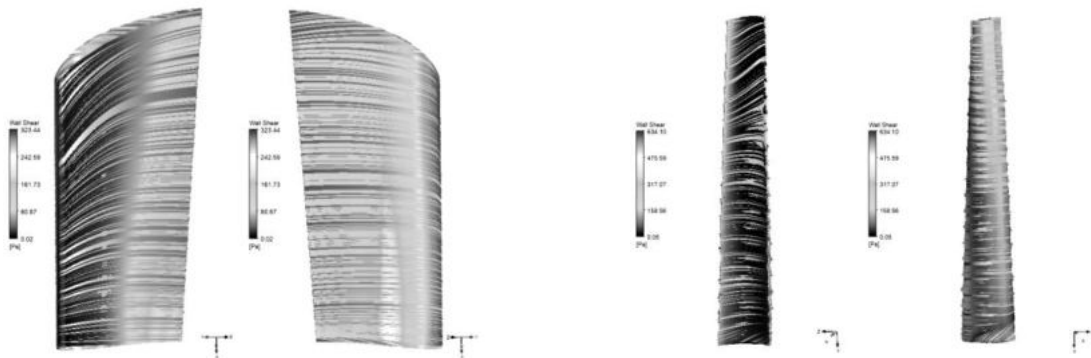


Рис.6. Линии тока при обтекании лопаточных аппаратов

Линии тока при обтекании лопаточных аппаратов представлены на рис.6. На рабочей лопатке можно отметить плохое натекание потока в районе среднего сечения, натекающий поток попадает не на переднюю кромку, а на поверхность разряжения.

На рис.7. показано сравнение графиков распределения давления по поверхности аэродинамического профиля направляющей лопатки, черной линией показаны значения, полученные в результате расчета в Ansys Fluent, серой - в Numesa Fine/Turbo. Хорошо видно расхождение в районе расположения выходной кромки. Оно связано с нестационарным характером течения на выходе из сопловой решетки.

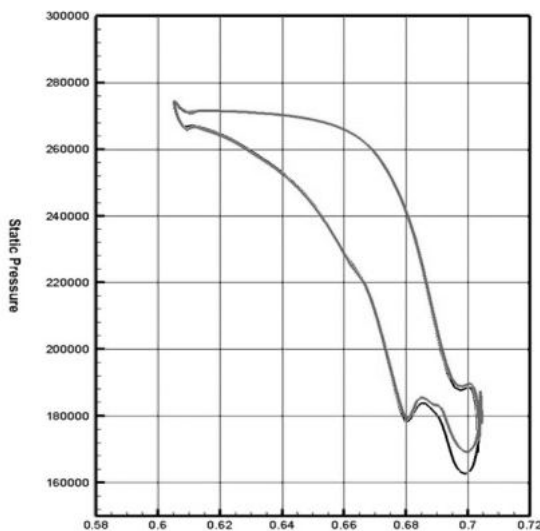


Рис.7. Сравнение графиков распределения давления по поверхности направляющей лопатки на среднем сечении

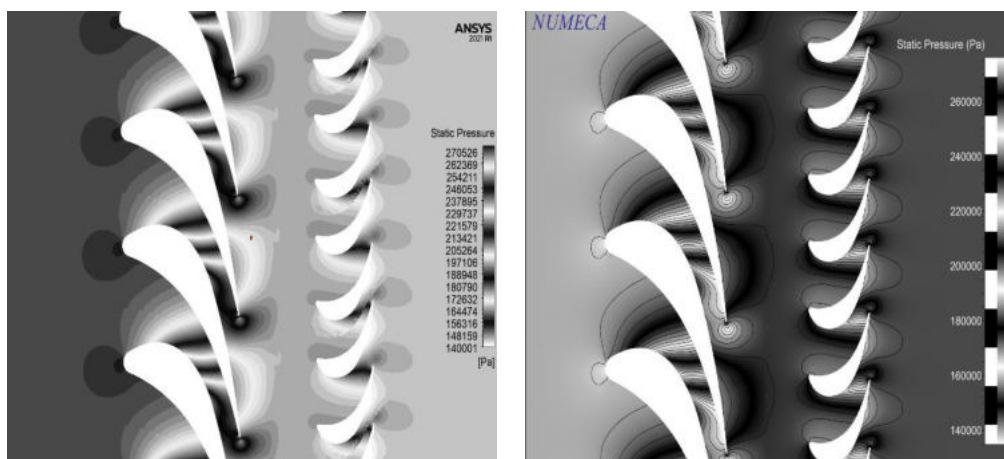


Рис. 8. Сравнение контуров давления, полученных в результате расчета в Ansys Fluent (слева) и Numesa Fine/Turbo (справа)

Заключение. Была получена расчетная модель ступени турбомшины. В процессе анализа были получены схожие результаты расчетов одинаковой постановки задачи в двух разных программных вычислительных пакетах. Отличия связаны с нестационарным характером течения в лопаточных аппаратах.

Библиографический список

1. Clark, J. P., Stetson, G. M., Magge, S. S., Ni, R. H., Haldeman, C. W., & Dunn, M. G. (2000). The Effect of Airfoil Scaling on the Predicted Unsteady Loading on the Blade of a 1 and 1/2 Stage Transonic Turbine and a Comparison With Experimental Results. Volume 1: Aircraft Engine; Marine; Turbomachinery; Microturbines and Small Turbomachinery.
2. Wang, G., Papadogiannis, D., Duchaine, F., Gourdain, N., & Gicquel, L. Y. M. (2013). Towards Massively Parallel Large Eddy Simulation of Turbine Stages. Volume 6C: Turbomachinery.

УДК 621.7-51

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОРОШКА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

*В.П. Алексеев, А.В. Агаповичев
Самарский университет*

Качество машиностроительных изделий и, в частности, сложнопрофильных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ), в большей степени определяется используемыми технологическими процессами их изготовления. В условиях значительной номенклатуры изделий, малой серийности производства, ужесточения требований к себестоимости и гибкости технологического цикла возникает потребность в разработке, апробации и внедрении в производство перспективных, конкурентоспособных на мировом рынке технологий изготовления сложнопрофильных деталей ГТД и ГТУ.

Одним из динамично развивающихся направлений аддитивных технологий является процесс селективного лазерного сплавления/плавления (СЛС) металлического порошка. СЛС позволяет изготавливать детали сложной формы, однако в процессе СЛС в результате многочисленных циклов нагрева-охлаждения происходит изменение распределения температурных нагрузок, что влечёт за собой появление остаточных напряжений, приводящих к искажению формы и короблению деталей, отрыву деталей от платформы построения, трещинам. В результате действия остаточных напряжений от термических нагрузок при лазерном синтезе тонкостенных и сложнопрофильных деталей, возникают существенные деформации, которые приводят к браку.

Повышенные требования к точности изготовления деталей ГТД требуют учета влияния технологических факторов на точность и стабильность процесса изготовления. Отмеченное в полной мере относится к технологиям СЛС, которые до конца не исследованы.

Исследование стабильности технологического процесса изготовления экспериментальных образцов методом СЛС с использованием контрольных карт качества включает в себя следующие этапы: изготовление экспериментальных цилиндрических образцов из материала ВЖ159, методом СЛС на установке SLM 280HL; проведение контроля геометрических характеристик экспериментальных образцов; проведение процедуры статистического анализа технологического процесса с использованием контрольных карт для количественных данных; оценка возможностей процесса и его пригодности для выполнения заданных требований.

Изготовление экспериментальных образцов, в количестве 35 шт., выращенных из металлического порошка (средний диаметр частиц составляет 15...53 мкм) жаропрочного сплава ВЖ159 производилось на установке SLM 280HL. Расположение образцов необходимо задать от платформы построения без материала поддержки (рис. 1). Такое расположение экспериментальных образцов позволяет минимизировать остаточные напряжения, приводящие к искривлению, короблению и возможному отрыву деталей от платформы построения.

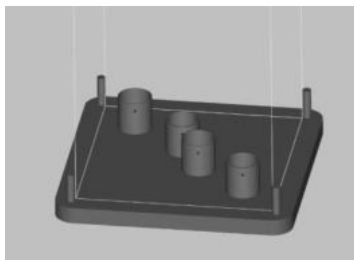


Рис. 1. Расположения образцов на платформе построения

Для сплавления порошка в установке используется инфракрасный волоконный лазер с длиной волны 1075 нм и максимальной мощностью 400 Вт, работающий в непрерывном режиме. Для предотвращения окисления и возгорания частиц порошка во время процесса формирования монослоев рабочая камера заполняется инертным газом, при этом содержание кислорода не превышает 0,2%. Основные параметры изготовления экспериментальных образцов методом селективного лазерного сплавления из металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ159 на установке SLM 280HL: мощность 250 Вт, скорость сканирования 600 мм/с, шаг 0,12 мм, толщина слоя 50 мкм. Экспериментальные образцы представлены на рис. 2.



Рис. 2. Экспериментальные образцы

Для исключения внесения дополнительных напряжений разрезка колец осуществлялась с использованием электроэрозионной обработки.

Контроль геометрических параметров, выращенных образцов производился на координатно-измерительная машина DEA Global Perfomance 07.10.07 при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 80%.

Оценка качества экспериментальных образцов производится по количественному признаку. В качестве характеристики качества изделия выбран показатель – диаметр цилиндрических образцов.

Статистический анализ данных, полученных по результатам измерений диаметра экспериментальных образцов, проводился с использованием контрольных карт качества для количественных данных. В некоторых ситуациях для оценки или управления процессом невозможно либо не практично использовать выборки (подгруппы) данных. Это связано с ситуациями, когда измерения дорогостоящие (например, при разрушающем контроле) или в случае, когда нельзя получить более одного измеренного значения показателя. В подобных ситуациях управлять процессом можно на основе индивидуальных значений. Используя метод контрольных карт индивидуальных значений и скользящих размахов, проведем статистический анализ хода процесса и определим его особенности, и основные характеристики.

В программном обеспечении Statistica, используя метод контрольных карт индивидуальных значений и скользящих размахов, проведем статистический анализ хода процесса и определим его особенности [1]. На рис. 3 представлена MR карта (скользящих размахов) для контроля над изменчивостью процесса.

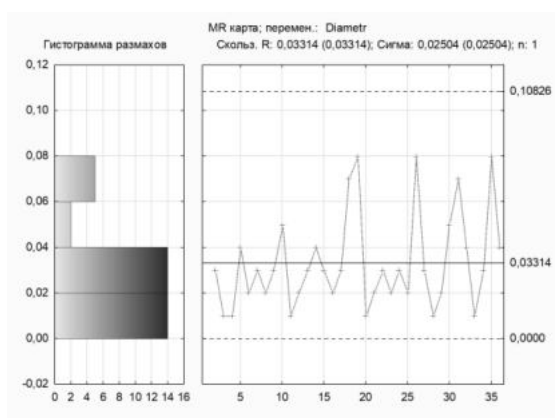


Рис. 3. Карта скользящих размахов

При использовании карт индивидуальных значений (рис. 4) оценку внутренней изменчивости определяют на основе меры вариации, полученной по скользящим размахам двух последовательных наблюдений [1].

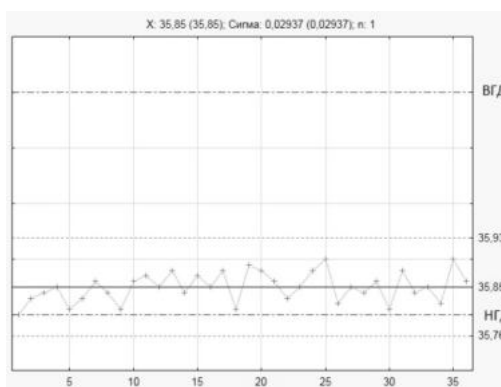


Рис. 4. Карта индивидуальных значений

Прежде всего, необходимо оценить находится ли процесс в состоянии статистической управляемости в отношении внутренней изменчивости (стабильность процесса по размахам). Оценка производится с использованием границ UCLR и LCLR, границ зон А, В и С, а также присутствия особых структур точек. В нашем случае точки выборочных размахов не нарушают границу $UCLR = 0,11$ и $LCLR = 0$, т.е. отсутствует признак 1, а также нет присутствия особых структур точек [1]. Следовательно, процесс находится в состоянии статистической управляемости по скользящим размахам MR, т.е. в отношении внутренней изменчивости.

Знание величины стандартного отклонения внутренней изменчивости σ позволяет вычислить индекс пригодности (индекс возможностей) процесса $C_p = T / 6\sigma$. Если $C_p > 1$, то процесс пригоден для выполнения заданных требований и имеется запас возможностей процесса. Для нашего примера $C_p = 2,27 > 1$, процесс пригоден для выполнения заданных требований и имеется запас возможностей, достаточный для управления ходом процесса по выполнению заданных требований.

Далее по проведем оценку особенностей процесса (рис. 4) и определим имеющиеся тренды – тенденции поведения (протекания) процесса во времени. При анализе карты индивидуальных значений признаки присутствия специальных причин не выявлены. Контрольная карта индивидуальных значений демонстрирует стабильный процесс.

На рис. 5 и 6 представлена схема расположения поля рассеяния результатов по отношению к цели.

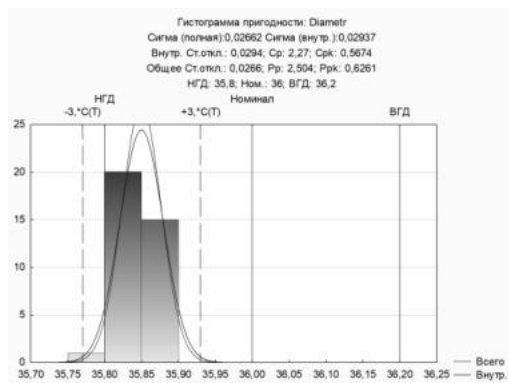


Рис. 5. Гистограмма пригодности

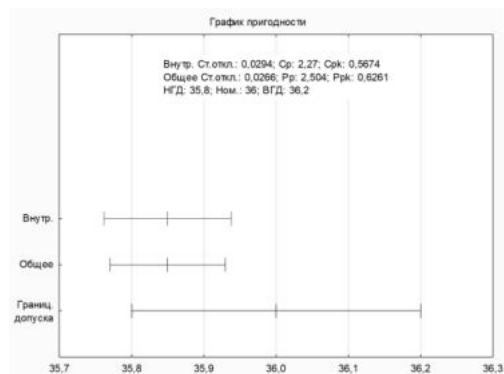


Рис. 6. График пригодности процесса

Процесс находится в состоянии статистической управляемости в отношении внутренней изменчивости (стабилен по размахам R), процесс пригоден для обеспечения заданных требований и обладает достаточным запасом возможностей, необходимым для эффективного управления ходом процесса. Данный процесс смещен относительно номинала в сторону нижней границы поля допуска.

Работа выполнена в рамках стипендии, финансируемой АО «Объединенной двигателестроительной корпорацией».

Библиографический список

1. Солонин С.И. Метод контрольных карт, электронное текстовое издание. – Екатеринбург: УФУ, 2014.

УДК 004.4.22

«BUILDER» – СИСТЕМА СБОРКИ ZIP ПАКЕТОВ ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ «© ОРБИКРАФТ СПУТНИК»

Краснов А. С., Чунин С. А

*Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова*

В настоящее время в мире идёт активное развитие космической отрасли и популяризация темы космоса. Для привлечения в отрасль новых специалистов и адаптации их навыков под требования и реалии современных космических проектов регулярно проводятся различные соревнования профессионального мастерства. Как правило, учебные космические аппараты, используемые в ходе различных соревнований, создаются на базе какой-либо платформы [2]. Также подобные платформы используются в ходе обучения новых специалистов и могут быть использованы для привлечения и популяризации темы космоса среди молодежи, как показано на рис. 1. Но подобные наборы имеют различные проблемы и недостатки, что затрудняет их внедрение и применение, в том числе проведение соревнований, а в особенности использование наборов для обучения молодых специалистов.



Рис. 15 Схема взаимодействия по подготовке специалистов для космической отрасли

Актуальность разработки такого программного обеспечения связана с тем, что на соревнованиях профессионального мастерства, связанных с космической отраслью, возникают различные ошибки при использовании стандартной системы сборки, входящий в набор «© Орбикрафт Спутник», затрудняющий проведение соревнований как участникам, так и организаторам.

Для ускорения разработки и улучшения качества разрабатываемого ПО для подобных наборов нами была разработана система сборки пакетов «Builder» для платформы «© Орбикрафт Спутник», которая решает поставленную задачу.

Программное обеспечение для космического аппарата на платформе «© Орбикрафт Спутник» разрабатывается на языке программирования «C» с использованием специальной библиотеки «libsatsat.h». В качестве редактора кода используется Notepad++. После написания исходного кода программы происходит её сборка, т. е. упаковка файла с исходным кодом в zip архив (отправляемый пакет) для последующей отправки на бортовой компьютер управления космическим аппаратом, где и происходит компиляция исходного кода в исполняемый файл. Сборка отправляемого пакета осуществляется расширением для Notepad++ написанным на языке программирования Python 2.7 (Python Script). Генерация дополнительных файлов (main, makefile) осуществляется программой на Python, а создание zip архива программой 7-zip [3].

В ходе эксплуатации стандартной системы сборки пакетов наблюдались следующие проблемы: ошибки из-за несовместимости с различными версиями ОС Windows и неработоспособность из-за изменения файловой структуры рабочей директории, в которой был установлен Notepad++, неработоспособность из-за некорректного имени рабочей директории при её создании или переименовании, ошибки из-за неправильно установленных или обновлённых зависимостей, полная неработоспособность из-за отсутствия или неправильной установки библиотек, иногда некорректная работа при очень большом количестве собираемых файлов, отсутствие подробного вывода при возникновении ошибок.

Решением перечисленных выше проблем стало создание собственного ПО для сборки пакетов. За основу были взяты следующие принципы: кроссплатформенность (поддержка актуальных ос: Windows Xp - Windows 10, Mac OS, Linux и т. д.), отсутствие привязки к редактору кода или среде разработки, подробный вывод о работе и возникновении ошибок, простой и понятный интерфейс, решение проблемы с «отвалом» библиотек, возможность обработки большого количества файлов, высокая стабильность работы и минимизация возможных ошибок, поддержка чистоты и простоты кодовой базы.

«Builder» выполнен в виде отдельной программы, что позволяет отделить его от редактора кода или интегрированной среды разработки и использовать без какого-либо другого ПО, т. е. сделать самодостаточным, но при этом не лишает возможности интегрировать его в большинство популярных редакторов кода для максимального удобства использования [4].

Все действия над файлами производятся в директории, из которой запущен «Builder». В ходе работы программы используются только относительные пути, а значит нет ограничений на путь до рабочей директории, в которой запущено приложение. Также нет ограничений и на имя файла.

Простота синтаксиса и отказ от использования сторонних модулей, а также чистая кодовая база помогает минимизировать количество ошибок при разработке «Builder» и помогают оперативно исправлять их по мере обнаружения, тем самым поддерживая высокую стабильность работы приложения.

Для удобства использования предусмотрено несколько режимов работы: пользовательский режим и режим терминала. Пользовательский режим наиболее прост в использовании и применяется по умолчанию при запуске программы без каких-либо флагов, т. е. традиционным для ОС Windows способом (двойной клик по иконке

программы). В данном режиме происходит сборка всех пакетов, находящихся в директории, из которой была запущена программа, при этом выводится вся информация о состоянии работе программы. После сборки всех пакетов программа ожидает закрытия пользователем.

Режим терминала предназначен для более продвинутых пользователей или для интеграции с редактором кода или другим ПО. В данном режиме программа принимает флаги, позволяющие настроить поведение программы при каждом запуске и принимает путь до файла с исходным кодом, что позволяет использовать всего одну копию программы для сборки пакетов в любой директории файловой системы компьютера, при этом нет ограничений на использование символов в пути и названии файлов. В данном режиме программа принимает флаги, позволяющие настроить поведение программы. После окончания работы программы она автоматически закрывается, не ожидая действия от пользователя. Лучше всего такой режим работает в UNIX операционных системах, вроде Linux и Mac OS.

«Builder» работает не с одним файлом, а со всеми файлами в директории, за счёт чего происходит обработка множества файлов с минимальными усилиями со стороны пользователя.

Кроме того, генерация библиотеки «libschat.h» происходит прямо во время работы программы что решает все возможные проблемы с повреждением файла с библиотекой или неправильном его размещением.

На данный момент выполнена трансляция кодовой базы предпоследней стабильной версии «Builder» на c++ и скомпилирована под Linux и Windows [1].

Изучив принцип работы и кодовую базу стандартной системы сборки отправляемых пакетов, входящих в состав набора «© Орбикрафт Спутник» и основываясь на алгоритмах её работы мною была создана собственная система сборки «Builder», основанная на другой архитектуре и новых способах взаимодействия с пользователем, полностью кроссплатформенную, имеющую возможность интеграции с другими программными продуктами, и за счёт проведения сравнительного анализа и общего анализа кодовой базы и алгоритмов работы оригинальной системы сборки, а также тестированию, анализу и выявлению ошибок, возникающих в ходе эксплуатации стандартной системы сборки пакетов, полностью лишённую проблем и недостатков стандартной системы сборки. А за счёт более чистой и простой архитектуры и кодовой базы «Builder» очень легко поддерживать и развивать, а следовательно, добавлять новые, более быстрые и удобные для пользователя способы взаимодействия с программой и интеграции в другие программные продукты.

Так как стабильная версия «Builder» продемонстрировала хорошую стабильность в ходе испытаний, а также имеет более чистую кодовую базу и постоянно развивается, особенно в сравнении со стандартной системой сборки пакетов, входящую в состав набора «© Орбикрафт Спутник», то «Builder» однозначно рекомендуется к использованию и активному внедрению на мероприятиях и соревнованиях, на которых используется набор «© Орбикрафт Спутник».

В ходе использования стандартного программного комплекса для создания программного обеспечения входящее в состав набора «© Орбикрафт Спутник», активно используемого в соревнованиях профессионального мастерства космической отрасли мною были выявлены и изучены различные проблемы недостатки, возникающие в процессе эксплуатации стандартного программного комплекса для разработки ПО и найдено их решение в виде создания собственного программного комплекса «Builder». Данный программный комплекс имеет отличную от стандартного программного обеспечения архитектуру, что лишает его недостатков стандартного ПО, используемого для аналогичных целей, а значит увеличивает скорость и удобство разработки ПО не только для участников соревнований, в которых используется набор «© Орбикрафт Спутник», но и экономит время организаторов данных соревнований на решение возникающих со стандартным ПО проблем.

На данный момент разработана стабильная версия, проходящее активное тестирование и уже значительно повышающее скорость разработки программного обеспечения, а также разрабатываются новые версии, применяющие совершенно новый подход к взаимодействию с пользователем, редакторами исходного кода или интегрированными средами разработки, что, в перспективе, может значительно повысить удобство использования набора «© Орбикрафт Спутник» и аналогичных ему платформ разработки малых космических аппаратов и привлечь к теме космоса и соревнований профессионального мастерства гораздо большее число молодых специалистов и ещё больше популяризовать тему космоса среди молодёжи.

Использование других инструментов разработки программного обеспечения для учебных космических аппаратов, созданных на базе какой-либо платформы, помогает устранить недостатки в использовании данных платформ, тем самым делая образование в сфере космоса проще и эффективнее. Более простое и понятное взаимодействие с учебным космическим аппаратом помогает обучающимся углубленно изучить устройство космических аппаратов, при этом снизив требования к их начальным знаниям, тем самым не только подготовив квалифицированные кадры ценные в космической отрасли, но и популяризируя данную отрасль среди молодёжи, делая обучение максимально простым и понятным. Все это обеспечивает созданная нами система сборки «Builder», подходящая для применения на любых этапах учебного процесса с применением учебных космических аппаратов, созданных на базе какой-либо платформы, делая процесс обучения максимально простым и понятным, но при том эффективным для обучающихся и преподавателей. Так как последняя версия «Builder» продемонстрировала хорошую стабильность в ходе испытаний, а также проста и понятна в применении, но при том на порядок удобнее и функциональное стандартного программного обеспечения, используемого вместе с различными платформами для создания учебных космических аппаратов, а также постоянно развивается, то «Builder» однозначно рекомендуется к использованию и активному внедрению на соревнованиях профессионального мастерства в космической отрасли, так как упростит проведение соревнований для организаторов и участников и поможет проводить соревнования на всех этапах, уровнях сложности и возрастных категориях, а также привлечь к теме космоса и соревнований профессионального мастерства гораздо большее число молодых специалистов и ещё больше популяризовать тему космоса среди молодёжи.

Библиографический список

1. Захаров В.Б, Мальковский М.Г., Мостяев А.И Проблемы выбора языков программирования при разработке кроссплатформенных приложений // International Journal of Open Information Technologies. - 2017. - №5. - С. 7.

2. Марк Лутц Программирование на Python. - 4 изд. - Санкт-Петербург, Москва: Символ-Плюс, 2011. - 992 с.
3. Руководство по эксплуатации // Конструктор спутника "Орбикрафт" URL: <http://www.orbicraft.sputnix.ru/doku.php> (дата обращения: 24.08.2021).
4. Как мы избавились от 80% своего кода, повысив скорость разработки и уменьшив количество ошибок // Habr.com URL: <https://habr.com/ru/company/mvideo/blog/599401/> (дата обращения: 17.01.2022).

УДК 004.946

ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

С. М. Васильев, А. А. Бармина

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

Не зря существует выражение, «война - двигатель прогресса», технология дополненной реальности не стала исключением, она так же разработана для упрощения ведения боевых действий, американским учёным Айвенгом Сазерлендом, в 1968 году он представил концепт устройства, которое назвали «Дамоклов меч», потому что его приходилось крепить к потолку из-за его большого веса, но уже в следующем году был представлен новый шлем дополненной реальности «The Super Cockpit», который уже не требовал крепления к потолку и мог выводить на лицевой щиток скорость, положение самолёта в пространстве и прицел. Эта технология получила реальное применение в ВВС США только в 1986-1989 годах, и по факту является первым опытом применения шлема дополненной реальности для упрощения выполнения реальных задач [1].

Так же примерно в тоже самое время: 1976-1982 годах, начали разрабатываться и устанавливаться системы ИЛС – индикаторы на лобовом стекле, первым, отечественным самолётом, оснащённым ИЛС стал истребитель-бомбардировщик МиГ-27К, данная система, позволяла во время пилотирования не отвлекаться на стационарные приборы, так как в поле зрения пилота попадала вся необходимая информация, например: скорость, высота, положение самолёта в пространстве, остаток топлива, метки союзных самолётов и вражеских целей. Недостатком же этой технологии, стало круговое поле зрения размером 22-24°, ИЛС с таким полем зрения был максимального размера, для того что бы не мешать нормальному катапультированию, но при этом поля зрения которое он обеспечивал едва хватало для нормального маневрирования на околозвуковой скорости и небольшой высоте. Таким образом дальнейшее развитие систем ИЛС превратилось в объединение технологий ИЛС и НСЦ (нашлемных систем целеуказания), их производной стала технология НСЦИ или нашлемная система целеуказания и индикации [2]. На рис. 1 представлен НСЦИ-В для вертолёт Ми-28Н [3].



Рис. 1 – НСЦИ-В

Технология дополненной реальности постепенно попадает на гражданский рынок, среди таких примеров использования технологии можно отметить проекции на лобовое стекло в современных автомобилях, принцип работы которого схож с системой ИЛС и основная задача которого, это отображать показания спидометра, тахометра, навигацию, а также температуру масла и охлаждающей жидкости, в общем, всё, что будет не сильно отвлекать водителя от дороги, но при этом обеспечит его максимально нужной ему информацией, конечно же, применение такой технологии в гражданском автомобиле, больше похоже на баловство, но, если автомобиль используется в автоспорте, данная технология может помочь в управлении пилоту спортивного автомобиля. Ознакомиться с так называемой проекцией можно на рис. 2[4].

В данный момент технология дополненной реальности, доступна всё большему количеству людей, так как для использования её в самом базовом виде достаточно смартфона, а точнее двух его компонентов, камеры и процессора способного объединять видеопоток, поступающий с камеры и виртуальные объекты. Таким образом, дополненная реальность (англ. augmented reality, AR) – всё сильнее проникает в быт пользователей современных гаджетов. Но конечно же существуют ограничения, связанные с реализацией дополненной реальности на тех или иных устройствах, в основном сейчас это связано с наличием дополнительных датчиков. В большинстве смартфонов сейчас установлены такие датчики:

- гироскоп – датчик для определения ориентации смартфона в пространстве, который отслеживает угол наклона даже неподвижного устройства по трём осям координат, его работа осуществляется с помощью смещения подвижных веществ при наклоне, в следствии чего будет меняться ёмкость конденсаторов;
- акселерометр – датчик измеряющий проекцию кажущегося ускорения, благодаря чему, он может определить положение в пространстве, а также расстояние перемещения. Для работы датчика используется набор проводников, которые могут двигаться под воздействием ускорения и изменять напряжённость поля вокруг себя. По показаниям напряжённости, можно увидеть какое движение корпуса смартфона привело к такому смещению проводников [5].



Рис. 2 – Проекция на лобовое стекло в современном гражданском автомобиле

Перечисленные выше датчики, это необходимый минимум для использования современных приложений, созданных для отображения дополненной реальности, при этом все проблемы трекинга виртуального объекта ложатся на алгоритмы обработки видеопотока с камеры.

Таким образом, проблему неправильного отображения виртуальных объектов, нужно было решать, потому что, как бы не были хороши алгоритмы, в видеопотоке с камеры нельзя точно оценить, ни расстояние, ни угол съемки, из-за чего, в визуализируемых виртуальных объектах возникают искажения.

Поскольку, сейчас существуют датчики, позволяющие точно определять расстояния до объекта съемки, но они устанавливаются только во «флагманские» смартфоны, то их стоит рассмотреть позже, так как для большинства пользователей образного приложения, использующего для визуализации дополненную реальность, проблема неправильного отображения визуализируемых объектов, всё ещё остаётся актуальной, тогда нужно решать эту проблему путём улучшения метода трекинга объектов.

Основным способом увеличить точность наложения виртуального объекта на видеопоток с камеры смартфона, не обладающего дополнительными датчиками, можно считать использование AR-маркеров. Под AR-маркером подразумевается плоская картинка, по которой, можно определить положение устройства в пространстве относительно этой картинке [6]. Пример AR-маркера можно увидеть на рис. 3 [7].

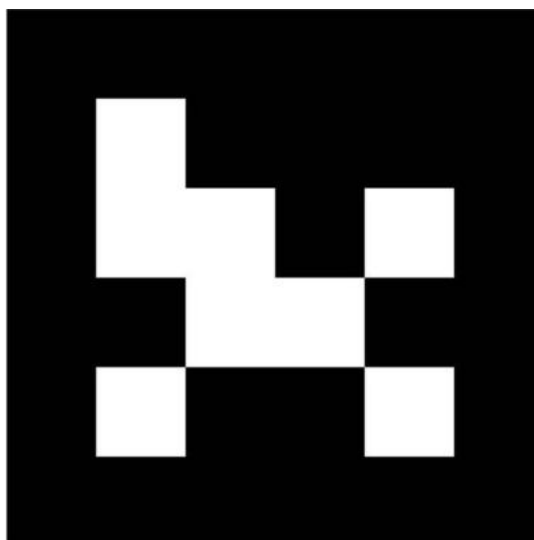


Рис. 3 – AR-маркер

При создании AR-маркеров, нужно помнить, что цвета, должны быть контрастными, не должно быть градиентов, а также симметричности, из-за последнего могут возникнуть, не сколько проблемы с распознаванием маркера, а сколько неправильное позиционирование объекта в пространстве и возможно, даже его постоянное вращение, так как для маркера невозможно будет определить точную ориентацию в пространстве.

После всего вышеперечисленного стоит сделать вывод, что на данный момент, для приложения, рассчитанного на массовую аудиторию, использовать для трекинга визуализируемых объектов в дополненной реальности, AR-маркеры, это лучший вариант, так как по точности отображения виртуальных объектов данный способ, находится на высоком уровне, а основной недостаток, в виде необходимости меток, для работы приложения, проявляется только, когда пользователю придётся самому создавать эти метки, например печатать на основе заготовок.

Таким образом, использование меток является достаточно удобной альтернативой, поскольку это позволит избежать проблем с некорректной визуализацией объектов в дополненной реальности, когда помимо неправильного положения, будет ещё нарушен размер визуализируемых объектов, а также неправильно определено их положение в пространстве.

Другим способом является использование устройств, оснащённых дополнительными датчиками, а точнее, для создания AR-визуализации используется лидар (в случае смартфонов от компании Apple) и ToF (англ. Time of Flight) сенсоры от разных производителей для устройств под управлением операционной системой Android.

Принцип работы лидара и ToF датчика одинаковые - они выпускают световые импульсы, невидимые для человеческого глаза, затем эти импульсы отражаются от объектов, после чего замеряется время, которое им понадобилось для преодоления этого пути, тем самым определяется расстояние от смартфона до объекта, на который был направлен этот смартфон.

Основное отличие лидара от ToF-датчиков это то, что первый посылает множество световых лучей и делает это непрерывно во время работы датчика, а ToF – делает это единожды и посылает только один луч, таким образом, оба этих датчика способны определить расстояние до поверхности, на которую направлен смартфон, но при этом лидар способен создать 3D-модель объектов, от которых отражались световые импульсы [8]. На рис. 4 представлена визуализация результата работы лидара [9].

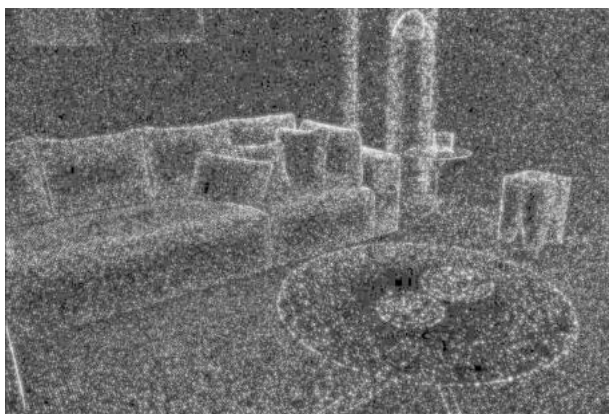


Рис. 4 – Визуализация работы лидара

Из этого следует то, что устройства использующие лидары, благодаря непрерывному сканированию помещения во время создания визуализаций дополненной реальности способны осуществлять высокоточный трекинг объектов без наличия меток, а также не терять трекинг объекта, даже если увести смартфон в сторону. Комплект средств для разработки приложений дополненной реальности Apple ARKit способен запоминать 3D-модель всего окружения вокруг смартфона и как только программа определит то место, где был «поставлен» виртуальный объект, она снова его отобразит.

Так же не стоит списывать со счетов и ToF датчики, хоть они и не могут создать 3D модель окружения вокруг смартфона, они всё ещё могут определять расстояние до поверхности, а также благодаря более совершенным акселерометром и гироскопом, появляется возможность более чётко отслеживать положение смартфона в пространстве. Благодаря этой информации, создание AR-визуализации сильно упрощается, и даже на плоских поверхностях, можно обойтись без меток, при этом сохранив качество отображения визуализируемых объектов.

Достоинством использования такого метода трекинга является решение проблемы создания и размещения AR-маркеров, но при этом, нужно учитывать, что таким набором датчиков сейчас могут обладать лишь флагманские аппараты последних лет, а если взять во внимание статистику продаж смартфонов в 2021 году, то по данным розничной компании «М.Видео – Эльдorado» в пятёрке самых востребованных нет ни одного устройства, оснащенного датчиком лидар или ToF. Таким образом, насколько хороша не была бы технология трекинга без меток, получается, что, либо она визуализирует объекты в дополненной реальности некорректно, либо она работает лишь у 10% пользователей смартфонов в России [10].

Подводя итог, технология дополненной реальности активно развивается и становится более доступной для рядового пользователя, однако основные проблемы визуализации объектов решаются с помощью специальных меток или датчиков, а предоставляемые данной технологией возможности могут использоваться в различных сферах жизнедеятельности.

Библиографический список

1. Дополненная реальность в военно-промышленном комплексе. URL: <https://spark.ru/startup/robohunter/blog/8721/dopolnennaya-realnost-v-voenno-promishlennom-komplekse> (Дата обращения: 14.02.2022)
2. Экран в пол неба: авионика. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/9004-ekran-v-polneba-avionika/> (Дата обращения: 14.02.2022)
3. Российские охотники и системы ПВО наиболее востребованы на рынке оружия. URL: <https://rs.sputniknews.com/amp/20170830/armija-2017-1112478956.html> (Дата обращения: 17.02.2022)
4. Head Up Display Vw Tiguan : For Volkswagen Tiguan Tourag 2015 2016 Car Head Up Display Saft Driving Screen Projector Reflecting Windshield Head Up Display Car Head Mini Van - The available display is a true breakthrough. URL: <https://dayanafikidawoodcc.blogspot.com/2021/07/head-up-display-vw-tiguan-for.html> (Дата обращения: 17.02.2022)
5. Датчики в современных смартфонах. URL: <http://android.mobile-review.com/articles/62300/> (Дата обращения: 14.02.2022)
6. Дядиченко Григорий. Обзор технологии трекинга: AR маркеры. URL: <https://habr.com/ru/post/563666/> (Дата обращения: 14.02.2022)

7. THE NEXT GENERATION OF DIGITAL CONTENT. URL: <https://www.emaze.com/@AORWIZCOZ> (Дата обращения: 17.02.2022)
8. Чем лидар в iPhone 12 отличается от ToF-сенсоров в смартфонах на Android. URL: <https://androidinsider.ru/polezno-znat/chem-lidar-v-iphone-12-otlichaetsya-ot-tof-sensorov-v-smartfonah-na-android.html> (Дата обращения 14.02.2022)
9. Представлены iPhone 12 Pro и 12 Pro Max — наибольшие iPhone в истории с лидаром и кинематографической съемкой. URL: <https://gadgetsnews.net/news/predstavleny-iphone-12-pro-i-12-pro-max-naibolshie-iphone-v-istorii-s-lidarom-i-kinematograficheskoj-semkoj/> (Дата обращения: 17.02.2022)
10. Топ-5 самых продаваемых в России в 2021 году смартфонов. URL: https://4pda.to/2022/01/17/395609/top_5_samykh_prodavaemykh_v_rossii_v_2021_godu_smartfonov/ (Дата обращения: 14.02.2022)

УДК 004.94

ВОЗМОЖНОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СПАК-2

Конопелькин М. Ю., Смирнягина Д. А.

АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»

Введение. Актуальной задачей является разработка сложных радиотехнических средств и систем, в частности, радиолокационных станций (РЛС) и их комплексов (РЛК). Для того, чтобы повысить скорость и качество проектирования, снижая при этом издержки на макетирование и испытание опытных образцов, разрабатывается современный отечественный специализированный программно-аппаратный комплекс (СПАК-2).

1. Назначение СПАК-2

СПАК-2 – это комплекс программных средств моделирования работы РЛС и их устройств с возможностью оптимизации их технических параметров. Комплекс позволяет проводить моделирование РЛС при разных уровнях детализации, а также создавать компьютерные модели современных РЛС, работающие в задаваемой помехоцелевой обстановке, для оценки их эффективности.

2. Цели имитационного моделирования

Создание компьютерных моделей РЛС в СПАК-2 включает следующие основные шаги [1]:

- 1) Определение ограничений на параметры РЛС и формирование множества наборов значений общего параметрического описания РЛС, исходя из задаваемых требований, условий эксплуатации и тактических характеристик.
- 2) Оценка стоимости для каждого параметрического описания РЛС – получение стоимостных показателей.
- 3) Проведение первой стадии имитационного моделирования – получение показателей эффективности (качества радиолокационной информации). Используется упрощенная функциональная модель РЛС (шаблон модели РЛС) соответствующая заданному параметрическому описанию РЛС.
- 4) Сравнение вариантов связей стоимостного показателя и показателя эффективности. Выбираются Парето-оптимальные варианты – рациональные технические решения.
- 5) Для выбранных рациональных технических решений производится уточнение параметров устройств из состава РЛС путем моделирования отдельных устройств из состава РЛС. По окончании моделирования формируется расширенное параметрическое описание РЛС для каждого рационального технического решения РЛС.
- 6) Проведение второй стадии комплексного имитационного моделирования с использованием усложненной функциональной модели РЛС (детализированный шаблон модели РЛС), которая ставится в соответствие расширенному параметрическому описанию. По результатам имитационного моделирования уточняются показатели эффективности (качества радиолокационной информации).
- 7) Сравнение рациональных вариантов между собой по значениям соответствующих наборов показателей эффективности – производится выбор оптимального технического решения РЛС.

При этом результаты шагов 1), 2), 3) и 4) входят в состав исходных данных для выполнения шагов 5), 6) и 7).

Таким образом цель имитационного моделирования в СПАК-2 – проверка функционирования настраиваемого (инициализированного значениями параметров) шаблона модели РЛС в задаваемой помехо-целевой обстановке. Шаг имитационного моделирования – это исследование поведения модели РЛС, настроенной заранее сформированными значениями параметров модели РЛС.

Чтобы более объективно оценить по результатам имитационного моделирования показатели эффективности (качества радиолокационной информации) с учетом вариаций условий применения РЛС, пользователь задает серию имитационных экспериментов. Например, варьируется как сам налет воздушных объектов, так и расположение РЛС. Количество экспериментов будет соответствовать произведению вариантов расположения РЛС и вариантов налета воздушных объектов.

3. Представление РЛС в СПАК-2

Шаблон модели РЛС, который используется для проведения имитационного моделирования, представляется на системном или функциональном уровнях моделирования. На уровне системного моделирования, модель РЛС является одним из объектов имитационного моделирования на радиосцене, наряду с моделями объектов наблюдения РЛС, подстилающей поверхностью, моделью погодных условий, моделями командных пунктов и прочим.

Уровень функционального моделирования определяет шаблон модели РЛС в виде направленного графа взаимосвязанных друг с другом компонентов. Отдельные компоненты графа РЛС реализуют отдельные алгоритмы – формирование, обработка сигнала, управление режимами работы РЛС, управление лучом диаграммы направленности антенны.

Модели РЛС функционального уровня могут использоваться для решения задач системного моделирования без ограничений. На обоих уровнях моделирования расчёт работы РЛС происходит одинаково, только на системном уровне внутренняя компоновка станции скрыта от пользователя, реализуя механизм инкапсуляции.

Также в СПАК-2 присутствует уровень структурного моделирования, при этом РЛС представляется как структура с параметрическим описанием как всей структуры, так и отдельных ее элементов. Но такое представление

РЛС не используется в СПАК-2 при имитационном моделировании, поэтому в данной статье рассматриваться не будет.

3.1. Функциональное представление РЛС.

В данном представлении модели – это граф, который либо может представлять всю модель РЛС, либо только часть модели РЛС, отдельную цепочку графа (например, только передающий тракт).

Каждый компонент структуры шаблона модели РЛС заменяем. Для таких компонентов существуют требования интеграции в единый граф шаблона модели. Используемая технология графа потока данных – это построение ориентированного в математическом смысле графа, вершинами которого являются вычислительные компоненты, а ребрами – шины, по которым данные передаются из одного компонента в другой. Технология похожа на Matlab-Simulink, но адаптирована под решение задач радиолокации. К особенностям следует отнести гибкость, параметризуемость компонентов и широкие возможности по интеграции сторонних программных модулей.

Компоненты моделей можно реализовывать на C++, Matlab, Python и автоматически интегрировать их в граф расчетов. Ко всем разрабатываемым программным модулям, которые будут являться компонентами графа предъявляются строгие требования в части интерфейсов и типов данных. Функциональный компонент является шаблоном для решения однотипных задач и имеет согласованные входной и выходной интерфейсы. Собранный из функциональных компонентов схема взаимодействия является шаблоном модели РЛС. Пример схемы графа шаблона модели РЛС в функциональном представлении приведен на рис. 1.

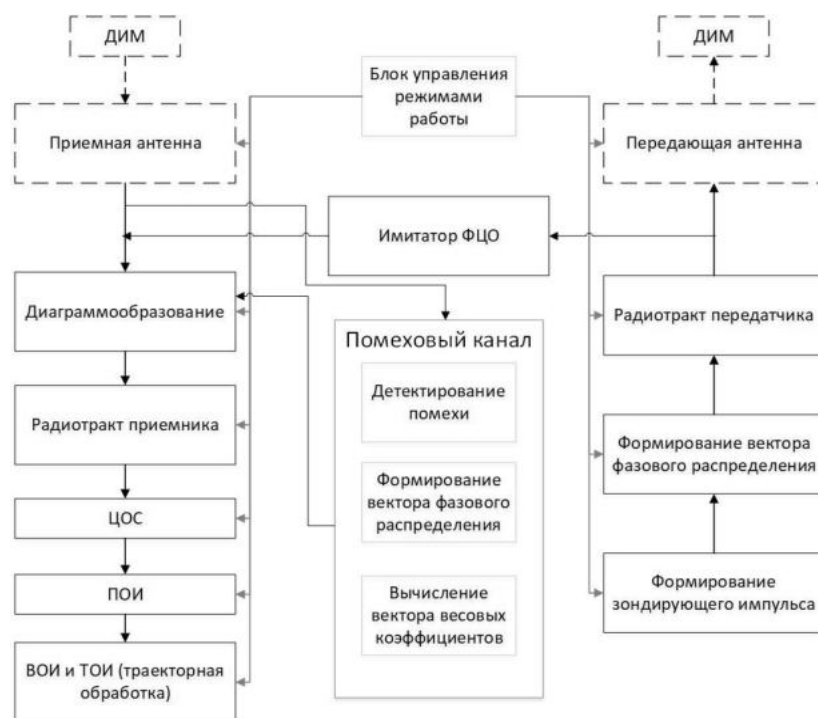


Рис. 1 – Пример схемы графа модели РЛС.

3.2. Системное представление РЛС.

Модель РЛС представляется в виде неделимого объекта, обладающего настраиваемым перечнем свойств. Внутри модель содержит, тот же функционал, что и при ее функциональном представлении в виде графа, однако без возможности настройки или замены отдельных алгоритмов станции. Переходить к системным настройкам РЛС пользователь может уже после определения, в большей степени, внутренних алгоритмов станции. Вместе с тем, шаблон модели РЛС может быть реализован без возможности его настройки и проверки в функциональном представлении, т.е. реализация исходного кода шаблона может быть даже в виде одного файла. В таком случае модель РЛС также может быть использована в имитационном моделировании на системном уровне.

Сценарий имитационного моделирования на системном уровне представляется с использованием той же технологии графа потоков данных, но в качестве компонентов (узлов) графа представлены объекты моделирования, среди которых объект модели РЛС. Граф сценария реализован на Python, поэтому все объекты моделирования, включая РЛС, представляются в виде Python-компонентов. Если исходный код шаблона модели РЛС, независимо от возможности функционального представления, реализован на языках C, C++, Matlab, то для него, в соответствии с правилами интеграции, создается Python-обертка. Пример графа сценария при имитационном моделировании с моделью РЛС в системном представлении приведен на рис. 2.

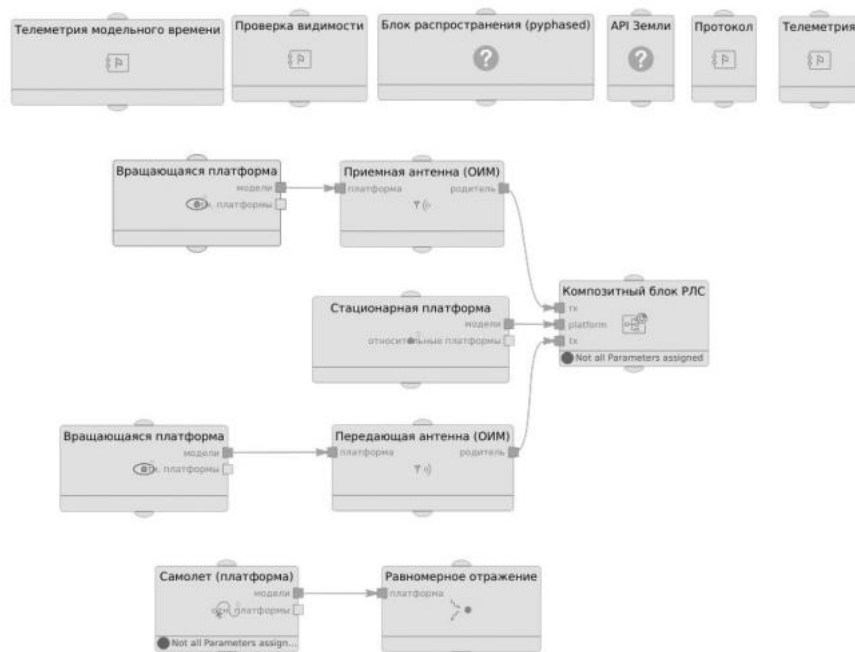


Рис. 2 – пример графа сценария имитационного моделирования

4. Возможности имитационного моделирования

4.1. Моделирование на функциональном уровне.

Модель РЛС в функциональном представлении выполненную в виде графа потоков данных, можно отображать, создавать и оперативно корректировать визуальными средствами инструмента СПАК-2 – функционального редактора [2]. Настройки режимов работы такой модели возможны путём задания фактических параметров работы компонентов графа, а также путём переконфигурации в функциональном редакторе.

С использованием имитатора ФЦО моделирование в функциональном редакторе решаются задачи выбора и отладки алгоритмов формирования зондирующего сигнала, моделирования прохождения сигнала через передатчик и приемник, а также алгоритмов обработки радиолокационной информации.

Функциональный редактор СПАК-2 позволяет объединять отдельные компоненты в соответствии с требуемым уровнем абстракции. Библиотека прикладных программных модулей (функциональных компонентов РЛС) содержит как базовые алгоритмы и логические примитивы, так и крупные модели функциональных компонентов РЛС, такие как, например, блок ЦОС или блок ВОИ целиком.

4.2. Моделирование на системном уровне.

При данном представлении РЛС решаются задачи анализа эффективности объединения РЛС в комплексы и системы, оценивается эффективность взаимодействия РЛС внутри группы, оценка расположения РЛС с учетом траекторий объектов наблюдения, оценивается эффективность использования разнесённых антенн с учётом подстилающей поверхности, климатических особенностей сценария и пр. Результаты моделирования визуализируются в динамике, а также при моделировании рассчитывается набор показателей качества работы РЛС. Пользователь может моделировать как одну РЛС, так и группировку, состоящую из одно- или разнотипных РЛС, объединённых в иерархию вместе с командными пунктами.

Также пользователь может редактировать имеющиеся модели РЛС или создать собственную модель. Таким образом, функционал системного уровня состоит в основном из двух частей: редактора радиосцены и функционала для создания сценариев имитационного моделирования боевых действий, с возможностью создания обороняющейся и нападающей боевых группировок [3].

В редакторе радиосцены производится выбор типов моделирования явлений распространения и рассеяния сигнала из списка подготовленных моделей. Сигнал в процессе моделирования представляется в виде отчетов комплексной огибающей, т.е. учитывается модуляция сигнала, что в процессе обработки принятого РЛС сигнала обеспечивает более точную оценку характеристик цели.

Чтобы более объективно оценить показатели эффективности, качества РЛИ с учетом вариаций условий применения, пользователь задает серию экспериментов. Например, варьируется как сам удар, так и расположение РЛС. Количество экспериментов будет соответствовать произведению вариантов расположения РЛС и вариантов удара.

5. Дальнейшее расширение возможностей моделирования в СПАК-2.

5.1. Расширение алгоритмической базы для шаблона модели РЛС.

В рамках проводимых работ по созданию СПАК-2 библиотеку прикладных программных модулей предлагается дополнить алгоритмами, предназначенными для обработки сигнала с выходов подрешёток ФАР с целью снижения воздействия постановщиков пассивных и активных помех, а также дополнительными алгоритмами с целью улучшения характеристик модели РЛС.

К реализации предлагаются алгоритмы обнаружения стохастических сигналов (сравнение решающей статистики с уровнем собственных шумов приемника), адаптивной пространственной фильтрации (формирование «провала» на ДНА в направлении на помеху), быстрой перестройки частоты (выбор частоты зондирующего сигнала по случайному или ступенчатому закону), формирования порога с постоянной вероятностью ложной тревоги, а

также в качестве улучшения характеристик РЛС применение моноимпульсной пеленгации (формирование нескольких приемных лучей и сравнение их амплитудных значений).

В функциональном редакторе для работы алгоритмов предлагается использовать обучающий пакет данных, принимаемый с выхода блока «Приемник», корректировку сигнала производить в блоке «Диаграмообразование», изменение частоты сигнала производить в блоке «Управление режимами работы». Выбранное значение частоты отправлять на встроенный блок «ЛЧМ сигнал», далее – на блок «Передающая антенна» для следующего сканирования.

5.2. *Расширение возможностей модели ФЦО*

Модификация комплекса моделирования фоно-целевой обстановки, включает:

- модели траекторий БПЛА и ГЗЛА, а также модели расчета сигналов, отраженных от таких объектов наблюдения;
- модели активных и пассивных помех;
- усовершенствованные алгоритмы распространения и рассеяния радиолокационных сигналов в случае применения бистатических, загоризонтных и других типов РЛС.

Постановщики активных и пассивных помех возможно добавить в качестве вариантов оснащения, размещенных на радиосцене объектов наблюдения РЛС. К реализации предлагаются постановщики шумовых заградительных (воздействующих по всей частотной области) и прицельных по частоте помех (формирующихся за счет периодической перестройки около несущей частоты обнаруженного при поиске радиолокационного сигнала), а также помех, создающих ложные метки по дальности и скорости (создание непрерывного сигнала с мощностью, много более высокой, чем мощность отраженного сигнала), помех типа антипод. В качестве пассивных помех могут быть рассмотрены облака дипольных отражателей и отражения от земной поверхности. Расширив возможности модели ФЦО, появится возможность проверить правильность работы алгоритмов помехозащиты, предлагаемых к реализации в библиотеке программных модулей для компоновки и настройки шаблона модели РЛС.

5.3. *Подключение КИО.*

Для обеспечения возможности проверки опытных образцов узлов из состава РЛС, а также для уточнения характеристик имитационной модели РЛС в СПАК-2 прорабатывается возможность в функциональном редакторе в качестве компонентов графа использовать программные средства сопряжения компонентов функциональной модели РЛС с контрольно-измерительным оборудованием.

Программные средства сопряжения содержат интерфейсные модули, которые могут заменить определенные компоненты модели, например, приемник, передатчик или формирователь зондирующего сигнала и т.д. Интерфейсный модуль обеспечивает обмен данными с контрольно-измерительным оборудованием, которое в свою очередь обеспечивает передачу и прием сигналов с физического образца. Тем самым в модели РЛС могут учитываться технические параметры узла, которые не участвуют в расчетных формулах (сложно вычислить алгоритмически), но могут влиять на результаты моделирования.

Использование контрольно-измерительного оборудования в СПАК-2 планируется в процессе выполнения шагов 5) и 6) перечня, приведенного в разделе 2 настоящей статьи.

Планируется использовать два подхода к применению контрольно-измерительного оборудования в СПАК-2:

- 1) использование физического образца вместе с контрольно-измерительным оборудованием в контуре функциональной модели для отработки алгоритмов – первый подход;
- 2) измерение параметров физического образца – второй подход.

5.3.1. Характеристика первого подхода.

Для первого подхода характерно:

- 1) при системном представлении РЛС производится моделирование атмосферы в контуре функциональной модели;
- 2) при функциональном представлении РЛС производится моделирование (имитационный эксперимент) при заданном сценарии с заменой компонентов графа модели физическими образцами.

При внедрении реального физического образца в контур функциональной модели составляется граф, который также можно использовать в виде шаблона на системном уровне.

Так называемая полунатурная модель при данном подходе позволяет отлаживать:

- 1) компоненты функционального редактора;
- 2) набор инструментов СПАК-2 с помощью аппаратной косимуляции в контуре полунатурной модели, т.к. программные шаблоны моделей РЛС, составленные в функциональном редакторе, могут не учитывать весь спектр воздействий и откликов на составные части полунатурной модели, либо реализация некоторых узлов РЛС в функциональном редакторе не представляется возможной (например, из-за присутствия ограничений аппаратной платформы).

Также полунатурная модель позволяет верифицировать опытные изделия с помощью готового СПАК-2 при имитационном моделировании.

5.3.2. Характеристика второго подхода.

Для второго подхода характерно:

- 1) при системном представлении РЛС производится уточнение (измерение) её параметров с последующим ее размещением на радиосцене. Также возможна аппаратная имитация ФЦО;
- 2) при функциональном представлении РЛС производится измерение параметров составных частей РЛС, зависящих от основных технических параметров РЛС. Значения измерений вносятся в компоненты графа функциональной модели. Проводится измерение параметров составных частей изделий при различных данных о внешних воздействиях и априорной информации, поступающих на эти составные части.

База полученных значений параметров РЛС в результате моделирования с использованием контрольно-измерительного оборудования позволяет воспроизводить программные сущности, соответствующие реальным физическим изделиям. На основе этой базы можно проводить сравнительный анализ результатов моделирования с аналогичными изделиями. Поверенную разницу можно внести в эмпирическую модель нового изделия.

Закключение. Текущие возможности СПАК-2 позволяют проводить проектирование РЛС в полном сквозном цикле на всех этапах: предварительной оценки параметров РЛС, инженерного анализа, имитационного моделирования, статистической обработки и оптимизации, оценки экономической целесообразности. Основными направлениями для развития СПАК-2 являются расширение библиотеки моделей РЛС, ФЦО и алгоритмов передачи и обработки сигналов, подключение КИО.

Библиографический список

1. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О., Арутюнян А.А. Этапы проектирования перспективных радиолокационных станций в специализированной САПР // Вестник воздушно-космической обороны. 2020. № 4 (28). С. 111-119.
2. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Постановка задачи разработки и предварительная архитектура отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. №20. С. 127-130.
3. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Реализация имитационного моделирования в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2018. №21. С. 290-293.

УДК 681.51

ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

А. А. Шевчик

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

В настоящее время все большее распространение получают мультиагентные системы. К таким системам относят те, в которых выполнение поставленных задач достигается согласованным взаимодействием группы агентов (роботов, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), автономных транспортных средств и т. п.). Такой подход первоначально был «позаимствован» инженерами в животном мире, где он широко применяется для выживания: птицы сбиваются в стаи перед долгим перелетом, косяки рыб менее уязвимы перед хищниками, пчелы для собственной безопасности образуют рой. Развитие мультиагентных систем в инженерном деле стало возможным, главным образом, с технологически обоснованным переходом от методов телеуправления к управлению автономными объектами или, иными словами, с появлением аппаратов, способных полноценно функционировать без оператора.

Беспилотники, в виду отсутствия человека на борту, способны использоваться в гораздо более тяжелых условиях окружающей среды, например, при повышенном радиационном фоне, совершать маневры с большими перегрузками. Также есть возможность располагать на борту больше полезной нагрузки за счет отсутствия комплекса систем, средств, оборудования и агрегатов создающих для жизнедеятельности человека атмосферу и обеспечивающих потребности человека в воде, пище и санитарногигиенических процедур, то есть систем жизнеобеспечения [1].

Преимущества беспилотников применяются, например, в сфере научных исследований. Способность транспортировать различное оборудование от чашки Петри и обычных камер до тепловизоров, лазерных дальномеров, газоанализаторов, мультиспектральных камер, спусковых устройств, магнитометров, манипуляторов позволяют выполнять географические исследования, в том числе детальное картографирование и различный мониторинг [2].

Автономные технологии активно внедряются на производствах и в сфере бизнеса. Самым ярким примером на настоящий момент выступает американская компания Amazon, внедрившая роботов практически на всех участках погрузочно-разгрузочных работ и формирования онлайн-заказов. Полномасштабная автоматизация их работы началась с приобретения стартапа Kiva Systems, созданного в 2003 году с целью проектирования роботов для склада. Идея возникла не на пустом месте — с 2001 года изучались причины банкротства американского онлайн-ритейлера Webvan. Как оказалось, основной причиной краха стала высокая стоимость формирования заказов. Именно снижение операционных расходов на складах и стало целью новой разработки [3]. Автоматизация складских работ способствует снижению ошибок, аварий и травм сотрудников, а также упрощает масштабирование склада.

Среди прочих самым перспективным и в то же время самым технически сложным остается разработка группового управления летательными аппаратами. В отличие от наземных объектов движение происходит не на плоскости, а в пространстве, также значительно большим оказывается влияние возмущающих воздействий, различной природы. Огромную важность имеет точность следования траектории, отклонение от целевой точки в результате управления, организация информационного обмена между агентами. В основном при организации движения БПЛА до сих пор опираются на методы телеуправления. Сигналы передаются в этом случае на объект управления чаще всего с применением различных пультов дистанционного управления. Такой подход к управлению проверен временем и надежен, но требует значительных человеческих ресурсов (требуется несколько операторов для каждого БПЛА) и не позволяет решать сложные нетривиальные задачи, поскольку система управления БПЛА в данном случае не предусматривает практически никакой возможности самостоятельного принятия агентом решения на основании окружающей обстановки (возможным исключением может служить решение об аварийной посадке). Значительно актуальнее и перспективнее представляется направление развития теории группового управления, основанное на автоматическом управлении БПЛА.

Автоматическое управление обеспечивает возможность полностью автономного полета БПЛА по заданной траектории на заданной высоте с заданной скоростью и со стабилизацией углов ориентации [4].

Системы группового управления по своей структуре могут быть разделены на централизованные и децентрализованные.

В централизованной структуре имеется единая общая система управления, куда передается информация о всех агентах. Далее это информация обрабатывается и в соответствии с заданной логикой управления формируются сигналы управления, которые влияют на состояние объектов группы. Недостатки централизованной структуры:

сложность быстрой и эффективной обработки информации; запаздывание формирования управляющих воздействий; недостаточная надежность при отсутствии резервирования, так как неполадки системы управления могут привести к прекращению функционирования объекта [5].

При децентрализованном групповом управлении каждый агент обладает своим управляющим устройством. Эти устройства связаны друг с другом информационными и управляющими связями, с помощью которых осуществляется взаимная координация движений роботов в соответствии с заданным алгоритмом группового управления.

Децентрализация с локальным взаимодействием и управлением повышает робастность, обеспечивает устойчивость к выходу из строя отдельных составляющих системы, масштабируемость и другие преимущества [6]. Здесь робастность следует понимать как свойство системы обеспечивать гарантированный уровень качества функционирования системы при задании широких классов характеристик внешних воздействий, а также параметрических и структурных возмущений системы [7].

Настоящий уровень технического развития и практический опыт показывают, что мультиагентное управление автономными БПЛА, которые обладают достаточными вычислительными мощностями для обработки данных об окружающей среде на борту и которые способны поддерживать информационный обмен должны управляться с использованием децентрализованного подхода.

Во всем мире огромное количество ученых трудится в области разработки и совершенствования алгоритмов группового управления автономными БПЛА. Актуальность проблемы не только не исчерпана, но и повышается год от года, особенно, обращаясь к аппаратам самолетного типа, когда управление осложняется высокой динамикой событий, а сигналы управления в реальных системах ограничены.

Значительных успехов удалось достичь в последние годы в результате выполнения исследовательских работ, которые проводились в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Получены результаты в области децентрализованного управления группой БПЛА на основе теории плоских систем [8]. Синтезированы алгоритмы, основанные на применении теории направляющих векторных полей [9, 10, 11]. Опубликовано ряд работ, посвященных вопросам группового управления малыми спутниками [12, 13, 14, 15].

В рамках данной работы удалось успешно применить алгоритмы, основанные на протоколе консенсуса, предполагающего достижения состояниями агентов единого значения, либо заданной траектории. Был синтезирован алгоритм позволяющий совершать движение группы заданной формации по выбранной траектории. На рисунках 1, 2 представлены результаты моделирования для движения группы по окружности и эллипсу, соответственно.

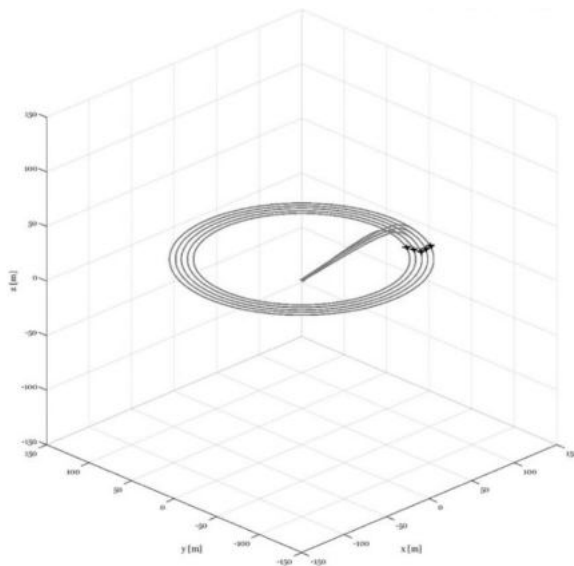


Рис. 1. Моделирование движения по окружности

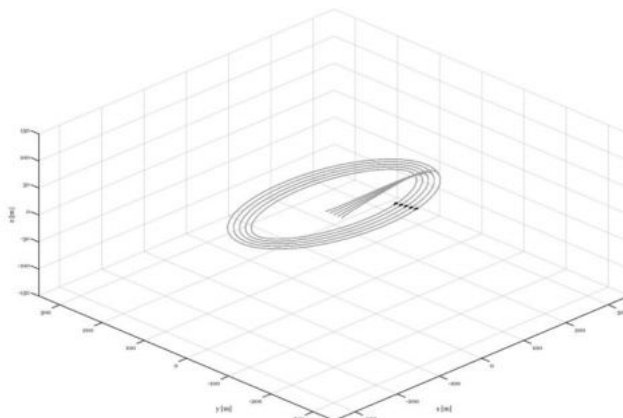


Рис. 2. Моделирование движения по траектории в форме эллипса

На рисунке 3 представлен результат моделирования при движении группы переменной формации, переходящей в процессе моделирования с одной траектории на другую.

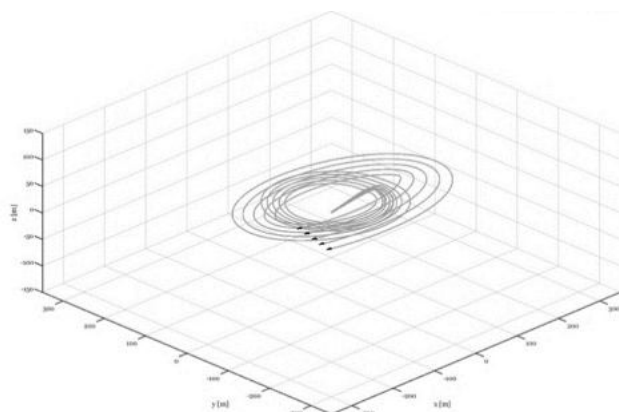


Рис. 3. Моделирование движения по траектории переменной формы

Особый интерес представляет результат, полученный при моделировании наведения группы БПЛА при помощи метода пропорционального наведения в пространстве, описанного в работе [16]. Используя формацию, переменную во времени, получилось добиться единовременного достижения цели всеми агентами группы [17]. Результаты моделирования проиллюстрированы на рисунке 4.

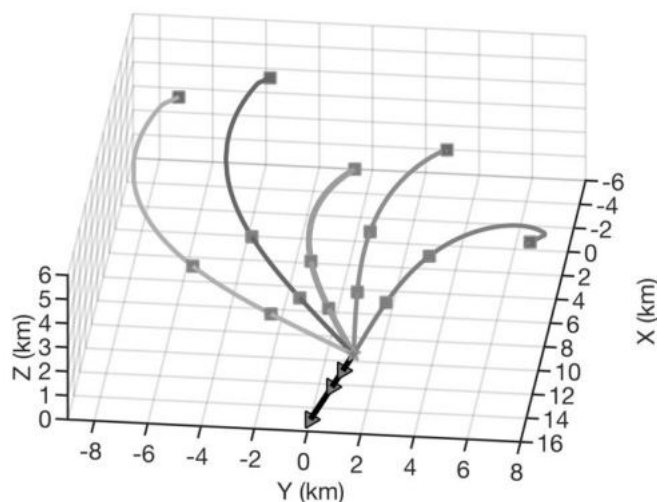


Рис. 4. Траектории движения группы при наведении на подвижную цель

Применение группы автономных БПЛА, которые способны выдерживать заданный строй или двигаться формацией переменной во времени, может быть полезно при решении таких задач как: аэрофотосъемка, картографическая и геодезическая деятельность, производственно-экологический мониторинг и многое другое. На данный момент решена задача наведения для группы автономных БПЛА, описываемых кинематическими уравнениями. На будущее поставлена задача разработки математической модели, описывающей динамику летательных аппаратов для проведения дополнительных исследований и последующего совершенствования алгоритма управления.

Благодарность

Работа выполнена в организации БГТУ «ВОЕНМЕХ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (доп. соглашение от 09.06.2020 № 075-03-2020- 045/2 на выполнение базовой части государственного задания «Разработка фундаментальных основ создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования»).

Научный руководитель: А. М. Попов.

Библиографический список

1. Абрамов И. П., Алдашкин И. В., Алексеев Э. В. Ракетно-космическая техника // Учебное пособие. Москва: Машиностроение. Книга 2, 2014. С. 240.
2. Уже не человек, еще не самолет: как беспилотники служат науке [Электронный ресурс]; URL: <https://www.rgo.ru/article/uzhe-ne-chelovek-eshchyo-ne-samolyot-kak-besplotniki-sluzhat-nauke> (дата обращения: 17.04.2022).
3. Автоматизация складов с помощью роботов [Электронный ресурс]; URL: <https://top3dshop.ru/blog/warehouse-and-logistics-robots-review.html> (дата обращения: 17.04.2022).

4. Олейник А. М., Попов А. М., Подкорытова М. А., Николаев А.Ф. Основы дистанционного зондирования Земли и фотограмметрических работ при изысканиях для строительства инженерных сооружений // Учебное пособие. Тюмень: ТюмГНГУ, 2016. 186 с.
5. Полеатаев В. А., Чичерин И. В. Проектирование систем управления // Учебное пособие. Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2008. С. 11-12.
6. Kanjanawanishkul K. Coordinated Path Following Control and Formation Control of Mobile Robots. Tübingen: Eberhard-Karls-Universität, — 2010. [Электронный ресурс]; URL: <https://hrcaak.srce.hr/file/196635> (дата обращения: 04.03.2022).
7. Шалыгин А. С., Санников В. А. Устойчивость динамических систем автоматического управления // Учебное пособие. СПб: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2015. С. 6.
8. Костин И. Д., Попов А. М., Кострыгин Д. Г., Фадеева Ю. В. Децентрализованное управление полетом строя БПЛА на основе теории плоских систем // Тезисы 19-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика». Москва, 2020. С. 68 – 69.
9. Кострыгин Д. Г., Попов А. М. Алгоритмы управления полетом БПЛА по заданному пути на основе направляющих векторных полей // Материалы XXVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб, 2021. С. 49 – 51.
10. Kostrygin D., Popov A. Algorithms for UAV flight control along a given path based on guiding vector field // 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2021. 28. 2021. С. 9470425. pp.1-3. DOI: 10.23919/ICINS43216.2021.9470425.
11. Кострыгин Д. Г., Попов А. М., Костин И. Д., Фадеева Ю. В. Управление полетом БПЛА по заданному пути на основе метода векторных полей // Тезисы 19-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика». Москва, 2020. С. 69 – 71.
12. Popov A. M., Kostin I., Fadeeva J., Andrievsky B. Development and simulation of motion control system for small satellites formation // Electronics (Switzerland). 2021. Т. 10. № 24. pp.1-29. DOI: 10.3390/electronics10243111.
13. Костин И. Д., Попов А. М., Кострыгин Д. Г., Фадеева Ю. В. Адаптивное управление с неявной эталонной моделью группировкой малых спутников // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. В 2 ч. под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. Красноярск, 2020. С. 230 – 231.
14. Андриевский Б. Р., Кузнецов Н. В., Попов А. М. Алгоритмы аэродинамического управления относительным движением двух спутников по околокруговой орбите // Дифференциальные уравнения и процессы управления №4, 2020. С. 28 – 58.
15. Кузнецов Н. В., Андриевский Б. Р., Кудряшова Е. В., Кузнецова О. А., Попов А. М. Скрытые колебания управляемой аэродинамическим сопротивлением формации двух спутников // Материалы III Международного семинара, посвященного 75-летию акад. А. И. Субботина., 2020. С. 207 – 210.
16. Seong-Ho Song and In-Joong Ha, A Lyapunov-like approach to performance analysis of 3-dimensional pure PNG laws, in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 30, no. 1, pp. 238-248, Jan. 1994, doi: 10.1109/7.250424.
17. Попов А. М., Кострыгин Д. Г., Матвеев С. А., Шевчик А. А. Разработка алгоритмов группового наведения беспилотных летательных аппаратов // Сборник тезисов в 4 т. XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства.. Москва, 2021. С. 311 – 313.

УДК 520.6.07

ДИСКРЕТНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ТИПА НЕСУЩИЙ КОРПУС

Н.М. Иванов, П.Д. Горохова

¹. Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

². АО «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева»

На сегодняшний день всё больший масштаб обретает тенденция к разработке многоазовых возвращаемых ракет – носителей (РН). РН КОРОНА является одним из подобных космических аппаратов (КА); разрабатывается для выведения КА с разгонными блоками (РБ) на низкие околоземные опорные орбиты с высотой апогея от 200 до 500 км. Была создана математическая модель (ММ) движения летательного аппарата (ЛА) типа «несущий корпус», являющегося прототипом ракеты-носителя КОРОНА. ММ описывает движение ЛА на участке от схода с орбиты до входа в зону взлётно-посадочной площадки [4].

ММ движения ЛА включает в себя алгоритм управления и стабилизации ЛА в полёте. Агрегатами управления РН КОРОНА являются ракетные двигатели малой тяги стабилизации, ориентации и прецизионных перемещений (РДМТ СОПП). На сегодняшний день ракетные двигательные установки (ДУ) неспособны обеспечить непрерывное изменение тяги, но имеют режимы работы в половину мощности и на полную мощность. Такое существенное ограничение влияет на ММ движения и полётное задание [5].

Значение непрерывной управляющей тяги для каждого пояса РДМТ рассчитывается по уравнению пропорционально–интегрально–дифференциального (ПИД)–регулятора:

$$\alpha_{\text{откл}} = \alpha_{\text{прогр}} - \alpha_{\text{реал}};$$

$$T_{\text{непр}} = K \cdot \left(K_P \cdot \alpha_{\text{откл}} + K_I \cdot \int_0^t \alpha_{\text{откл}}(\tau) d\tau + K_D \cdot \frac{d\alpha_{\text{откл}}}{dt} \right). \quad (1)$$

В таблице 1 представлены величины, входящие в алгоритм управления и стабилизации ЛА.

Таблица 1 – Параметры управления

K_P	K_I	K_D	K	$T_{\text{макс}}, \text{Н}$
22	0	12	3,6	9800

В формуле (1) и таблице 1 t – промежуточный момент времени в моделировании; $\alpha_{\text{откл}}$ – отклонение угла атаки, то есть разница программного и реального углов атаки; K, K_P, K_I, K_D – весовые коэффициенты регулятора, $T_{\text{непр}}$ – тяга РДМТ, меняющаяся непрерывно во времени; $T_{\text{макс}}$ – максимальная тяга РДМТ [1].

В ММ РДМТ СОПП по тангажу предполагается разделить по диагональным парам. В каждой паре оба РДМТ при включении создают моменты тяги одного знака. В ходе работы принято требование, влияющее на

эффективность работы автомата управления и стабилизации: каналы управления диагональных пар РДМТ должны быть независимы друг от друга. В таблицах 2 и 3 представлены варианты распределения мощности тяги на поясах РДМТ в случае наличия независимых каналов тяги и в случае их отсутствия.

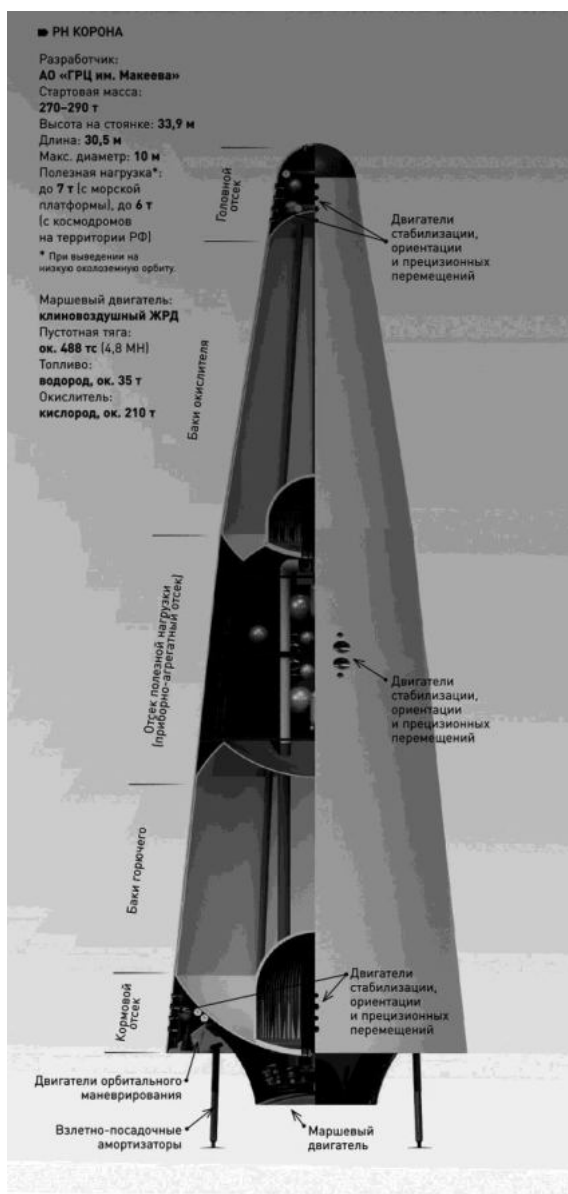


Рисунок 1 – Общий вид РН КОРОНА

Таблица 2 – Распределение мощности тяги с независимыми каналами тяги

Относительная тяга пояса 1	Относительная тяга пояса 2	Общая относительная тяга поясов
0	0	0
0	0,5	0,25
0,5	0	0,25
0	1	0,5
0,5	0,5	0,5
1	0	0,5
0,5	1	0,75
1	0,5	0,75
1	1	1

Где относительная тяга пояса это

$$T_{\text{отн } i} = \frac{T_i}{T_{\text{max}}} \quad (2)$$

А общая относительная тяга поясов:

$$T_{\text{общ отн}} = \frac{T_1 + T_2}{2 \cdot T_{\text{max}}} \quad (3)$$

Таблица 3 – Распределение мощности тяги без независимых каналов тяги

Относительная тяга пояса 1	Относительная тяга пояса 2	Общая относительная тяга поясов
0	0	0
0,5	0,5	0,5
1	1	1

Результаты моделирования показывают, что использование независимых каналов тяги позволяет распределять мощность поясов так, чтобы суммарный момент тяги был близок требуемому. При помощи моделирования сравнительным анализом параметров движения доказана необходимость исполнения названного требования. Результаты моделирования отражены на рисунках 2-3.

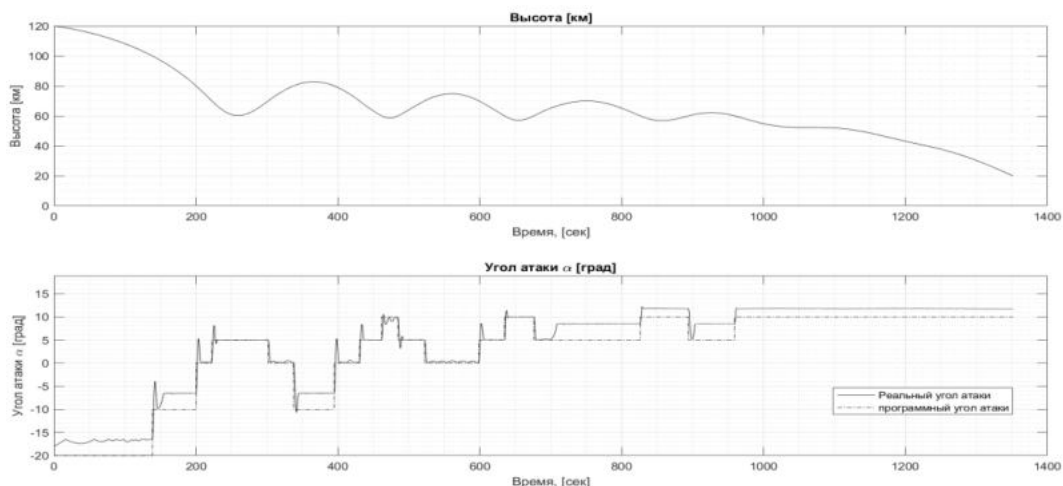


Рисунок 2 – Изменение высоты и угла атаки во времени без независимых каналов тяги

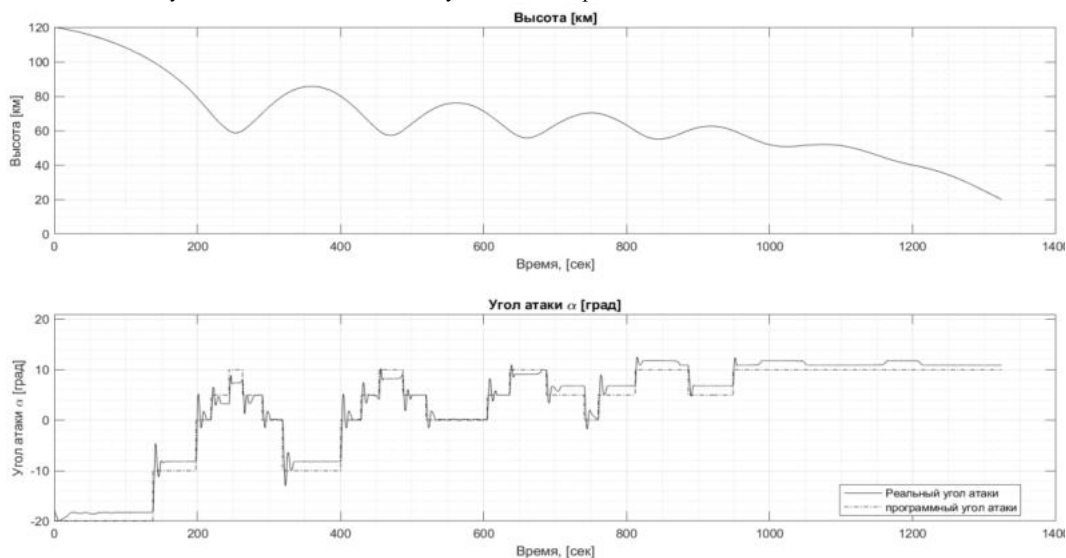


Рисунок 3 – Изменение высоты и угла атаки во времени при наличии независимых каналов тяги

Результаты моделирования при наличии и при отсутствии независимых каналов тяги можно сравнить по величинам статического отклонения, амплитуды перерегулирования и по количеству колебаний перерегулирования на каждом из участков программного угла атаки. Иные параметры управления движением ЛА, полученные в результате моделирования системы при наличии независимых каналов тяги, представлены на рисунках 4-5.

На рисунке 4 представлены графики изменения момента тяги РДМТ обоих поясов во времени. Этот момент необходим для компенсации действия аэродинамического момента при планирующем типе спуска КА с орбиты. Момент тяги создаётся управляющей тягой обоих поясов РДМТ, графики изменения которых во времени представлены на рисунке 5.

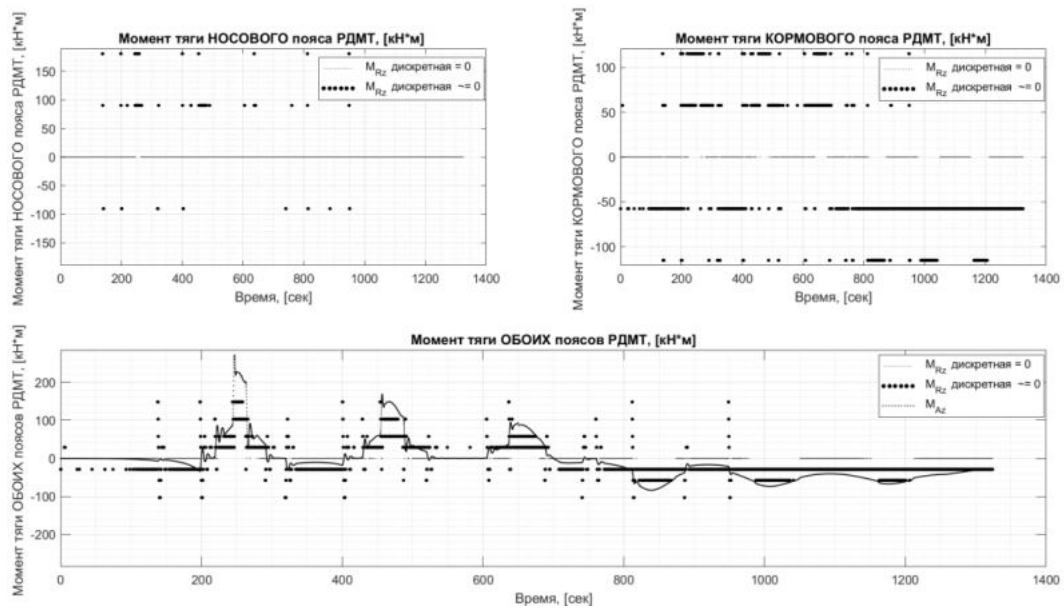


Рисунок 4 – Изменение момента тяги поясов во времени с распределением мощности

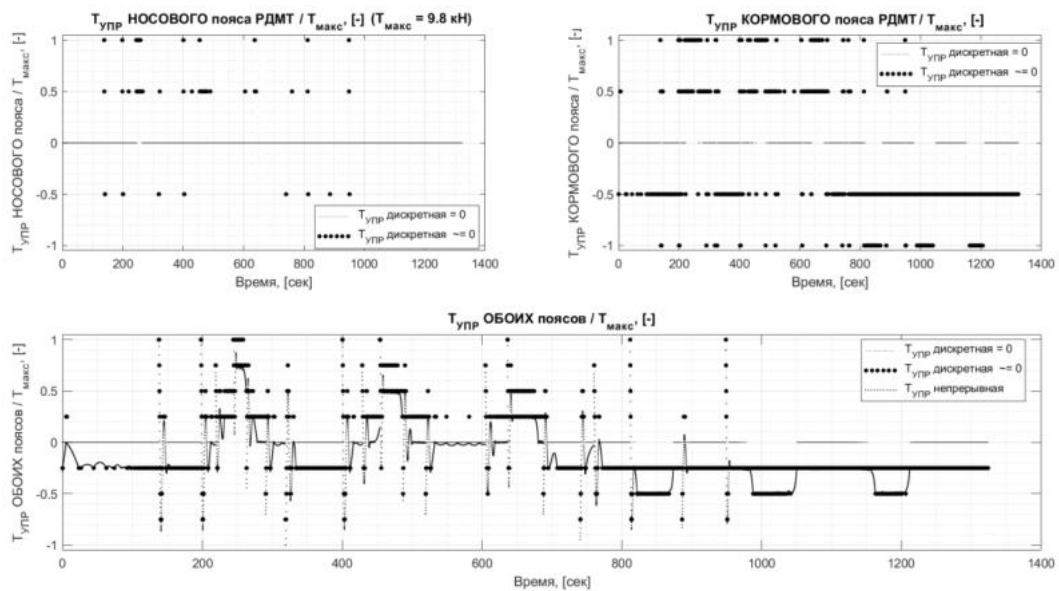


Рисунок 5 – Изменение тяги поясов во времени с распределением мощности

При замене характера изменения параметра с непрерывного на дискретный логично не дожидаться, пока непрерывный параметр станет больше очередного дискретного значения. Поэтому в рамках очередного приближения ММ к действительности в ММ был введён параметр «коридор захвата» S.

Эта безразмерная относительная величина определяет, к какому из двух дискретных значений будет приравнено непрерывное значение.

Верхняя граница коридора захвата отклоняется от дискретного значения функции в сторону увеличения модуля функции на значение S% шага дискретных значений функции, а нижняя – в сторону уменьшения на (1 - S)%.

На каждом шаге функция непрерывного значения тяги зависит от принятого значения дискретной тяги на предыдущем шаге. А значит, и от величины коридора захвата. Из этих соображений был начат поиск оптимальной величины методом подбора. Ниже приведены графики изменения тяги поясов при моделировании системы без алгоритма коридора захвата и с оптимальным значением параметра.

График изменения тяги двух поясов во времени без использования алгоритма коридора захвата представлен на рисунке 5. С использованием алгоритма коридором захвата – на рисунке 6.

На рисунках 7-8 ниже приведены графики параметров движения с оптимальным значением коридора захвата и распределением мощности поясов РДМТ СОПП, а именно графики изменения во времени момента тяги у носового и кормового поясов раздельно и в одних координатах; график изменения высоты во времени, график изменения программного и реального углов атаки во времени.

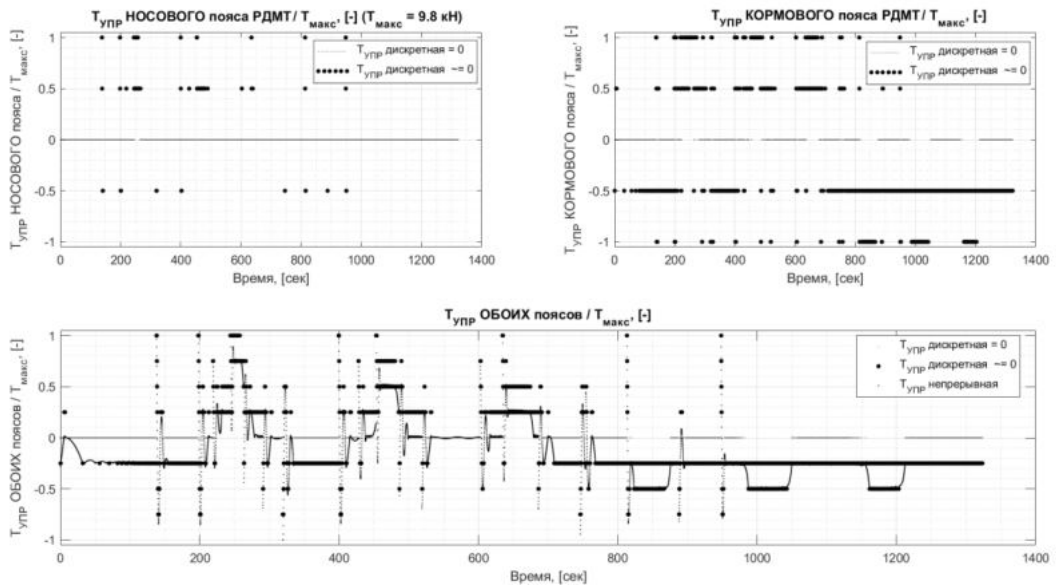


Рисунок 6 – График изменения тяги поясов с оптимальным коридором захвата

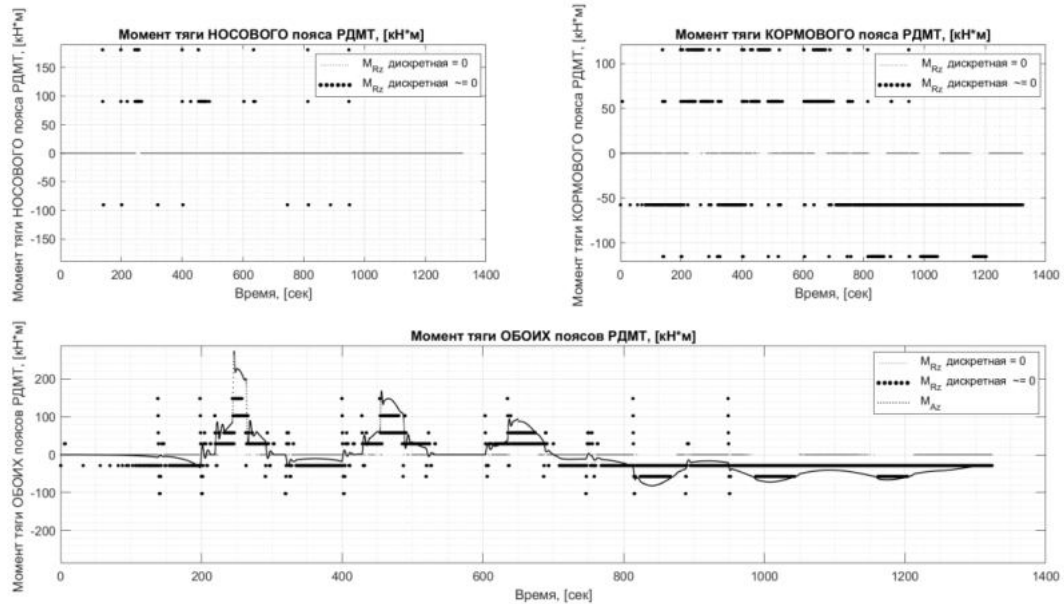


Рисунок 7 – График изменения момента тяги поясов

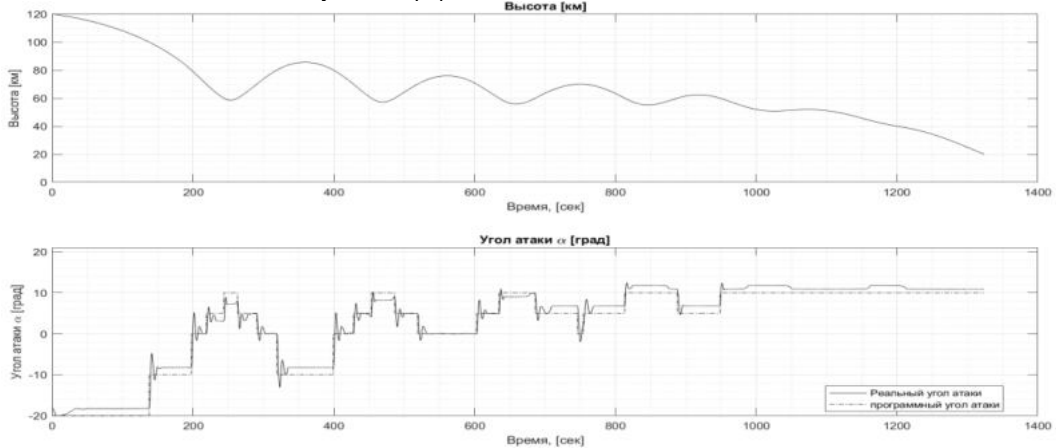


Рисунок 8 – График изменения высоты и угла атаки

На графиках видно, что на отдельных участках рисунка 7 график непрерывной функции имеет меньшую амплитуду колебаний. Так как дискретная тяга следует за рассчитанной непрерывной, в перспективе дальнейшей разработки ММ снижение колебаний непрерывной тяги означает, что на агрегат управления ЛА не будут поступать команды на включение противоположной диагональной пары РДМТ в момент времени, когда первая пара ещё не прекратила действие из-за инерционности РДМТ. Таким образом, будет сэкономлено топливо и ресурс работы ДУ, уменьшены колебания ЛА в пространстве.

В таблице 4 представлены численные результаты критериев сравнения графиков угла атаки в начальной системе, системе первого приближения и системе второго приближения.

Таблица 4 – Численные результаты критериев сравнения

Номер системы	$\sigma_{\alpha_{MAX}}$	$n_{\sigma_{\alpha}}$	$\alpha_{\text{стат.откл}_{MAX}}$	$n_{\text{стат.откл } \alpha}$	$t_{\text{ПП}}$
1	6	2	3,5	7	15
2	5,5	3	3	13	15
3	5	3	2	12	15

Здесь $\sigma_{\alpha_{MAX}}$ – максимальное перерегулирование угла атаки за всё время моделирования, $n_{\sigma_{\alpha}}$ – максимальное число перерегулирований на одном участке программного угла атаки, $\alpha_{\text{стат.откл}_{MAX}}$ – максимальное статическое отклонение угла атаки за всё время моделирования, $n_{\text{стат.откл } \alpha}$ – число статических отклонений за всё время моделирования, $t_{\text{ПП}}$ – максимальное время переходного процесса.

Система с меньшим количеством колебаний, но постоянным наличием статического отклонения более предпочтительна, нежели система с большими по амплитуде колебаниями переходного процесса и большим статическим отклонением. В системах 2 и 3 произошло больше переключений программного угла атаки, что объясняет большее количество статических отклонений на участках. Чем больше отдельных участков, тем больше будет число отклонений. Таким образом, система 3 из всех рассмотренных является наиболее предпочтительной для достижения практического результата.

Библиографический список

1. Егоров К.В. Основы теории автоматического регулирования, учебное пособие для вузов // изд. 2-е. «Энергия» — Москва, 1967.С. 50-57.
2. Правдин В.М., Шанин А.П., Баллистика неуправляемых летательных аппаратов // РФЯЦ – ВНИИТФ — Снежинск, 1999. С. 113-114.
3. Matlab – пакет прикладных программ [Электронный ресурс] // URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/plot.html?s_tid=srchtitle_plot_1 (дата обращения 14.03.2022)
4. Корона (ракета-носитель) [Электронный ресурс] // Свободная энциклопедия, URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B0_\(%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B0_(%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C)) (дата обращения 14.03.2022)
5. Русский космос: проект «Корона» и другие разработки ГРЦ Макеева [Электронный ресурс] // URL: <https://www.popmech.ru/technologies/363532-russkiy-kosmos-proekt-korona-i-drugie-razrabotki-grc-makeeva/> (дата обращения 14.03.2022)

УДК 681.518

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

А. С. Исаев

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

В наше время аккумуляторные батареи (АБ) нашли применение в бытовых устройствах, в резервных источниках питания и электромеханических системах, накапливающих энергию для возможных пиковых нагрузок и аварийного питания электроэнергией жизненно важных систем. Также АБ широко применяются в космических аппаратах, чтобы обеспечивать их постоянное функционирование на всех этапах проведения миссий. Для контроля качества АБ необходимо точно определять их характеристики, а также проводить ёмкостные испытания [1, 2]. Целью данной работы является как раз решение технического вопроса по созданию такой системы контроля АБ.

На рис. 1 представлена примерная измерительная система для определения зарядно-разрядных характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи на базе микроконтроллера Arduino Uno. Данный стенд позволяет в режиме реального времени отслеживать характеристики аккумуляторной батареи небольшой емкости. Для его изготовления потребовался ряд компонентов, таких как аналого-цифровой преобразователь (АЦП), нагрузочные резисторы, электромеханическое реле, датчик тока, литий-ионный аккумулятор.

АЦП предназначен для преобразования аналоговых сигналов в поток цифровых данных. В данной системе осуществляется обработка значений тока и напряжения на аккумуляторной батарее. В качестве АЦП была выбрана плата Arduino Uno на базе контроллера ATmega328 по причине экономической доступности и простоты использования.

Электромеханическое реле предназначено для замыкания частей данной измерительной системы. Переключение реле управляется напряжением 3,3...5 В.

Датчик тока предназначен для определения силы тока в цепи постоянного и переменного тока в диапазоне до 5 А. Датчик выполнен на основе микросхемы ACS712.

Проволочные резисторы в данной схеме выступают в качестве нагрузки.

Контроллер заряда для литий-ионных аккумуляторных батарей предназначен для защиты аккумулятора от перезаряда и перезаряда. Используемый модуль выполнен на базе контроллера TP4056.

Для обеспечения измерения характеристик аккумулятора при разных значениях температуры необходима термокамера. Ввиду ее высокой цены участвовать в эксперименте она не будет. Для примера можно привести систему температурных испытаний СТИ-70/150. Данная камера обеспечивает возможность проведения испытаний в широком температурном диапазоне, с высокой точностью и быстрой скоростью изменения температур.

В результате выполнения полного цикла разряда и заряда был получен график изменения напряжения АБ в течение всего цикла (рис. 2). Таким образом, результатом работы стенда является зарядно-разрядная характеристика аккумуляторной батареи.

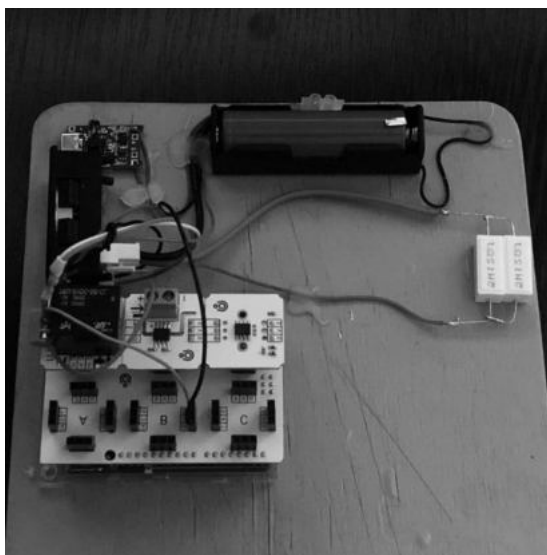


Рисунок 1. Стенд

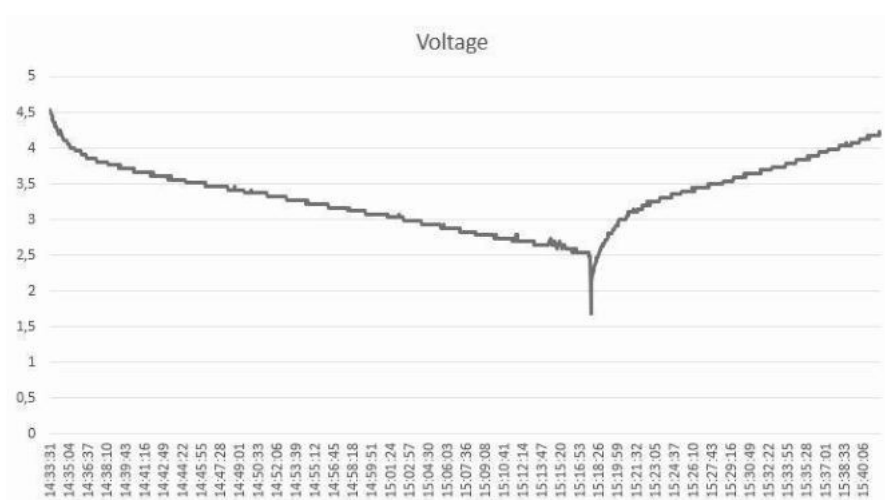


Рисунок 2. Зарядно-разрядная характеристика

Основной качественной характеристикой аккумуляторной батареи является разрядный график, который можно наблюдать в первой половине, где напряжение аккумулятора постепенно снижается. [3] Емкостью АБ будет являться вся площадь под разрядным графиком, однако часть разрядного графика, расположенной выше линии отключения (рис. 3) определяет эффективную емкость аккумулятора. Соответственно, ёмкость, которая ниже линии отключения устройством использоваться быть не может, но будет использована самой АБ для компенсации потерь энергии при саморазряде. Эффективная емкость новой АБ будет составлять 90%, но в процессе износа разрядный график будет смещаться влево и вниз, то есть неэффективная ёмкость будет расти.

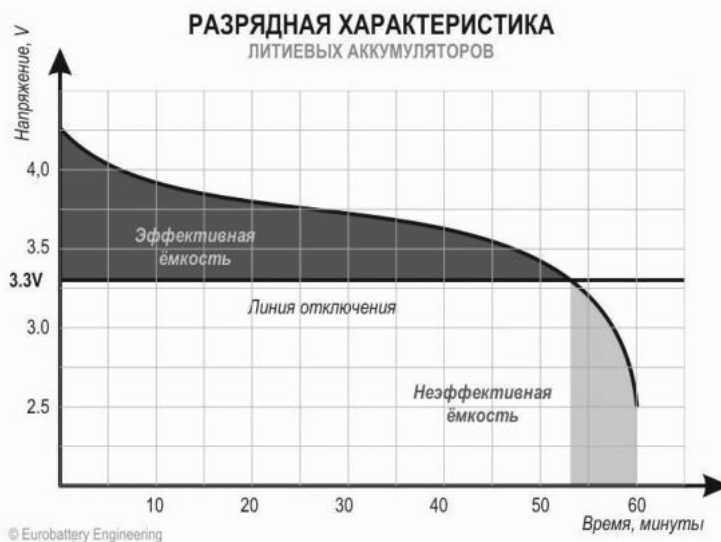


Рисунок 3. Разрядная характеристика

Говоря о зарядной характеристике, необходимо разделить заряд АБ на два этапа: «быстрый» при постоянном токе и «медленный» при постоянном напряжении (рис. 4).

На первом этапе АБ потребляет весь ток, который создает зарядное устройство. Напряжение быстро увеличивается по мере увеличения заряда. На этом этапе АБ заряжается на 50-70%. В действительности время быстрого заряда зависит от мощности зарядного устройства: если оно недостаточно мощное, то время заряда пропорционально увеличится.

Второй этап характеризуется уменьшением зарядного тока, по причине чего скорость заряда уменьшается. Медленная зарядка может продолжаться в течение 2 часов, причем мощность зарядного устройства никак не влияет на скорость заряда.

Таким образом, полученная кривая напряжения аккумулятора соответствует известной зависимости литий-ионных аккумуляторов, что значит основная цель была достигнута.



Рисунок 4. Зарядная характеристика

Говоря об отличиях приведенной измерительной системы, следует сказать, что она предназначена в основном для малогабаритных аппаратов, оснащенных АБ малой емкости, а также может быть реализована для обеспечения учебного процесса.

Научный руководитель – Ходосов В. В.

Библиографический список

1. ГОСТ Р МЭК 61427-1-2014 Аккумуляторы и аккумуляторные батареи для возобновляемых источников энергии. Общие требования и методы испытаний.
2. «Системы электропитания космических аппаратов, учебное пособие» / А. Г. Козлов, В. В. Ходосов; М-во образования и науки Российской Федерации, Балтийский гос. технический ун-т «Военмех».
3. «Экспериментальное исследование характеристик опытного образца модуля зарядно-разрядного устройства» / Е. А. Копылов, Е. А. Мизрах, Д. К. Лобанов; Сибирский гос. университет науки и технологии им. Решетнева.

УДК 621.371.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ КАНАЛА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Воловдов А. В.

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

Аннотация: В статье рассматривается разработанная методика, позволяющая теоретически обосновать и практически сформировать новую структуру сети радиосвязи общего пользования с включением в неё дополнительного компонента – сети радиосвязи общего пользования с радиостанциями СВЧ диапазона волн. В исследованиях использованы методы аналитических расчётов, программно-алгоритмического построения с применением математических моделей. Приведённые результаты исследования носят оценочный характер, который может служить основой для дальнейших исследований с целью конкретизации структуры и технического облика предлагаемой сети радиосвязи с использованием СВЧ канала.

Ключевые слова: сети радиосвязи общего пользования, радиостанции общего пользования, ультракоротковолновая радиостанция, коротковолновая радиостанция, межузловая радиостанция, сверхвысокочастотная радиостанция, рациональная структура сети радиосвязи, математическое моделирование, пропускная способность, помехоустойчивость, помехозащищённость, живучесть.

Анализ развития средств радиосвязи для сложных организационно-технических систем показал, что наиболее перспективным и новым направлением развития средств радиосвязи является создание радиостанций СВЧ диапазона. Радиостанции СВЧ диапазона обладают способностью высокоскоростной передачи данных (скорость от

5 до 10 МБит/с), а способность СВЧ радиостанций работать с высокой скоростью позволяет реализовать на их основе новые информационные технологии. Одной из таких технологий, например, использование IP-протоколов. Кроме того, сеть СВЧ радиолиний позволяет поддерживать многоканальную радиосвязь с частотно-временным разделением каналов, что позволяет увеличить количество абонентов в одной сети и, при этом, существенно снизить потери информации. Немаловажным фактором является и то, что СВЧ диапазон в значительно меньшей степени подвержен различного рода внешним воздействиям, в отличие от более распространённых УКВ и КВ радиолиний. Следовательно, возможно обеспечить более высокую помехозащищённость радиолиний с использованием сети СВЧ связи. К тому же, как было отмечено, основным преимуществом СВЧ сети является высокая скорость передачи информации даже при использовании маломощных станций. Однако, дальность действия этих радиостанций значительно меньше, чем радиостанций КВ диапазона, что задаёт специфику использования данного типа связи в виде необходимости организации локального взаимодействия между элементами системы в малом радиусе действия радиолинии связи.

На данный момент сеть радиосвязи на основе УКВ радиолиний – основная транспортная сеть для обмена данными между средствами автоматизированного управления элементами системы. При этом скорость передачи данных составляет 16-32 кБит/с. Это не обеспечивает возрастающие потребности системы управления сложными организационно-техническими системами и необходимую пропускную способность сети радиосвязи для данного вида коммуникации и управления. Кроме того, использование прямых радиолиний снижает выживаемость системы и её устойчивость по отношению к внешним воздействиям.

Разные принципы построения сети радиосвязи на радиостанциях УКВ, КВ диапазона и радиостанциях СВЧ диапазона неизбежно приводят к разделению сети радиосвязи на две относительно самостоятельные компоненты: существующую сеть прямых УКВ и КВ радиолиний и новую подсистему – сеть радиосвязи общего пользования СВЧ диапазона.

Сеть радиосвязи на основе СВЧ радиостанций неизбежно несёт в основе большое количество составных элементов, в первую очередь – ретрансляционные станции. Это, безусловно, повышает устойчивость сети, но и увеличивает сложность её функционирования. Поэтому необходимо разработать методику формирования рациональной структуры сети радиосвязи общего пользования, в которой, в отличие от известных элементов, должно учитываться использование распределённых структур и специфические условия обеспечения связи в СВЧ диапазоне.

Сеть связи с использованием радиостанций различного диапазона длин волн, как сложную систему, можно представить в виде множества входящих в неё элементов и величин, представляющих собой в общем случае следующие подмножества [1]:

- совокупность технических средств и взаимосвязей между ними;
- совокупность входных воздействий (трафик пользователей сети);
- совокупность воздействий внешней среды (случайные и организованные помехи);
- совокупность внутренних параметров (частотный диапазон, пропускная способность радиоканалов, производительность отдельной и межузловой радиостанции, параметры системы обеспечения, параметры системы управления);
- совокупность выходных характеристик системы – пропускная способность радиоканалов, дальность действия, количество абонентов и др.

При моделировании системы входные воздействия, воздействия внешней среды и внутренние параметры системы являются независимыми переменными. Выходные характеристики системы являются зависимыми переменными.

Синтез сети радиосвязи общего пользования для обеспечения сложной организационно-технической системы, функционирующей в пределах некоторой территории (территории геологических и археологических работ, крупные строительные объекты, расположения постоянной дислокации воинских частей и их функционирования в условиях повседневной службы и военных действий и др.), осуществляется на основе математической модели и положений методики расчета параметров коммутируемых сетей связи и требований по обеспечению необходимой устойчивости функционирования последних.

Сеть СВЧ радиосвязи, в основу которой предполагается положить информационную технологию стандарта «TETRA V+D», может иметь различную топологию. Известные варианты организации топологии сетей радиосвязи радиально-узловой и радиальной структуры применительно к какому-либо функционирующему территориальному образованию из числа приведённых могут быть получены без дополнительной разработки и обоснования, так как не предполагают сложных вариантов построения. Радиальную структуру сети радиосвязи общего пользования характеризует наличие одной центральной межузловой радиостанции, напрямую связанную линиями с абонентскими радиостанциями. Радиально-узловая структура сети радиосвязи предполагает наличие одной центральной межузловой радиостанции и нескольких дополнительных межузловых радиостанций, напрямую связанных с центральной и абонентскими станциями, но не связанных друг с другом. Распределённый вариант организации радиосвязи подобного образования может иметь различные состав и структуру по количеству станций доступа и связности. Поэтому формирование топологии распределённой структуры требует математического обоснования применительно к условиям её функционирования.

Дадим определение понятия «межузловая радиостанция» применительно к формируемой рациональной структуре сети радиосвязи. Межузловая радиостанция – радиостанция, основным предназначением которой является трансляция данных между центральной радиостанцией и абонентами с целью увеличения радиуса возможной передачи и снижения нагрузки на сеть связи. В случае построения сети СВЧ связи эти станции необходимы, так как позволяют не только увеличить площадь покрытия, но и реализовать основные преимущества такой сети – повысить её устойчивость к внешним воздействиям, при этом не потеряв в скорости передачи информации.

Распределённая структура топологии предполагает наличие нескольких межузловых радиостанций, распределённых по территории и соединённых линиями связи как с абонентскими станциями, так и друг с другом.

При формировании топологии распределенной структуры необходимо определить количество межузловых радиостанций, размещение их в пределах территории функционирования подобных структур и их взаимосвязи.

Проведенные ранее исследования показали, что построение абонентских сетей и сетей межузловых радиостанций определяется в соответствии с определёнными правилами:

1. Зоны обслуживания каждой межузловой радиостанции представляют собой круговые территориальные образования, радиус которых определяется выполнением требуемого качества обслуживания корреспондентов в зоне доступности;

2. Привязка корреспондентов осуществляется только к одной межузловой радиостанции по критерию минимума дальности связи или максимума мощности принимаемого сигнала;

3. В соответствии с теорией укладки и покрытий, наибольшая плотность укладки кругов в квадрате (без пересечения их границ) достигается, если треугольник, соединяющий центры кругов, равносторонний и круги касаются друг друга [2, 3]. Определение количества межузловых радиостанций должно обеспечить перекрытие района организации устойчивой связи, с выделением резервных станций, с учетом возможности воздействия на них различных внешних причин, которые могут привести к выводу их из строя. Места развертывания межузловых радиостанций в полосе функционирования выбираются с учётом условий местности (поле, пересечённая местность, растительность различной интенсивности, жилые массивы и др.).

В качестве исходных данных примем отдельные характеристики СВЧ радиостанций Р-168-МРА(Д), которые проходят опытную эксплуатацию. Диапазон этих радиостанций - $1,5 \leq f_p \leq 1,75$ ГГц. Расчёт дальности необходимо провести для худших условий распространения волн этого диапазона, т.е. для максимальной частоты $f_p = 1,75$ ГГц. Мощность передающего устройства – 10 Вт, чувствительность приёмника – 8 мкВ. Коэффициент усиления антенны, известной для данного типа радиостанции, составляет $G = 15$ дБ. При расчёте дальности принято условие – между антеннами обеспечивается прямая видимость (в этих условиях качество связи определяется затуханием сигнала в свободном пространстве).

Расчёт производился для двух вариантов радиолиний. В обоих вариантах принята межузловая радиостанция, работающая на направленную антенну, развернутую на мачте высотой 16 м. В первом варианте абонентская станция работает на ненаправленную антенну, развернутую на мачту высотой 12 м. Дальность такой линии может составлять 9–13 км. Второй вариант предполагает работу абонентской станции на ненаправленную антенну на высоте 3,5 м. Дальность связи такой радиолинии составляет 3–6 км.

Для определения количества зон покрытия (для межузловых радиостанций) используем выражение, отражающее зависимость площади единичной зоны и необходимой степени перекрытия [4]:

$$S_{\text{ед.зоны}} = \frac{d \cdot L \cdot M}{n}, \quad (1)$$

где L, M – показатели полосы функционирования в требуемой зоне действия;

d – минимально необходимый коэффициент перекрытия;

n – число единичных зон действия межузловых радиостанций.

Из этого выражения следует:

$$n = \frac{d \cdot L \cdot M}{\pi \cdot R_{\text{ед.зоны}}^2}, \quad (2)$$

где $R_{\text{ед.зоны}}$ – радиус единичной зоны.

Расчёт количества межузловых радиостанций выполнен с учётом динамического состояния абонентов. Поэтому при расчетах радиус единичной зоны покрытия принят 3 км. Кроме этого, необходимо предусмотреть изменения пространственных показателей местности в процессе функционирования сети. Как показывают расчёты, в зависимости от вида деятельности организационно-технической системы, межузловая сеть может включать в среднем от 3 до 5 станций [4].

Особенностью функционирования системы радиосвязи общего пользования в составе управляющего органа является то, что информационная нагрузка во времени распределена неравномерно. Пики нагрузки чаще всего связаны с этапами перемещения, развертывания и функционирования. Если нагрузка выражается с помощью интенсивности потока сообщений, которые необходимо передавать в каждом информационном направлении, то эквивалентная нагрузка, измеряемая количеством пакетов, поступающих в единицу времени, определится следующим образом [5]:

$$Y_p [\text{пак/сек}] = Y_c [\text{сооб/мин}] N [\text{пак/сооб}] \frac{1}{60 [\text{сек/мин}]}, \quad (3)$$

где N – число пакетов в сообщении, Y_p – скорость передачи пакетов, Y_c – скорость передачи сообщений.

Для определения соответствия между величиной нагрузки, задаваемой в эрлангах, и нагрузкой, измеряемой в [пак/с], необходимо рассмотреть операции преобразования сигналов, используемые в IP-телефонии, где для передачи речевых пакетов используется специальный RTP-протокол реального времени.

Известно, что процесс передачи речевого сообщения начинается с преобразования аналогового сигнала в цифровой. Этот процесс, как и обратный, выполняется в так называемых речевых кодеках. Наиболее перспективными являются гибридные кодеки, в которых высокое качество речи сочетается с большой степенью сжатия информации, что позволяет существенно снизить требования к пропускной способности сети радиосвязи общего пользования.

Для определенности будем считать, что при упаковке речи используется гибридный кодек G.729. Для передачи

речевых пакетов используется специальный RTP-протокол, который обеспечивает выдачу пользователю речевых пакетов с одинаковой задержкой, что в свою очередь оказывает существенное влияние на субъективную оценку качества восприятия речи. Основной причиной задержек пакетов является случайность времени передачи пакета при его ретрансляции в каждом маршрутизаторе (коммутаторе) на маршруте доставки. Случайность обусловлена как нестабильностью числа пакетов в очередях, так и разбросом времени передачи по каналу связи.

Так, пакет RTP-протокола имеет свой заголовок длиной 12 байт и поле данных, в которое помещается речевой пакет. Далее производится запись RTP-пакета в поле данных дейтаграммы UDP-протокола. Длина заголовка дейтаграммы составляет 8 байт. Для передачи UDP-дейтаграммы используется IP-протокол межсетевого уровня. Пакет этого протокола имеет заголовок длиной 20 байт. Таким образом, суммарная длина IP-пакета, содержащего информацию о результатах анализа F фреймов речевого сигнала, составляет $L_{IP} = 10F + 42$ байт. В технологии TCP-IP максимальная длина IP-пакета равна 65535 байт. Однако на практике объем пакета устанавливается исходя из размера поля данных кадра канального уровня, в который преобразуется пакет. При этом целесообразно выбирать кадры максимальной длины, имеющие наименьшую относительную избыточность.

Для передачи IP-пакета по сети необходимо выполнить его инкапсуляцию в поле данных того транспортного блока, который используется при переносе информации в смежной подсети (subnet). Таким образом, пакетный трафик IP-телефонии генерируется RTP протоколом. Поэтому при задании нагрузки в эрлангах (Y_3) её соответствующее значение, измеряемое в [пак/сек] вычисляется следующим образом:

$$Y_{II} [\text{пак/сек}] = Y_3 [\text{час/час}] Y_F [\text{байт/сек}] \frac{1}{L_{II} [\text{байт/пак}]}, \quad (4)$$

Скорость формирования кодеком двоичной последовательности определяется длительностью кадра и числом байт оцифрованной информации кадра. Для гибридного кодека G.729 $Y_F = 1000 \text{ байт/сек}$, соответственно:

$$Y_{II} [\text{пак/сек}] = 5,96 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{94} = 64 [\text{пак/сек}] \quad (5)$$

Принимая во внимание технические характеристики СВЧ радиостанций, в сети радиосвязи общего пользования предполагается использование кадров технологии Ethernet, где, в свою очередь, максимальный размер IP-пакета будет составлять 1500 байт.

Объем RTP-пакета (L_n) зависит от длины его заголовка, который составляет 12 байт и объема речевого пакета, формируемого речевым кодеком. Поскольку речевой пакет имеет собственный заголовок длиной 2 байта и поле данных, содержащее информацию о $F=1 \dots 8$ фреймах, каждый из которых кодируется 10 байтами, то

$$L_{II} [\text{байт/пак}] = 12 + 2 + 10F \quad (6)$$

Значение величины F выбирается на основе достижения компромисса между требованиями к канальной скорости и требованиями к задержкам передачи речевого сигнала.

Допустим, средняя нагрузка при передаче данных в системе составляет 3665 Мбит. Следовательно:

$$Y_{II} [\text{пак/сек}] = \frac{V [\text{байт}]}{L_{II} [\text{байт пак}] \cdot 3600 [\text{сек}]} = \frac{458000000}{1526 \cdot 3600} = 83 [\text{пак/сек}] \quad (7)$$

Кадр технологии Ethernet имеет служебную часть, размер которой равен 26 байт, и поле данных объёмом от 46 до 1500 байт. Если размер поля данных максимален, то пропускная способность составляет 813 пак/с при эффективности около 98% [6, 7].

Одной из задач синтеза сети является задача распределения информационных потоков. Сеть СВЧ радиостанций в этом плане имеет немалое преимущество над существующей сетью УКВ и КВ радиостанций, так как скорость передачи информации в данной сети значительно выше, а пропускная способность – больше, что, соответственно, позволяет распределять информационные пакеты в потоке, и использовать поток для нескольких передач одновременно. Соединение каждой межузловой радиостанции с несколькими межузловыми радиостанциями даёт возможность обеспечения передачи пакетов по нескольким маршрутам.

Дана сеть радиосвязи, в которой между некоторой парой межузловых радиостанций i и j имеется k_{ij} маршрутов доставки для передачи в данном информационном направлении потока сообщений суммарной интенсивностью

$$Y_{ij} = \sum_{p=1}^P Y_p. \text{ Поток считается стационарным.}$$

При этом возникают две подзадачи: определение состояния направлений радиосвязи, при котором необходимо начать перераспределение потоков и определение размера доли потока, которая будет направлена по новым путям. Для их решения каждое направление радиосвязи в сети радиосвязи общего пользования можно представить как подсеть, состоящую из двух межузловых радиостанций и двух каналов радиосвязи: первый, обладающий пропускной способностью $C1$, по которому передаются пакеты и второй - с пропускной способностью $C2$, по которому необходимо направить часть пакетов с первого канала радиосвязи. В этом случае постановка задачи по определению состояния направлений радиосвязи, при котором необходимо перераспределение потоков, может быть сформулирована следующим образом: входной поток Y необходимо разделить на два потока λ_1 и λ_2 так, чтобы минимизировать целевую функцию вида [8]:

$$g(\lambda) = g_1(\lambda_1) + g_2(\lambda_2), \quad (8)$$

где $g_i(\lambda_i) = \frac{\lambda_i}{(C_i - \lambda_i)}$, C_i - пропускная способность первого или второго канала радиосвязи. Ограничения

задачи: $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ и $\lambda \leq C_1 + C_2$.

Пропускная способность $C_1 \geq C_2$, так как первоначально весь поток направляется по первому каналу радиосвязи, следовательно, λ_1 должна быть больше, чем λ_2 . В этом случае возможны следующие варианты распределения потоков [9]:

1. $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = 0$.

Эта ситуация имеет место до начала перераспределения потоков, когда

$$\frac{\partial g_1(\lambda)}{\partial \lambda_1} \leq \frac{\partial g_2(0)}{\partial \lambda_2}, \quad (9)$$

$$\text{так как } \frac{\partial g_1(\lambda)}{\partial \lambda_1} = \frac{C_1}{(C_1 - \lambda)^2} \text{ и } \frac{\partial g_2(0)}{\partial \lambda_2} = \frac{1}{C_2}. \quad (10)$$

$$\text{Тогда } \frac{C_1}{(C_1 - \lambda)^2} \leq \frac{1}{C_2}, \text{ откуда } \lambda \leq C_1 - \sqrt{C_1 \cdot C_2}. \quad (11)$$

2. $\lambda_1 > 0$ и $\lambda_2 > 0$. (12)

В этом случае условные длины каналов радиосвязи одинаковы и

$$\frac{\partial g_1(\lambda_1)}{\partial \lambda_1} = \frac{\partial g_2(\lambda_2)}{\partial \lambda_2}, \quad (13)$$

$$\text{или, что аналогично } \frac{C_1}{(C_1 - \lambda_1)^2} = \frac{C_2}{(C_2 - \lambda_2)^2}. \quad (14)$$

Из этого равенства и ограничений определяются λ_1 и λ_2 :

$$\lambda_1 = \frac{\sqrt{C_1}[\lambda - (C_2 - \sqrt{C_1 \cdot C_2})]}{\sqrt{C_1} + \sqrt{C_2}}, \quad (15)$$

$$\lambda_2 = \frac{\sqrt{C_2}[\lambda - (C_1 - \sqrt{C_1 \cdot C_2})]}{\sqrt{C_1} + \sqrt{C_2}}. \quad (16)$$

В случае рассмотрения работы сети радиосвязи общего пользования, когда по каждому каналу радиосвязи передается нагрузка различных пар межузловых радиостанций, необходимо учитывать, какая часть пропускной способности сети радиосвязи общего пользования будет занята для передачи пакетов межузловых радиостанций, отличных от рассматриваемых. Учесть занятость каналов радиосвязи можно при помощи коэффициентов использования каналов радиосвязи $\rho_i = \frac{\lambda_i}{C_i}$, где λ_i - интенсивность поступления пакетов в i -й канал радиосвязи от

других па межузловых радиостанций [3].

Пример распределения потоков с использованием изложенной методики приведён на рисунке 1 [3]:

Использование второго канала радиосвязи и доля передаваемых по нему пакетов зависит от его пропускной способности. Значительное влияние оказывает и степень его использования нагрузкой других межузловых радиостанций. При высоком коэффициенте использования обоих каналов радиосвязи с ростом объёмов поступающей нагрузки отклонение части потока ко второму каналу радиосвязи происходит раньше, а насыщение обоих каналов радиосвязи наступает быстрее [10].

После выбора плана распределения информационных потоков минимальное среднесетевое время доставки вычисляется по формуле [6]:

$$T_{\Pi} = \frac{1}{Y} \sum_{S \in G} \lambda_S T_S = \frac{\lambda}{Y} \sum_{S \in G} \frac{\lambda_S}{\lambda} T_S = L_M \sum_{S \in G} \frac{\lambda_S}{\lambda} T_S, \quad (17)$$

где $T_{л}$ – среднее время передачи пакета, L_{M} – средняя длина маршрута, T_{C} – среднее взвешенное время передачи, Y – входной поток, λ – интенсивность потока. Это выражение позволяет представить среднее время передачи пакета в сети как произведение средней длины маршрута $\left(L_{M} = \frac{\lambda}{Y} \right)$ на среднее время передачи по одному каналу.

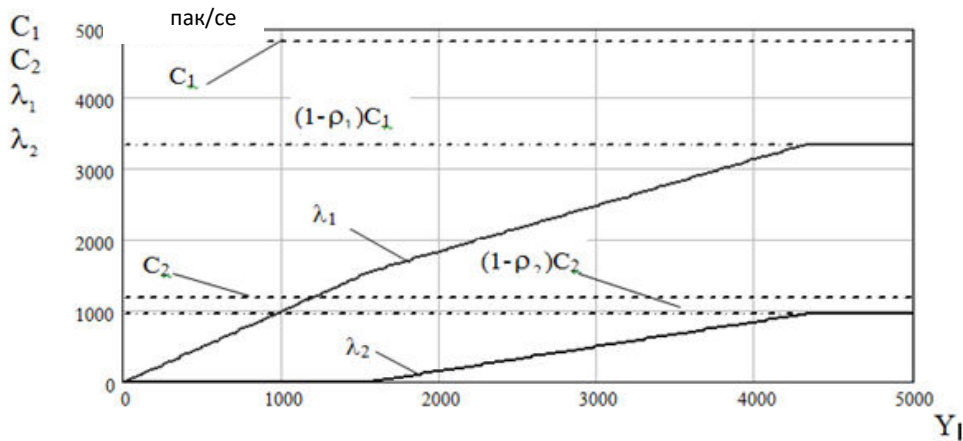


Рис.1. Оптимальное распределение нагрузки по двум каналам с разной пропускной способностью

Кроме того, немаловажным фактором, влияющим как на скорость, так и на качество передачи, являются потери пакетов. Вероятность потери пакетов $P_{рв}$ для трафика реального времени может быть оценена как:

$$P_{рв} = 1 - (1 - P_c) \cdot (1 - P_{дж.бу}) \quad (18)$$

где P_c – вероятность потери пакета в сети, обусловленная ошибками в канале, для радиоканалов составляет 10^{-5} ; $P_{дж.бу}$ – вероятность потери пакета на межузловой радиостанции из-за превышения допустимой задержки (рассматриваются только для трафика реального времени).

Таким образом, соотношение для расчёта $P_{дж.бу}$:

$$P_{дж.бу} = \frac{1-\rho}{1-\rho + \rho \cdot t_{дж\ max}} \cdot \rho \cdot t_{дж\ max} \quad (19)$$

где $t_{дж\ max}$ – размер буфера, ρ – загрузка системы.

А соотношение для расчёта $P_{бу}$:

$$P_{бу} = \frac{1-\rho}{1-\rho N + 1} \cdot \rho^N \quad (20)$$

где N – размер буфера, ρ – загрузка системы.

Допустимым значением вариации времени задержки является 30-50 мс. Для расчёта величина джиттер-буфера была принята 20 мс, величина буферов сетевых узлов - 8 мест.

Учитывая величину вероятности потерь пакета для трафика передачи данных и трафика реального времени без учёта потерь в сети радиосвязи с учётом потерь в зависимости от загрузки системы представленной на рис. 2 [11]:

Для предлагаемых систем организации каналов связи также используем показатели, характеризующие помехозащищённость и помехоустойчивость сети радиосвязи [8].

В качестве обобщённых показателей помехозащищённости и помехоустойчивости сети радиосвязи общего пользования возможно использовать вероятность несанкционированного доступа для вскрытия структуры радиосети и среднее время её вскрытия с целью нарушения функционирования, искажения передаваемых сообщений и т.д.

Для начала рассчитывается вероятность электромагнитной доступности источника радиоизлучения. На первом этапе производится расчет затухания сигнала передатчика в свободном пространстве. На втором этапе производится расчет расстояния прямой видимости для данных высот подъема антенн передатчика и приемника. На третьем этапе вычисляется дополнительное затухание сигнала передатчика на трассе стороннего вмешательства. На следующем этапе рассчитывается мощность сигнала, приведенная ко входу приемника перехватывающего устройства.

После определения вероятности электромагнитной доступности источника радиоизлучения производится расчет частных показателей помехозащищённости – среднего времени вскрытия, вероятности обнаружения источника радиоизлучения. Время вскрытия радиолинии равно максимальному времени, затрачиваемому на вскрытие одного из корреспондентов.

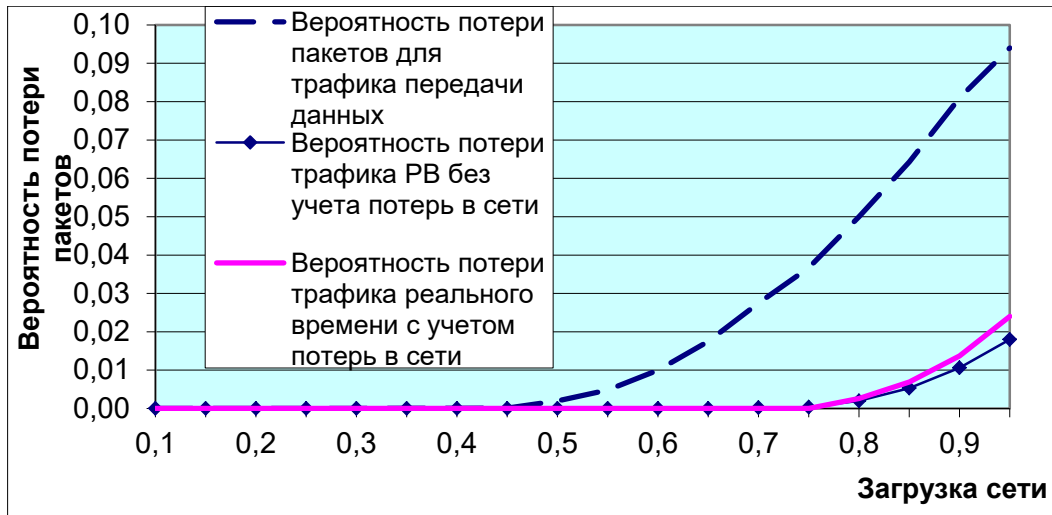


Рис. 2. Величина вероятности потерь пакета для трафика передачи данных и трафика реального времени

Тогда вероятность вскрытия радиолинии или источника радиоизлучения определяется по формуле [12]:

$$P_{\text{вскри}} = P(t_{\text{вскри}} \leq T) = 1 - e^{-\frac{T}{\alpha}}, \quad (21)$$

где $t_{\text{вскри}}$ – время, необходимое для вскрытия.

Для вскрытия сети радиосвязи необходимо вскрыть не менее 80 % составляющих её радиолиний. Сеть радиосвязи общего пользования с использованием СВЧ радиостанций получает преимущество над существующей сетью радиосвязи, так как, фактически, является не однородной, а разбита на отдельные зоны покрытия для каждой межузловой радиостанции. Соответственно, используемые станции обладают меньшей мощностью, и их обнаружение и вскрытие становится сложнее. Таким образом, определены частные и обобщенные показатели помехоустойчивости сети радиосвязи общего пользования. Данная методика дает возможность не только оценить защищенность сети радиосвязи от стороннего вмешательства, но и дать рекомендации по ее повышению.

Рассмотрим ещё один показатель качества представленной сети радиосвязи. Количественной мерой оценки устойчивости отдельных элементов сети радиосвязи общего пользования является вероятность их защищенности, то есть вероятность того, что в случае физического воздействия на них каких-либо природных факторов или технических средств, они сохранят свою работоспособность. Для оценки устойчивости сети радиосвязи надо знать безусловную вероятность продолжения функционирования каждого её элемента [9].

Безусловная вероятность выведения из строя элемента сети радиосвязи общего пользования за время t рассчитывается по формуле [9]:

$$P_{\text{пор}}(t) = P_{\text{пв}}(t) \cdot \left(1 - e^{-\rho^2 \frac{R_{\text{п}}^2}{E^2}} \right), \quad (22)$$

где $P_{\text{пв}}(t)$ - вероятность того, что в течение периода времени t элемент сети радиосвязи общего пользования подвергнется физическому воздействию;

$P_{\text{пор}}$ - условная вероятность поражения элемента сети радиосвязи, которая вычисляется в предположении того, что воздействие физических факторов состоялось [11].

Однако оценка вероятности устойчивости отдельных элементов сети ещё не характеризует структурную защищенность создаваемого варианта сети радиосвязи общего пользования в целом, которая оценивается вероятностью сохранения направления связи между любой парой межузловых радиостанций данной системы своего функционала [13].

Модель расчета показателей защищенности направления связи при последовательном и параллельном соединении составляющих его линий представлена на рис. 3 и 4 [11].

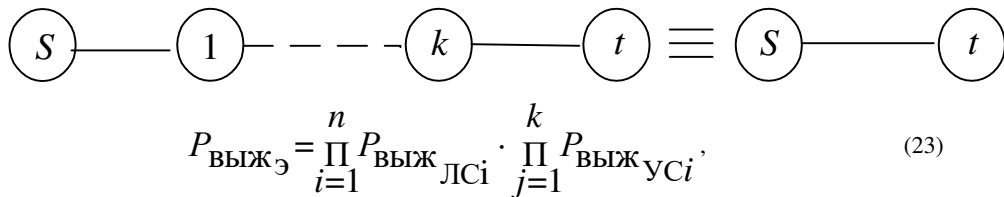
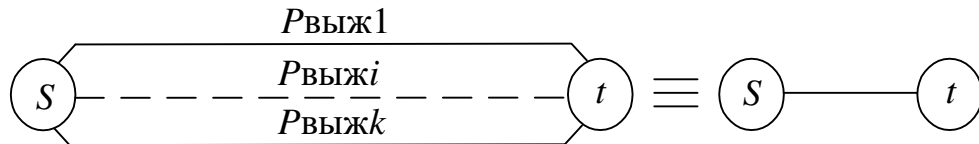


Рис.3. Последовательное соединение линий



$$P_{\text{ВЫЖ}\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{ВЫЖ}i}), \quad (24)$$

Рис. 4. Параллельное соединение линий.

где $P_{\text{ВЫЖ}\Sigma}$ - вероятность сохранения направлением связи функционала. Исходными данными для расчёта вероятностей сохранения направлениями связи функционала являются структура направлений, а также значения параметров устойчивости линий и межузловых радиостанций [13].

Расчет сводится к перемножению вероятностей отказа всех рассматриваемых путей с учетом наличия общих элементов [13]:

$$Q_S = 1 - \prod_{i=1}^{n_S} p_{iS}, \quad (25)$$

Q_S – вероятность отказа пути s ;

p_{iS} – показатель устойчивости i -го элемента, входящего в путь s ;

n_S – число элементов в пути s .

Таким образом, для корректной оценки устойчивости сети радиосвязи общего пользования и составляющих ее элементов, целесообразно применение комплексных, агрегативных методик, позволяющих с допустимой точностью и адекватностью описывать процессы, происходящие в сети при функционировании ее в условиях воздействия потенциально опасных внешних факторов.

При определении топологии сетей радиосвязи обычно используются итеративные способы выбора структуры методом замены ветвей. Однако синтез сети радиосвязи общего пользования методом замены ветвей требует проведения большого числа вычислительных операций. Для упрощения синтеза распределенной структуры сети радиосвязи предлагается представить ее как совокупность абонентских сетей, покрывающих территорию функционирования системы и объединенных между собой межузловыми направлениями радиосвязи. Учитывая, что в сети радиосвязи общего пользования все виды сообщений будут передаваться в единой пакетной форме, целесообразно как внешнюю нагрузку, так и пропускную способность задавать с помощью скорости поступления и передачи пакетов определенного объема в единицу времени. В используемой методике рационального распределения потоков, учитывается не только пропускная способность, но и интенсивность нагрузки, передаваемой по каналам радиосвязи от других межузловых радиостанций. Это позволит более эффективно использовать пропускную способность каналов радиосвязи в сети радиосвязи общего пользования за счет равномерной загрузки используемых каналов. Для вычисления значений выбранных показателей используется математический аппарат, базирующийся на теории вероятностей, теорию массового обслуживания, а также другие методики, разработанные для формирования систем радиосвязи.

Таким образом, можно сформировать, и реализовать сеть радиосвязи общего пользования с использованием СВЧ, которые позволяют:

- сформировать техническую основу системы радиосвязи общего пользования с СВЧ радиостанциями предлагаемой структуры для обеспечения существующих видов связи и требуемых потоков сообщений, передаваемых по радиоканалам, за счёт особенностей оборудования и метода передачи информации;
- повысить скорость передачи данных, защищенность от внешних воздействий и стороннего вмешательства существующей сети радиосвязи за счёт построения распределённой структуры и использования маломощных радиостанций СВЧ диапазона;
- осуществить развертывание и эксплуатацию сети радиосвязи общего пользования с использованием СВЧ радиостанций, при минимальных затратах средств связи и обслуживающего персонала.

Библиографический список

1. Нечипоренко В.И. Структурный анализ и методы построения надежных систем. – М.: Советское радио, 1968. – 255 с.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
3. Методики расчета и оценки полевых систем связи. – Л.: Военная академия связи им. С.М. Будённого, 1985. – 80 с.
4. Камардинов О.Н., Храмов А.А. Программа аналитического расчета и имитационной оценки качества функционирования сетей связи. Свидетельство №52 от 26.12.1997 г. – СПб.: Военная академия связи им. С.М. Будённого, 1997. – 56с.
5. Организация связи в локальных войнах, военных конфликтах и миротворческих операциях. Под ред. Е.А. Карпова. – СПб.: ВУС, 1999. – 124 с.
6. Коршун В. Г. , Макаров М. И. Математическое обеспечение автоматизированной системы экспресс-анализа и синтеза сетей передачи данных. Учеб. пособие. – СПб.:, 2007. – 128 с.
7. Комарович В.Ф. Симонов М.В. Фролов В.Ю. Основы РЭБ, РЭЗ и безопасность связи и АСУ. – Л.:, 1989. – 346 с.
8. Джамалипур А. Беспроводный мобильный Интернет: архитектура, протоколы и сервисы. – М.: Техносфера, 2009. – 496 с.
9. Дудник Б.Я. Надежность и живучесть систем связи. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.
10. Комарович В.Ф., Липатников В.А., Лабунец А.М. Защита систем военной связи от радиоразведки и радиоподавления противника. – Л.: ВАС, 1989. – 248 с.
11. Цвиркун А.Д. Структура сложных систем. М.:Сов.Радио,1975.–200 с.

12. Аверьянов Е.Г., Макаров М.И. Алгоритм распределения приоритетной нагрузки на основе метода девиации потока. // Перспективы развития российской экономики: Межвузовский сборник научных трудов. Вып. № 4 / Под ред. к.в.н., проф. С.А. Зоткина, д.э.н., проф. А.Б. Крутика. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.
13. Шаров А.Н. Автоматизированные сети радиосвязи.–Л.: ВАС,1998.–78 с.

УДК 621.396.96

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Е.С. Мясников

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

При радиолокационном обзоре пространства возможны ситуации, когда объект является групповой целью, т.е. по некоторым параметрам, такие как расстояние между целями и параметры движения не превышают элемента разрешения бортовой радиолокационной станции. Такая ситуация воспринимается как одноцелевая и на экране локатора отображается в виде единого пятна ЭХО-сигнала. Разрешение состоит в выполнении задач обнаружения и измерения параметров произвольной цели при наличии других, кроме выбранной для наблюдения. Говорят о разрешении целей по дальности, угловым координатам, скорости и т.д. Разрешающая способность влияет на полноту сведений о наблюдаемой обстановке при наличии большого числа целей. Количественно разрешающая способность определяется минимальной разницей в координатах, при которой принимается решение о наличии нескольких целей. [1] Таким образом, особенно актуальной проблемой является повышение разрешающей способности для определения количества целей находящихся в таких компактных группах. Стоит отметить, что особо остро стоит вопрос разрешения целей по угловым координатам.

К методам повышения разрешающей способности можно отнести метод на основе «доплеровского заострения луча»; возможность работы бортовой радиолокационной станции в режиме синтезированной апертуры; методы, основанные на использовании траекторного управления наблюдениями и применении процедур современного спектрального анализа. [2-6]

Недостатком разрешения на основе метода ДЗЛ является ограниченная разрешающая способность процедуры БПФ при ограниченной длительности сигнала. Так же серьезным ограничением является то, что в случае активного маневрирования целей при увеличении времени накопления высокоточной частотной селекции препятствует девиация частоты, вызванная вращением линии визирования объектов локации за время накопления.

В режиме синтезированной апертуры имеет место сравнительно высокая разрешающая способность, как по азимуту, так и по углу места, однако для ее достижения необходима очень высокая точность определения угла движения цели $\varphi_{ц}$ и скорости цели $V_{ц}$, что на сегодняшний день является трудной задачей и делает применение РСА по отношению к воздушным целям затруднительным в практически важных ситуациях. [4]

Перспективным направлением улучшения разрешающей способности по углу является использование, так называемого, траекторного управления наблюдениями [7]. Оно основано на переходе от типового разрешения по углу, определяемому шириной диаграммы направленности, к доплеровскому обострению луча, осуществляемому в процессе полета по специальной траектории, обеспечивающей сверхрелеевское разрешение. Возможный вариант использования ДЗЛ для разрешения двух целей приведен на рис. 1. Из которого следует, что имеет место улучшение разрешающей способности при маневре носителя.

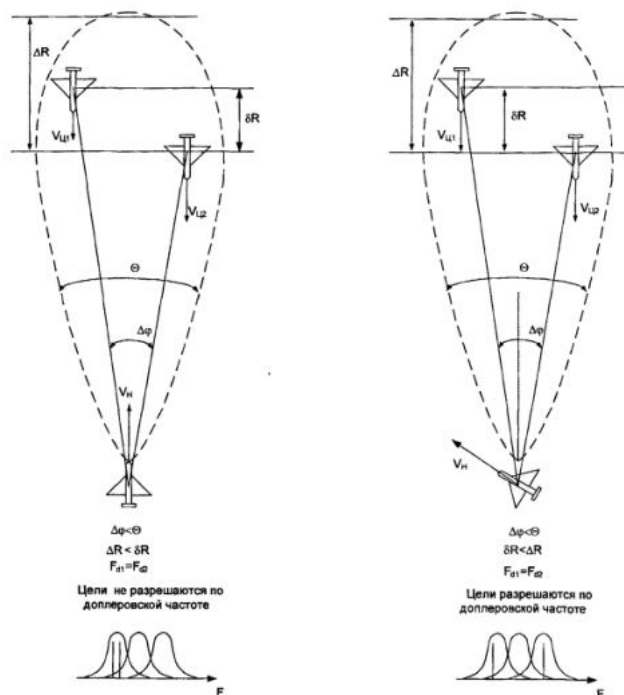


Рис. 1. Использование ДЗЛ для разрешения двух целей

Наибольший интерес вызывают алгоритмы спектрального анализа, обеспечивающие высокое разрешение в условиях ограниченной длительности реализации анализируемого процесса и априорной неопределенности относительно расположения спектральных составляющих. Такие алгоритмы, свободные от недостатков методов,

использующих алгоритмы ДПФ. Этот подход имеет своей главной целью - обеспечение минимальной избыточности выборки анализируемого процесса и применяемого базиса, т.е. использование такого количества отсчетов и базисных функций, которые бы максимально приближались к числу спектральных составляющих анализируемого процесса, независимо от разрешающей способности спектрального анализа.

При таком подходе возникает эффект, получивший название: «эффект сверхразрешения», т. е. разрешения, большего по сравнению с рэлеевским разрешением.

Входной реализацией алгоритма является последовательность временных отсчетов при малом времени накопления. По результатам классификации эхо-сигнала по принципу «групповой - одиночный» принимается решение о переходе в режим разрешения целей в плотной группе. Далее производится компенсация частотной модуляции принятого эхо-сигнала. На следующем шаге временная последовательность подвергается процедуре спектрального анализа, на основе метода прямого-обратного линейного предсказания. По результатам пороговой обработки найденных нулей фильтра линейного предсказания принимается решение о количестве разрешенных целей в группе. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 2.

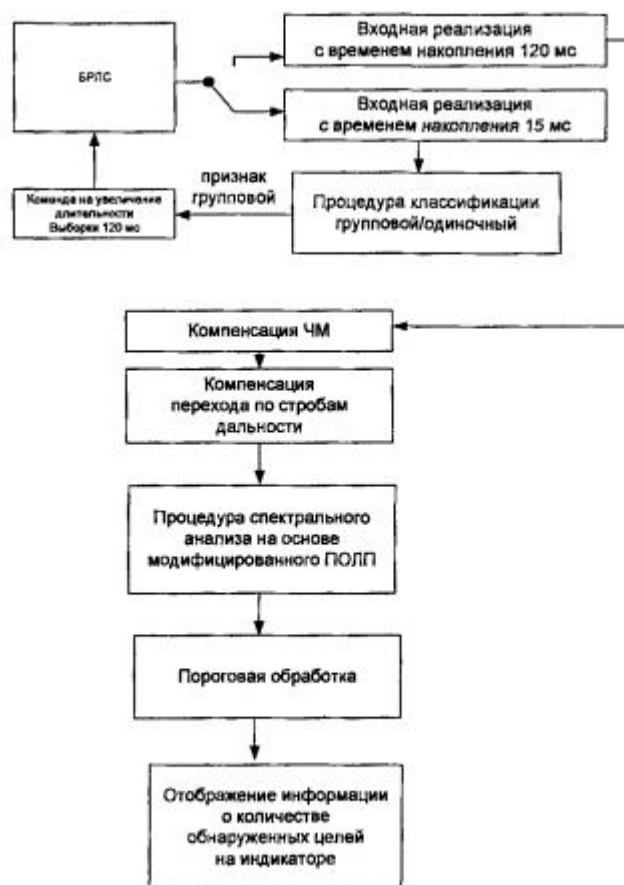


Рис. 2. Структурная схема алгоритма разрешения целей в плотной группе

Исходные параметры:

- Дальность до групповой цели $R_{max} = 100$ км;
- Время накопления $T_0 = 120$ мс;
- Частота повторения импульсов $F_n = 1.5$ кГц;
- Длительность импульса $T_n = 400$ нс;
- Количество импульсов в пачке $N = 180$;
- Длина волны $\lambda = 3$ см;

В результате моделирования алгоритма разрешения целей в группе, состоящей из M летательных аппаратов, были получены графики зависимости вероятности правильного обнаружения количества целей P_t от разности доплеровских частот эхосигналов каждой цели в группе, при различных отношениях сигнал/шум на входе. Под правильным обнаружением здесь понимается верное определение оценки численного состава группы $\hat{M} = M$. Ложная тревога $\hat{M} \neq M$. Приведена сравнительная характеристика его с алгоритмом разрешения, использующим в качестве процедуры спектрального оценивания процедуру БПФ.

На рис. 3 представлены кривые обнаружения в двухцелевой ситуации приема для различных отношений с/ш (кривая 1 - 30 дБ, кривая 2 - 25 дБ, кривая 3 - 20 дБ, кривая 4 - 15 дБ, кривая 5 - 10 дБ). По оси ОХ отложена разность доплеровских частот двух целей по отношению к величине обратной ко времени накопления пачки. Кривая 6 является кривой обнаружения алгоритма селекции целей на основе процедуры БПФ. Здесь под вероятностью правильного обнаружения принимается вероятность принятия решения о наличии двух сигналов в принятой смеси.

Из приведенных на рис. 3 кривых обнаружения видно, что по сравнению с алгоритмами разрешения целей на основе процедуры БПФ, предложенный алгоритм разрешения целей в компактной группе за счет применения в качестве процедуры спектрального анализа метода сверхразрешения, позволяет существенно повысить точность

оценивания числа спектральных составляющих в ЭХО-сигнале отраженном от групповой цели при меньшем частотном разnose.

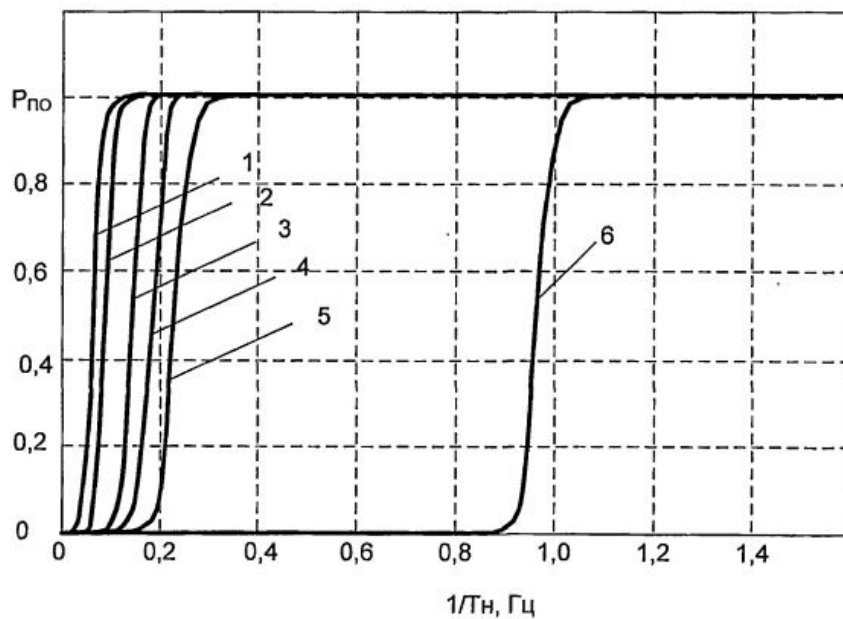


Рис. 3. Кривые обнаружения двух целей

Аналогичные графики для случая трех и четырех целей в группе приведены соответственно на рис. 4 и рис. 5.

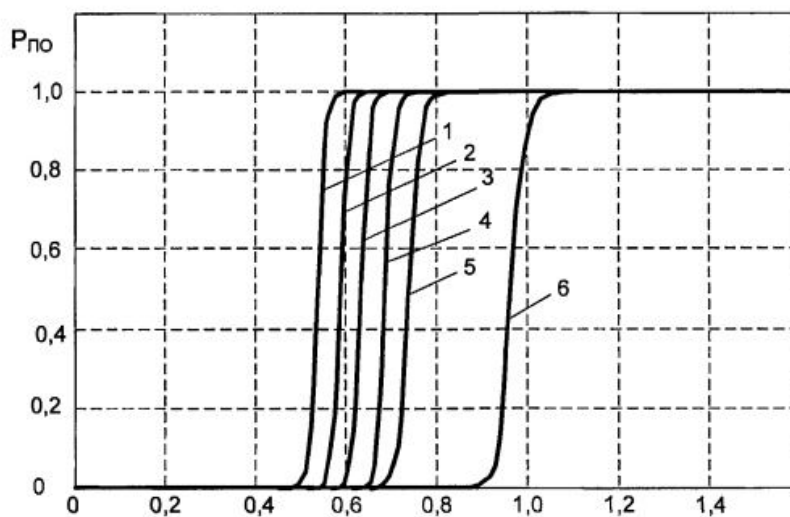


Рис. 4. Кривые обнаружения трех целей

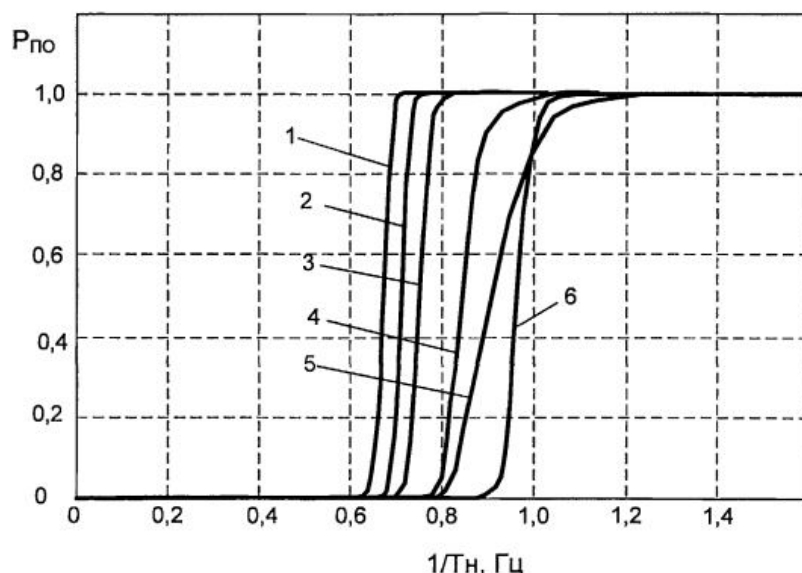


Рис. 5. Кривые обнаружения четырех целей

Из приведенных графиков видно, что по сравнению с алгоритмами частотной селекции воздушных целей на основе процедуры БПФ, предложенный алгоритм разрешения целей в группе за счет применения метода сверхразрешения позволяет значительно повысить разрешающую способность БРЛС при сопровождении компактной группы целей.

Библиографический список

1. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. - М.: Сов. ра-дио, 1970.
2. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. - М.: Радиотехника, 2004.
3. Саблин В.Н. Викулов О.В. Меркулов В.И. Авиационные многопозиционные радиолокационные системы многоканального наведения. Разведывательно - ударные комплексы — Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 1998, №9.
4. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. - М.: Радио и связь, 1988.
5. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983.
6. Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ. М.: Мир, 1990.
7. Жуков М.Н. Лавров А.А. Повышение точности измерения параметров цели с использованием информации о маневре носителя РЛС // Радиотехника - 1995, №11. - С. 67-71.

УДК 621.396.96

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛЕЙ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ОБЗОРЕ

А.П. Загуменный

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

В связи с появлением сверхманевренных и высокоскоростных (гиперзвуковых) целей в настоящее время возникли проблемы в использовании известных методов радиолокационного обзора воздушного пространства, обладающих относительно большим периодом обновления информации, что затрудняет обнаружение и взятие таких целей на сопровождение [1, 2]. Кроме того, малозаметность приводит к обнаружению целей только в ближней зоне действия радиолокационных станций (РЛС), а повышение маневренности – к частому срыву сопровождения.

Бортовые РЛС самолетов нового поколения позволяют проводить обзор пространства с большей скоростью за счет внедрения активных фазированных антенных решеток (АФАР) и использования электронного сканирования, что делает их еще опаснее в сравнении с истребителями предыдущих поколений. В связи с этим актуальна разработка новых методов радиолокационного обзора с целью уменьшения времени обзора воздушного пространства, обнаружения целей и взятия их на сопровождение.

В настоящее время существует большое количество разнообразных методов обзора (так называемых «классических»), таких как строчный, спиральный и другие [3-4], однако, их использование для обнаружения и сопровождения сверхманевренных и гиперзвуковых воздушных целей неэффективно.

Слежение за траекторией цели состоит в последовательной привязке к ней вновь полученных отметок и уточнении ее параметров. При автоматическом слежении за траекторией, которое называется автосопровождением, выполняются следующие операции:

- уточнение параметров траектории в процессе привязки новых отметок;
- экстраполяция параметров на момент следующего измерения;
- стробирование зоны возможного положения новых отметок;
- селекция отметок в стробе.

Перед сопровождением траектории цели ее необходимо обнаружить. Обнаружение траектории – процесс взятия на сопровождение новых целей, попадающих в зону обзора радиолокационного средства.

Обнаружение происходит в два этапа:

1. Этап завязки траектории. Происходит обнаружение новых целей и определение их параметров движения.

2. Этап подтверждения завязанной траектории. На данном этапе требуется отфильтровать ложные отметки, которые не могут описывать движение какой-либо реальной цели.

Фильтрация основывается на том, что ложные отметки не совпадают с отметками от цели, характеризующимися ее параметрами движения и погрешностями измерений. Поэтому, как правило, начатые по ложным отметкам траектории не подтверждаются при следующем обзоре РЛС.

Подтверждение новой траектории производится после проверки соответствия новых отметок текущим траекториям – операции отождествления. Если выясняется, что какая-нибудь из новых отметок не может принадлежать текущим траекториям, то принимается предварительное решение о существовании новой цели и начинается процесс обнаружения ее траектории.

Следует заметить, что процессы обнаружения и сопровождения траекторий выполняются параллельно, поэтому может возникнуть конкуренция за вновь поступающие отметки. Решить данную проблему можно за счет задачи приоритетов траекториям. Тогда, если вновь поступающая отметка может принадлежать и сопровождаемой, и обнаруживаемой траекториям, она будет присваиваться той, у которой выше приоритет.

Распознавание целей используется в том случае, когда новую отметку от цели можно «привязать» к нескольким уже существующим траекториям.

Радарные системы отслеживания во время сканирования производят выборку каждой цели один раз за интервал сканирования и используют сложные фильтры сглаживания и прогнозирования для оценки параметров цели между сканированиями. С этой целью используются фильтр Калмана и альфа-бета-гамма ($\alpha\beta\gamma$) фильтры. Как только конкретная цель обнаружена, радар может передать до нескольких импульсов для проверки параметров цели, прежде чем он установит файл отслеживания для этой цели.

Файл траектории обычно содержит следующую информацию:

- измеренные значения координат цели, доплеровской частоты и амплитуды сигнала, сопровождаемые метками времени;
- сглаженные значения координат и скорости;
- экстраполированные значения координат и скорости на следующий период обзора;
- о надежности траектории (мера качества обнаружения).

После того, как отметка цели ассоциирована с уже сопровождаемой траекторией, происходит обновление этой траектории.

Процесс обнаружения и сопровождения радиолокационной цели наглядно представлен в виде рисунка 1.

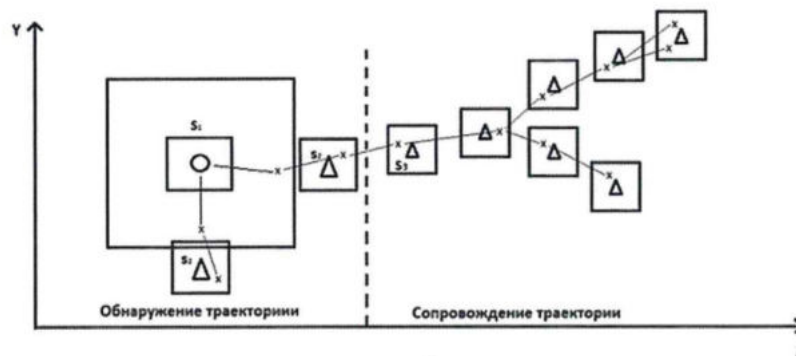


Рисунок 1 – Процесс обнаружения и сопровождения радиолокационной цели

Отслеживание во время сканирования. Современные радиолокационные системы предназначены для выполнения многофункциональных операций, таких как обнаружение, отслеживание и различение. С помощью сложных компьютерных систем многофункциональные радары способны одновременно отслеживать множество целей. В этом случае каждая цель замеряется один раз (в основном дальность и угловое положение) в течение интервала задержки (сканирования). Затем, используя методы сглаживания и прогнозирования, по которым можно оценить будущие выборки. Радиолокационные системы, которые могут выполнять многозадачность и отслеживать несколько целей, известны как радары Track-While-Scan (TWS).

Как только радар TWS обнаруживает новую цель, он инициирует отдельный файл отслеживания для этого обнаружения. Это гарантирует, что последовательные обнаружения от этой цели обрабатываются вместе для оценки будущих параметров цели. Позиция, скорость и ускорение составляют основные компоненты файла трека. Как правило, перед созданием файла трека требуется по крайней мере еще одно обнаружение подтверждения (обнаружение проверки).

В отличие от систем сопровождения одиночных целей, радары TWS должны решить, относится ли каждое обнаружение (наблюдение) к новой цели или к цели, которая была обнаружена в предыдущих сканированиях. И для выполнения этой задачи радарные системы TWS используют алгоритмы корреляции и ассоциации. В процессе корреляции каждое новое обнаружение коррелируется со всеми предыдущими обнаружениями, чтобы избежать создания избыточных треков. Если определенное обнаружение коррелирует с более чем одной дорожкой, то применяется предварительно определенный набор правил ассоциации, чтобы обнаружение было назначено соответствующему треку. Упрощенная блок-схема обработки данных радаров показана на рис. 2.

Выбор подходящей системы координат слежения — первая проблема, с которой должен столкнуться радар TWS. Желательно, чтобы была принята фиксированная привязка инерциальной системы координат. Радарные измерения включают дальность до цели, скорость, углы азимута и места. Из-за неопределенности, связанной с точным положением цели система TWS размещает ворота (диапазон значений, положений) вокруг целевой позиции и пытается отслеживать сигнал внутри этих ворот. Размеры ворот должны быть достаточно большими, чтобы цели не перемещались заметно от сканирования к сканированию; точнее, цели должны оставаться в пределах границ

ворот во время последовательных сканирований. После наблюдения за целью в течение нескольких сканирований размер ворот значительно уменьшается.

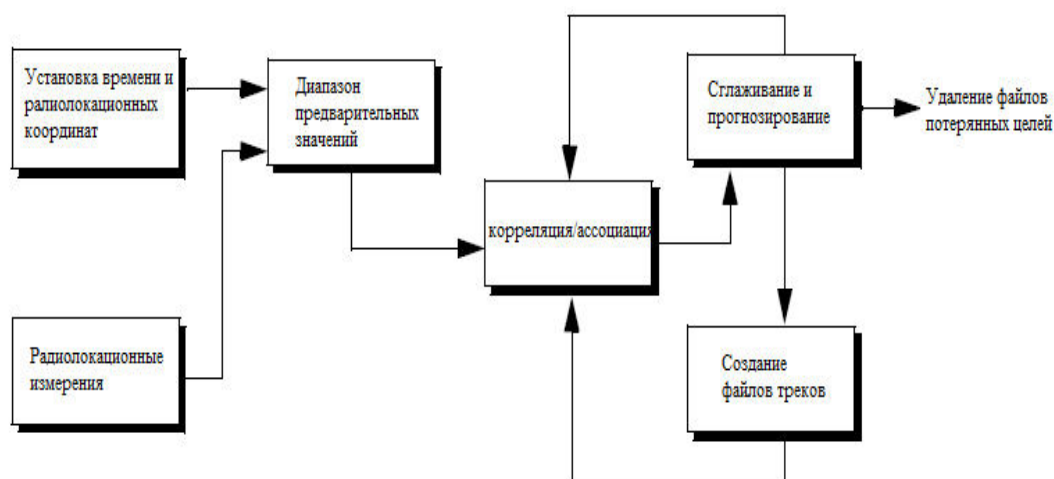


Рисунок 2 – Структурная блок-схема обработки данных TWS.

Стробирование используется, чтобы решить, назначается ли наблюдение существующему файлу трека или новому файлу трека (новое обнаружение). Алгоритмы стробирования обычно основаны на вычислении расстояния статистической ошибки между измеренным и оценочным радиолокационным наблюдением. Для каждого файла трека обычно устанавливается верхняя граница этой ошибки. Если вычисленная разница для определенного радиолокационного наблюдения меньше, чем максимальное расстояние ошибки данного файла трека, тогда наблюдение назначается этому треку.[5]

Все наблюдения, у которых расстояние ошибки меньше максимального расстояния данного трека, коррелируют с этим треком. Для каждого наблюдения, которое не коррелирует ни с одним из существующих треков, соответственно создается новый файл треков. Поскольку новые обнаружения (измерения) сравниваются со всеми существующими файлами треков, файл треков может затем коррелировать с отсутствием наблюдений или с одним или несколькими наблюдениями. Корреляция между наблюдениями и всеми существующими файлами треков определяется с помощью матрицы корреляции. Строки корреляционной матрицы представляют собой радиолокационные наблюдения, а столбцы представляют файлы треков. В случаях, когда несколько наблюдений коррелируют с более чем одним файлом треков, можно использовать набор predetermined правил ассоциации, чтобы одно наблюдение было назначено одному файлу треков.

Библиографический список

1. Антипов В.Н., Меркулов В.И., Самарин О. Ф., Чернов В. С. Основные направления развития авиационных бортовых РЛС / Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 10.
2. Лещенко С.П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей / Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – Т. 8, № 4.
3. Лещенко С.П. Радиолокационное распознавание воздушных объектов по их дальностным портретам с привлечением дополнительных признаков / Наука и техника. – 2020. – № 2(39).
4. Ботов М.И. Б861 Основы теории радиолокационных систем и комплексов учеб. – КрасноярскСиб. федер. ун-т, 2013.
5. Li, G.; Zhang, H.; Tang, G.; Xie, Y. Maneuver modes analysis for hypersonic glide vehicles. In Proceedings of the 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), Yantai, China, 8–10 August 2014.

УДК 629.052.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫ И СИГНАЛА БОРТОВОЙ РЛС НА КАЧЕСТВО РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

А. С. Портнягин, В. А. Сеницын

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

Среди основных направлений мирного использования космической техники особое место занимает перспективная программа исследований Луны и планет Солнечной системы [1]. В отличие от задач, решаемых в околоземном пространстве, выполнение этой программы связано с обеспечением надежной радиосвязи с космическими аппаратами и прецизионного радиоконтроля их траектории на огромных расстояниях.

Основная специфика бортовых радиокомплексов дальних космических аппаратов связана с большим временем распространения радиоволн на межпланетные расстояния, что исключает возможность оперативного управления космическим аппаратом с Земли, особенно в аварийных ситуациях. В результате начали интенсивно развиваться новый класс автономных бортовых радиосистем, способных решать навигационные и научные задачи в дальнем космосе без помощи наземных радиосредств.

Несмотря на то, что Венера – ближайшее к Земле небесное тело (за исключением Луны), являющееся самым ярким объектом на ночном небе, наблюдение за ее поверхностью с Земли абсолютно невозможно, причиной тому служит густая и плотная атмосфера Венеры, непроницаемая для телескопов любого спектра: видимого, УФ и ИК.

Первые советские спускаемые аппараты серии «Венера», осуществлявшие телесъемку венерианского ландшафта, проработали около часа из-за крайне высокой температуры и экстремального давления у поверхности

планеты [2]. Таким образом, изучать Венеру возможно лишь с помощью бортовых средств радиолокации, установленных на ее орбитальном спутнике.

Получение изображений когерентной дальностно-доплеровской РЛС, установленной на таком спутнике, основано на принципе, что сигналы, отраженные различными точками поверхности планеты, имеют разное время запаздывания (момент поступления их на приемное устройство спутника) и разное значение частоты Доплера в соответствии с удаленностью и радиальной составляющей скорости этих точек относительно антенны спутника [1].

Сигналы, находящиеся на расстоянии r от РЛС S , будут запаздывать на одно и то же значение:

$$\tau = 2r/c \quad (1)$$

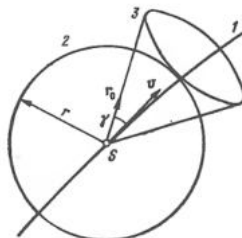


Рис. 1. Поверхности одинакового запаздывания (2) и доплеровского смещения (3) в свободном пространстве при движении спутника по траектории 1

Доплеровский сдвиг частоты определяется проекцией скорости v на направление радиус-вектора r , проведенного в данную точку (рис. 1). Эта скорость одинакова для любого произвольного направления, составляющего с вектором скорости один и тот же угол γ . Поэтому при движении в свободном пространстве доплеровское смещение

$$f_D = -2v_r/\lambda \quad (2)$$

одинаково для всех точек, находящихся на поверхности конуса 3, образующие которого составляют угол γ с вектором скорости. Обе эти поверхности при пересечении с поверхностью планеты образуют линии, форма которых определяется формой отражающей поверхности – ландшафтом Венеры.

Рассмотрим простейший случай, когда поверхность планеты является плоской. Тогда при пересечении с ней поверхности одинакового запаздывания образуют концентрические окружности 2, а поверхности одинакового доплеровского смещения – гиперболы 3 (рис. 2).

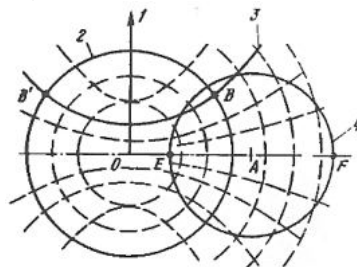


Рис. 2. Линии одинакового запаздывания (2) и доплеровского смещения (3) на плоской поверхности (1 – трасса полета, 0 – подспутниковая точка)

Вместе с тем точки, расположенные симметрично относительно проекции вектора скорости 1, например, B и B' находятся на одинаковом расстоянии от антенны РЛС и имеют одинаковые составляющие скорости. Отраженные ими сигналы можно принять отдельно, «освещая» только одну из частей поверхности относительно трассы 1 при помощи антенны с узкой диаграммой направленности. Для этого космический аппарат ориентируется в пространстве таким образом, чтобы бортовая антенна спутника была отклонена от местной вертикали на некоторый угол.

Детальность полученного радиолокационного изображения определяется пространственной разрешающей способностью радиолокационной системы – минимальным расстоянием между двумя объектами, при котором они все еще различимы друг от друга [3]. Опять же, рассмотрим простейший случай, когда РЛС движется равномерно прямолинейно над плоской поверхностью. Свяжем систему отсчета с антенной S спутника, совместив плоскость xOy с подстилающей поверхностью и направив ось x против движения (рис. 3).

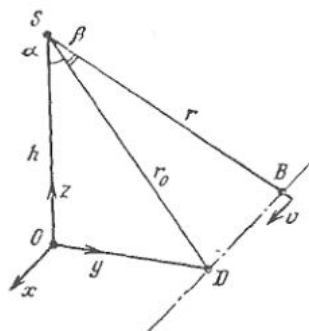


Рис. 3. Трасса некоторой точки B при равномерном прямолинейном движении антенны радиолокатора

Некоторая точка В движется навстречу также равномерно и прямолинейно. Доплеровское смещение частоты у антенны является функцией x :

$$f_D = -2\dot{r}/\lambda = -\frac{2x\dot{x}}{\lambda\sqrt{r_0^2 + x^2}} = -\frac{2vx}{\lambda r} \quad (3)$$

Для нахождения разрешающей способности вдоль трассы полета продифференцируем доплеровское смещение по x и перейдем к конечным приращениям:

$$\Delta_f = \frac{2v}{\lambda} \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right) \frac{\Delta x}{r} \cong \frac{2v\Delta x}{\lambda r_0} \quad (4)$$

Частотное разрешение $\Delta_f = 1/\vartheta$ непосредственно связано с временем когерентного накопления отраженных сигналов ϑ , оно и определяет в конце концов разрешающую способность вдоль трассы:

$$\Delta_x = \frac{\lambda r_0}{2v\vartheta} = \frac{\lambda h}{2v\vartheta \cos \alpha} \quad (5)$$

В направлении, перпендикулярном трассе полета, отраженные сигналы разделяются из-за разного времени запаздывания τ , которое является функцией расстояния y :

$$\tau = \frac{2r}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{h^2 + x^2 + y^2}$$

Дифференцируя τ по y и переходя к конечным приращениям, находим связь между разрешающей способностью в направлении, перпендикулярном трассе (Δ_y), и разрешающей способностью по запаздыванию ($\Delta\tau$), которая обеспечивается параметрами модуляции зондирующего сигнала:

$$\Delta_y = \frac{c\Delta\tau r}{2y} \cong \frac{c\Delta\tau}{2 \sin \alpha}$$

Разрешающая способность по запаздыванию $\Delta\tau$ фиксирована и равна длительности зондирующего импульса [3].

При фиксированном времени когерентного накопления разрешающая способность РЛС в направлении движения оказывается тем выше, чем короче рабочая длина волны, однако предел ее укорочению ставит поглощение электромагнитного излучения атмосферой Венеры. С целью установить границу, после которой начинает активно проявляться поглощение радиоволн в атмосфере Венеры, и та становится непрозрачной, был проведен ряд экспериментов. В первых наблюдениях, осуществленных в дециметровом и метровом диапазоне длин волн, величина отражательной способности Венеры получилась примерно одинаковой – 0,15 [4]. Неожиданным оказалось резкое уменьшение отражательной способности, обнаруженное в середине 1960-х годов американскими исследователями при радиолокации Венеры в сантиметровом диапазоне (рис. 4).

Указанное явление могло быть связано с поглощением радиоволн в атмосфере Венеры, однако проверить это удалось после проведения анализа состава атмосферы, полученного с помощью приборов спускаемых советских аппаратов. В результате проведения анализа было установлено, что уменьшение отражательной способности Венеры вызвано нерезонансным поглощением электромагнитного излучения в углекислом газе, из которого почти целиком состоит ее атмосфера, и парах воды, возникающем в условиях высокого давления (до 90 атмосфер у поверхности Венеры).

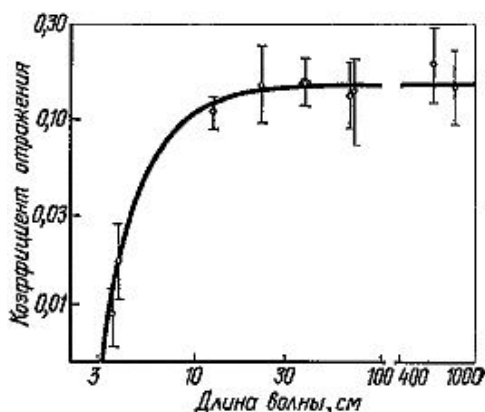


Рис. 4. Зависимость отражательной способности Венеры от длины волны (точки – экспериментальные данные)

По окончании исследования была получена экспериментальная зависимость коэффициента отражения венерианского грунта от длины падающей на него волны. Таким образом, при исследовании атмосферы Венеры для обеспечения высокой отражающей способности вдоль трассы полета спутника наиболее предпочтительным является использование рабочей длины волны 10 см и более. Однако, использование более коротких длин волн также показало высокую эффективность, в частности 8 см.

Установленное на борту спутника устройство обработки выдает радиолокационное изображение в координатах время запаздывания – доплеровское смещение частоты [1]. Протяженность кадра по запаздыванию равна периоду модуляции зондирующего сигнала T_M , а по доплеровскому излучению – $1/T_M$. В случае, если размеры кадра, определяемые шириной главного лепестка диаграммы направленности бортовой антенны, в каких-либо из этих координат превышают значения T_M или $1/T_M$, то происходит наложение соседних кадров друг на друга (рис. 5).

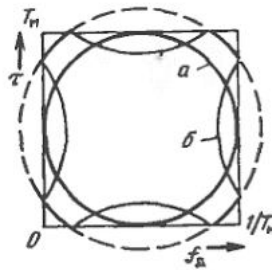


Рис. 5. – Радиолокационное изображение при несогласованности ширины диаграммы направленности бортовой антенны и параметров модуляции зондирующего сигнала без наложений (а) и при их возникновении (б)

Вместе с этим, диаграмма направленности задает освещенность в кадре и обеспечивает подавление помех от участков поверхности Венеры, находящихся вне текущего кадра. Именно поэтому правильный выбор формы диаграммы направленности антенны позволяет получить радиолокационное изображение наилучшего качества.

Контрастность получаемого в ходе радиолокационной съемки изображения определяется тем, насколько сильно изменяется мощность отраженных сигналов для отдельных участков поверхности, имеющих разный наклон к падающему лучу [1]. Мощность отраженных сигналов прямо пропорциональна удельной эффективной площади обратного рассеяния $\sigma(\varphi)$, которая показывает, как она изменяется для участка поверхности единичной площади в зависимости от угла падения φ . Было проведено исследование, целью которого являлось выявление оптимального угла падения радиолуча α на поверхность Венеры (рис. 3), при котором изменение мощности отраженных сигналов от участков поверхности под углами $\pm\alpha$ будет наибольшим. В результате была получена такая зависимость для угла $\alpha = 10^\circ$. Далее эту зависимость можно пересчитать для любой необходимой длины волны. В частности, для упомянутой выше восьмисантиметровой длины волны эта зависимость приведена на рисунке 6.

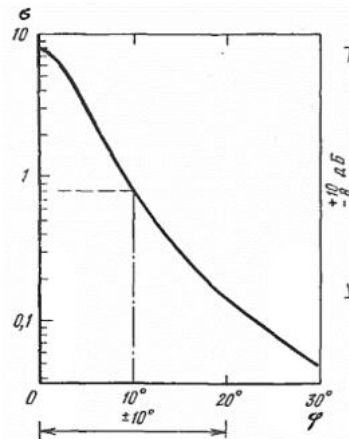


Рис. 6. Удельная эффективная площадь обратного рассеяния поверхности Венеры на волне 8 см по измерениям, выполненным с Земли (поляризация антенны согласована с поляризацией волн, отраженных зеркально)

Отсюда следует, что при приеме на антенну, поляризация которой согласована с поляризацией зеркально отраженных волн, вначале мощность отраженных сигналов зависит от угла φ очень резко и изменение его на 1° приводит к изменению мощности на 1 дБ (в 1,26 раза). Следовательно, контрасты (разность в яркости) между отдельными элементами поверхности могут достигать $10 + 8 = 18$ дБ, т.е. $10 * 6,3 = 63$ раз, при разнице в угле падения на них радиолуча в 20° . Важно отметить, что ввиду отсутствия у Венеры заметного магнитного поля при передаче и приеме сигналов возможно использование линейной (горизонтальной) поляризации антенн, не опасаясь возникновения поляризационных помех при прохождении радиоволн через ее ионосферу.

Контрастность различных элементов поверхности различается также в зависимости от их положения в кадре радиолокационного изображения. На рисунке 7 показано распределение мощности отраженного сигнала в центральном сечении кадра по оси времени (в вертикальном сечении диаграммы направленности антенны). Если считать, что все элементы поверхности в пределах кадра имеют одинаковую отражательную способность, то распределение мощности отраженного сигнала определяется квадратом (сигнал проходит через антенну дважды) коэффициента направленности антенны по мощности $F(\theta)$. Яркость элементов поверхности будет однозначно воспроизводиться в области θ (точки 1-2), что соответствует длительности кадра по оси времени – одному периоду T_M . При этом, участки поверхности, находящиеся вне области θ будут создавать помехи, за счет наложения на соседние кадры (рис. 5). Аналогичные рассуждения применимы и к горизонтальному сечению диаграммы направленности антенны бортовой РЛС.

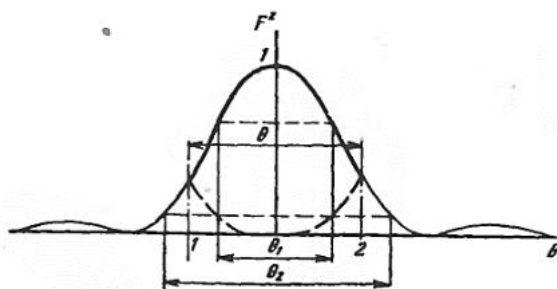


Рис. 7. Распределение мощности отраженного сигнала и помехи, создаваемой участками поверхности вне кадра, в центральном сечении кадра радиолокационного изображения (1, 2 – границы кадра)

Таким образом, подчеркивается важность согласования ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны с продолжительностью кадра по величинам T_M (вертикальное сечение диаграммы направленности) и $1/T_M$ (горизонтальное сечение диаграммы направленности), а также уменьшения первого бокового лепестка. Правильный выбор формы диаграммы направленности антенны определяет, в конечном счете, качество получаемого радиолокационного изображения.

Форма диаграммы направленности зависит, главным образом, от формы зеркала и распределения токов в его раскрыве. Рассмотрим случай облучения параболической антенны элементарным электрическим вибратором с плоским рефлектором [5]. В таком случае, необходима теоретическая оценка напряженности поля на поверхности параболоида. Данную операцию можно осуществить при помощи функций Бесселя $J(x)$ первого рода нулевого порядка. На рисунке 8 приведены рассчитанные зависимости ширины диаграммы направленности антенны от различных соотношений между радиусом ее раскрыва R_0 и фокусным расстоянием f . В оценках принималось, что ось вибратора параллельна поперечной оси зеркала.

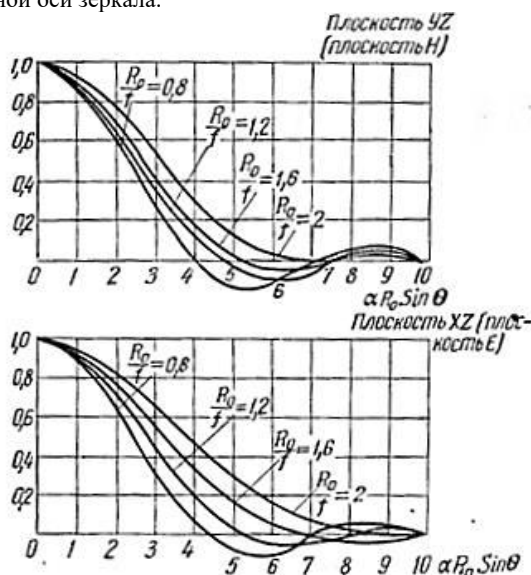


Рис. 8. Диаграммы направленности параболической антенны в плоскостях E (вертикальное сечение) и H (горизонтальное сечение) [5]

Из приведенных зависимостей следует, что уменьшение отношения R_0/f приводит к сужению главного и увеличению первого бокового лепестка диаграммы направленности, за счёт увеличения равномерности облучения параболоида. На графике боковым лепесткам соответствуют области, когда функции Бесселя уходят в четвертую координатную четверть (первый боковой лепесток) и затем возвращаются обратно (второй боковой лепесток) и так далее. Стоит обратить внимание, что в пределе при $R_0/f \rightarrow 0$ амплитуда тока по всей поверхности параболической антенны становится одинаковой, и тогда напряженность тока на поверхности параболоида будет описываться выражением:

$$E = J_1(\alpha R_0 \sin \theta) / \sin \theta, \text{ где } \alpha = 2\pi/\lambda \quad (3)$$

Таким образом, во избежание наложений боковых лепестков диаграммы направленности на соседние кадры изображения ширина диаграммы направленности антенны должна быть строго согласована с периодом модуляции T_M сигналов.

Библиографический список

1. Радиосистемы межпланетных космических аппаратов / П.В. Бакитко, М.Б. Васильев, А.С. Виницкий и др.; Под ред. А.С. Виницкого. – М.: Радио и связь, 1993. – 328 стр.: ил. – ISBN 5-256-01054-9.
2. Венера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B0>, свободный
3. Богомолов А.Ф., Жерихин Н.В., Соколов Г.А. «Венера-15» и «Венера-16»: радиолокатор с синтезированной апертурой на орбите ИСВ // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика.- 1985.

4. Ржига О. Н. Новая эпоха в исследовании Венеры (Радиолокационная съемка с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»). – М.: Знание, 1988. – 64 с, ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 3). 11 к.
5. Айзенберг Г. З. Антенны ультракоротких волн. – М.: Связьиздат, 1957. – 700 с.

УДК 53.082.531

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В МЕДИЦИНЕ И СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

О.А. Терешенкова^{1,2}, А.А. Ким^{1,2}

¹. Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

². АО «Лазерные системы»

В современном мире лазерное воздействие находит множество различных применений от телекоммуникаций до медицины и металлообработки. Являясь мощным инструментом воздействия (лазерная резка, абляция, плавление, нагрев или структуризация поверхности, испарение и т.д.), технологии лазерной обработки нуждаются в эффективных методах непосредственной оценки величины оказанного эффекта. Обычно эта задача не представляет трудности при возможности непосредственного визуального контроля области воздействия, однако в случаях, когда воздействующее лазерное излучение находится вне зоны прямой видимости или подводится к месту воздействия с помощью оптического волокна, контроль достижения необходимого результата прямыми визуальными методами невозможен или недостаточен. К таким применениям можно отнести, например, контроль протекания реакций в биореакторе или локальное лазерное плавление или резку в труднодоступных местах сложных механизмов без их полной разборки. В медицине лазерное воздействие используется в различных эндоскопических операциях, в ходе которых полностью отсутствует возможность визуального контроля результатов оказываемого воздействия, а существующие методы контроля не обладают достаточно быстрыми обратными связями. Оценку результатов воздействия в этих и многих других случаях можно производить с помощью динамической оценки оптических спектральных характеристик объекта, подвергающегося воздействию. Отличительная особенность метода заключается в том, что для подведения лазерного излучения и снятия спектральной характеристики поверхности может быть использован один световод.

Реализация предлагаемого метода основана на непрерывной регистрации спектрометром широкополосного обратно отраженного излучения от области воздействия. Широкополосное излучение подсветки доставляется к области воздействия по тому же оптическому световоду, что и воздействующее лазерное излучение. Отраженное от области воздействия излучение через оптическую систему спектрального разделения попадает в спектрометр. Ранее уже были проведены эксперименты, которые подтверждают работоспособность и эффективность предлагаемого метода [1]. Для эффективной работы предложенного метода была разработана оптическая система спектрального разделения, за счет которой осуществляется отсечение лазерного излучения, отраженного от поверхности объекта, что обеспечивает отсутствие засветки приемника спектрометра. Прототип системы, осуществляющий предложенный метод, представлен на рисунке 1.

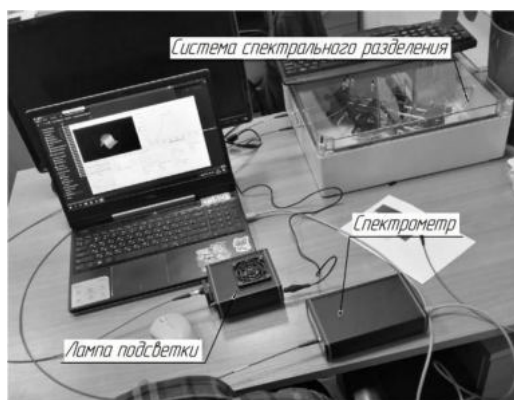


Рисунок 1. Прототип системы, осуществляющей предложенный метод

Кроме того, было разработано специализированное программное обеспечение (ПО) для спектрометра, которое позволяет визуализировать и записывать спектральные характеристики в течение требуемого временного интервала, воспроизводить записанные данные и визуализировать спектральные характеристики в виде трехмерной функции. Также ПО позволяет производить нормировку спектральных характеристик относительно выбранного начального спектра. На разработанное ПО было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022611677 [2].

В рамках этого исследования была проведена серия экспериментов, направленных на оценку цветов побезжалости стали после локального лазерного воздействия. В рамках эксперимента исследовались области, представленные на рисунке 2, а). На рисунке представлен переход от голубого цвета к фиолетовому цвету. Температуры, которым соответствуют данные цвета побезжалости, а также направление движения волокна вдоль исследуемого образца в ходе записи показаны на рисунке 2, а) [3]. В результате измерений была получена спектральная характеристика при перемещении оптического волокна от голубой области исследуемого образца до фиолетовой области. Спектральная характеристика нормировалась на участок голубой области. Записанная трехмерная спектральная характеристика представлена на рисунке 2, б).

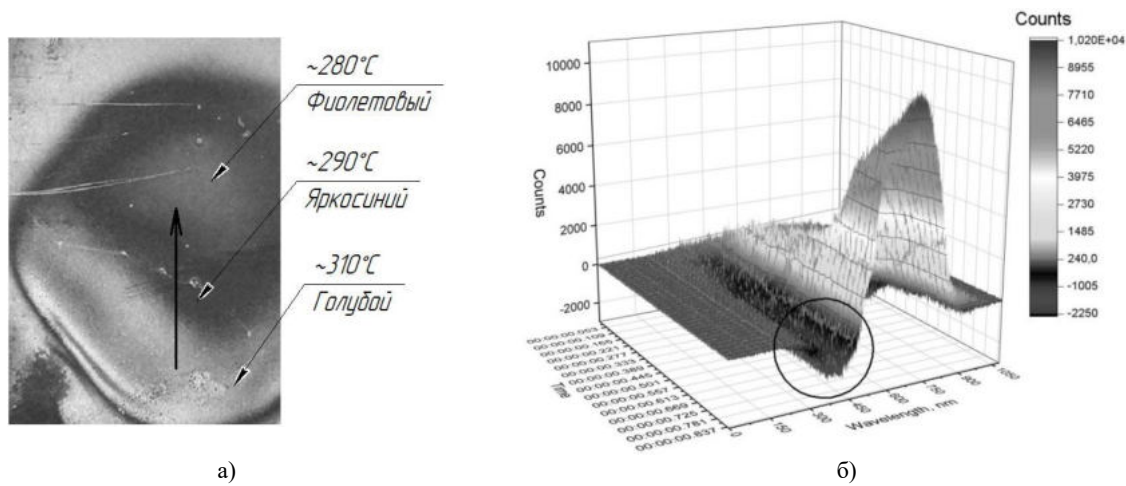


Рисунок 2. Материалы эксперимента: а) исследуемый образец; б) полученная спектральная характеристика

По полученному графику явно отслеживается изменение интенсивности регистрируемого обратно отраженного широкополосного излучения лампы подсветки, а также изменение спектральной составляющей излучения в области 380-400нм соответствующей фиолетовому цвету, которое отмечено на спектральной характеристике.

Также были проведены исследования по регистрации изменений спектральных характеристик белка под воздействием лазерного излучения. В ходе экспериментов использовалась мощность излучения 2-5Вт, с длительностями воздействия до 45 секунд. Во время экспериментов производилась запись спектральных характеристик для отслеживания изменений поверхности исследуемого образца. Одна из полученных трехмерных спектральных характеристик показана на рисунке 3.

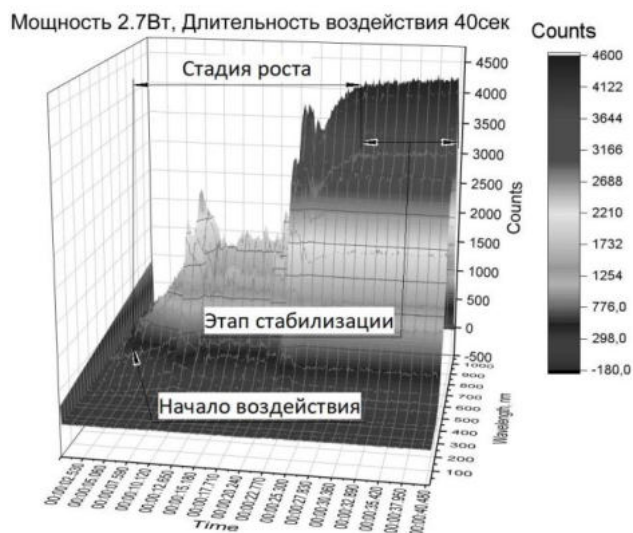


Рисунок 3. Спектральная характеристика при воздействии лазерным излучением мощностью 2,8Вт и длительностью воздействия 40 секунд.

По спектральной характеристике, записанной в ходе лазерного воздействия на образец мышечной ткани, также прослеживается изменение интенсивности регистрируемого излучения и наблюдается характерная динамика изменения спектральной характеристики. Рост интенсивности сигнала после начала лазерного воздействия обуславливается коагуляцией белков и постепенным осветлением образца, на этапе стабилизации происходит распространение области термокоагуляции вглубь образца по мере его постепенного прогревания излучением. Изменение спектральной функции по амплитуде и форме дает информацию о процессах, протекающих в области воздействия лазерного излучения.

Результаты проведенных экспериментов подтвердили потенциал использования метода для непрерывного контроля изменений поверхности, вызванных лазерным воздействием, а также показали значительные изменения спектральных характеристик объектов подвергшихся воздействию. Достигнутые результаты показывают, что предлагаемый метод обладает достаточной чувствительностью и быстродействием (регистрация данных производится не реже чем каждые 120мс), а также имеет перспективу развития более точной оценки результатов воздействия на основе спектральных изменений поверхности, подвергающейся воздействию. В данный момент мы работаем над новыми экспериментами в одной из областей возможного применения данного метода.

Результаты, приведенные в данной статье, являются частью магистерской выпускной квалификационной работы, также проекта в рамках граната Фонда Содействия Инновациям по программе «УМНИК.Хэлснет-НТИ» по договору №16517ГУ/2021.

Библиографический список

1. Терешенкова О.А. Разработка обратной связи системы технического зрения на основе анализа динамики спектральных характеристик объекта, подвергающегося лазерному воздействию [Текст] / О.А. Терешенкова, И.А. Богдановский, А.А. Ким // Молодежь. Техника. Космос: труды тринадцатой общерос. молодежн. науч.-техн. конф. Т.2 / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб, 2021. С.131-136.
2. Терешенкова О.А., Ким А.А., Богдановский И.А. Программа для записи и обработки оптических спектральных характеристик в масштабе реального времени. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022611677, 31.01.2022 г.
3. Журавлев В. Н., Николаева О. И. Машиностроительные стали. Справочник. Изд. 3-е — М.: Машиностроение, 1981. 391 с

УДК 629.7.05

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Снетков А.Д., Гаврилов В.В.

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

В настоящее время успешно развивается направление, связанное со стабилизацией объектов в пространстве. Задача стабилизации объектов в пространстве является одной из первых практических задач, которая послужила стимулом для развития гиростабилизаторов. Использование данных систем обосновывается необходимостью стабилизации объектов по определенным правилам. Поэтому, гиростабилизаторы широко используются в различных отраслях в таких, как системы управления ракетами, космическими кораблями, орбитальными станциями, самолётами, морскими судами, подводными лодками [1]. Для корректной работы алгоритмов стабилизации необходимо правильно задать управление стабилизатором, учитывая все внешние воздействия.

Существует много вариантов стабилизации [2]:

- стабилизация относительно заданной плоскости;
- стабилизация относительно истинного горизонта;
- стабилизация относительно магнитного поля земли (гироскомпас);
- стабилизация относительно движущейся точки в пространстве.

Помимо этого, для стабилизации в сложных или необычных условиях, увеличивается трудоемкость обработки возмущающих воздействий. Для качественного обучения студентов этим методам стабилизации необходимо использовать лабораторный стенд на современной элементной базе.

Лабораторный стенд состоит из следующих элементов:

- корпус гиростабилизированной платформы;
- сервоприводы;
- печатные платы с МЭМС (микроэлектромеханические системы) датчиками;
- комплекс NI Elvis II, подключенный к компьютеру;
- соединительные провода.

Рассмотрим каждый элемент подробнее.

Корпус гиростабилизированной платформы состоит из двух металлических дисков диаметром 12 сантиметров, которые расположены друг над другом. На нижнем диске расположены крепежные отверстия для крепления сервопривода, 3 ножки и плата для подключения ленточного кабеля. Нижний диск представлен на рис. 1. На верхнем диске расположены крепежные отверстия для крепления кронштейна сервопривода и плата для подключения датчиков. Диски соединяются между собой с помощью сервопривода – корпус сервопривода крепится к нижнему диску, а ротор сервопривода к верхнему. Верхний диск представлен на рис. 2.

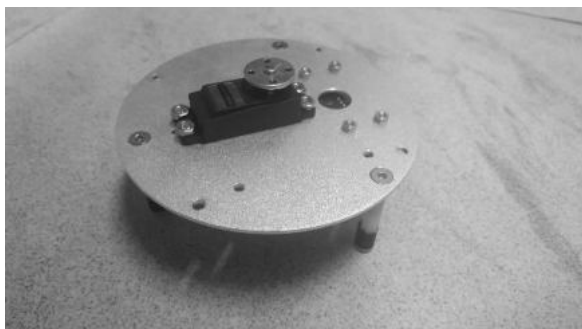


Рис 1. Нижний диск

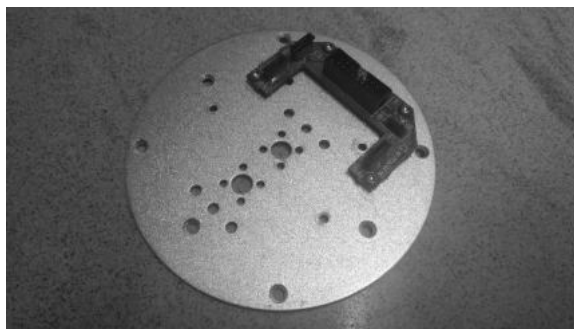


Рис 2. Верхний диск

Лабораторный стенд имеет два сервопривода. К нижнему диску крепится сервопривод непрерывного вращения TD-8120MG. К ротору сервопривода крепится верхний диск корпуса. На верхнем диске к кронштейну крепится сервопривод RDS3225.

Лабораторный стенд имеет шесть печатных плат:

- печатная плата с пирозлектрическим датчиком;
- плата с гироскопическим датчиком;
- плата с датчиком Холла;
- плата для подключения датчиков и верхнего сервопривода к ленточному проводу;
- плата для подключения нижнего сервопривода к ленточному проводу;
- плата с выводом всех контактов для подключения к комплексу NI Elvis II.

На плате с пирозлектрическим датчиком расположен пирозлектрический датчик MLX90614 (рис. 3). Эта плата закреплена на кронштейне поворотного сервопривода. На плате с датчиком Холла установлен датчик ADS5600 (рис. 4). Эта плата закреплена на кронштейне крепления верхнего сервопривода, а магнит, относительно которого идет измерение сигнала, закреплён на подвижной части кронштейна сервопривода. На плате с гироскопическим датчиком установлен датчик LY3200 (рис. 5).



Рис 3. Пирозлектрический датчик

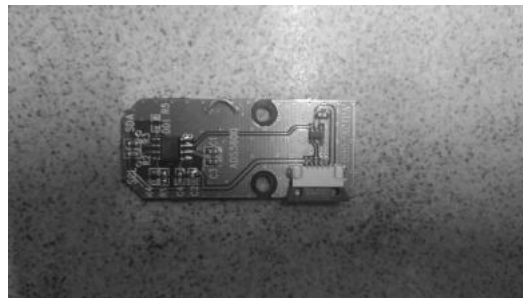


Рис 4. Датчик Холла

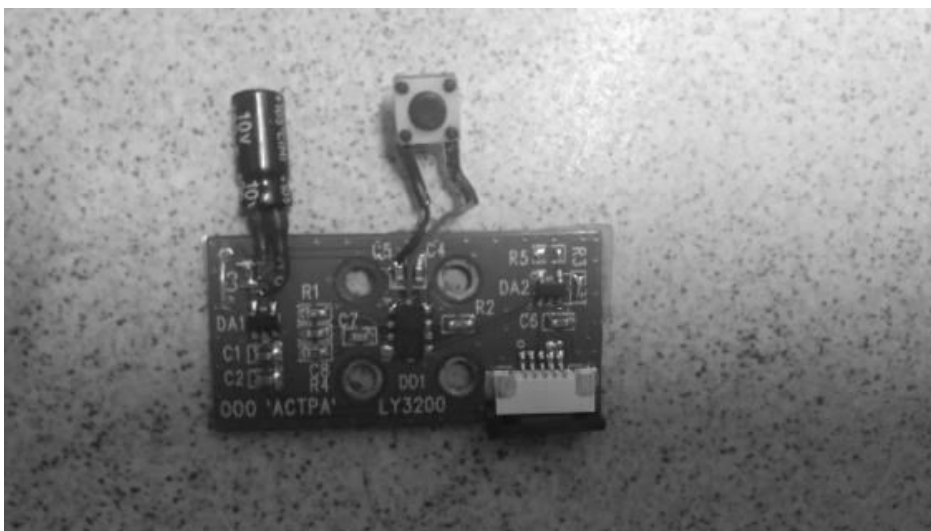


Рис 5. Гироскопический датчик

Гиростабилизированная платформа в сборе представлена на рис. 6.

Лабораторный комплекс NI Elvis II представляет программно-аппаратный комплекс, предназначенный для проведения лабораторных работ по общетехническим и специальным дисциплинам. Объединение аппаратных средств и программного обеспечения, созданного в среде LabVIEW делает NI Elvis II мощной и гибкой контрольно-измерительной платформой [3].

Аппаратная часть комплекса, представленная на рис. 7, включает:

- настольную рабочую станцию;
- источник питания;
- монтажную панель;
- плату сбора данных;
- USB кабель для связи с компьютером;
- персональный компьютер с установленным программным обеспечением NI ELVISmx.

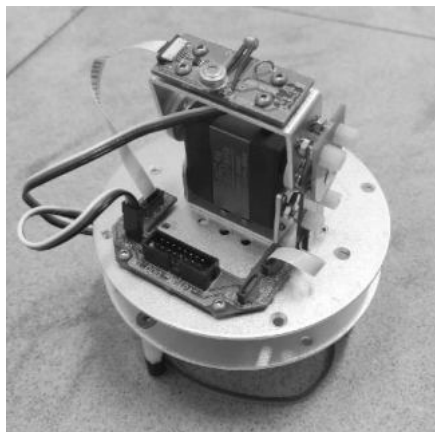


Рис 6. Платформа в сборе



Рис 7. Аппаратная часть комплекса NI Elvis II

Разберём пример выполнения лабораторной работы с использованием стенда.

Целью данной лабораторной работы является написание программы управления сервоприводами лабораторного стенда.

Сервоприводы управляются с помощью сигнала с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) с частотой 50 Гц. Сквозность при этом составляет от 0.5 до 2.5 мс. Эти значения соответствуют крайним положениям сервопривода. При сквозности 1.5 мс ротор находится в среднем положении диапазона изменения угла. Сигнал формируется с помощью инструмента NI ELVISmx Arbitrary Waveform Generator и подается на выходы стенда NI Elvis II AO1 и AO2, которые соединяются с выводами сервоприводов.

Рассмотрим процесс написания программы поэтапно.

1. Создание элементов управления.

Необходимо разместить на лицевой панели два элемента типа Dial и задать им диапазон изменений такой же, как и диапазон изменения угла наклона у сервоприводов – от 0 до 180 и от 0 до 270. Эти элементы будут задавать угол наклона сервоприводов (рис. 8).

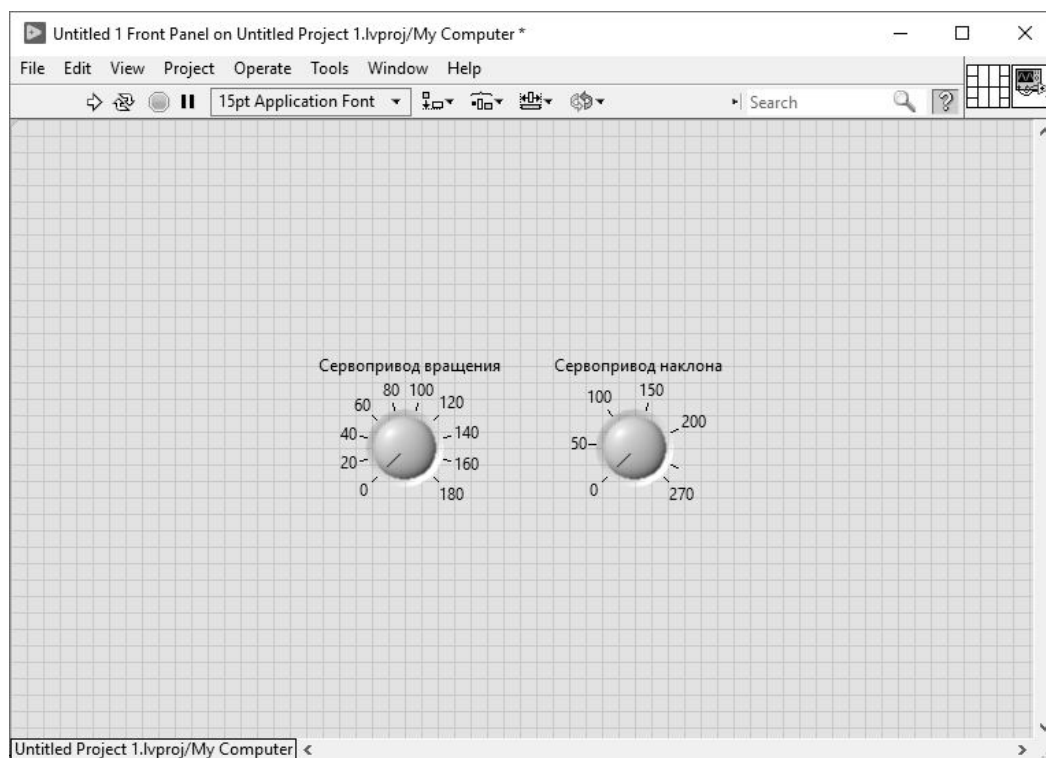


Рис 8. Элементы управления сервоприводами

2. Преобразование угла наклона в сквозность.

Сервоприводы управляются сквозностью входного ШИМ сигнала. Сквозность 2.5% соответствует минимальному углу наклона, а сквозность 12.5% соответствует максимальному углу наклона.

Формула для преобразования угла поворота сервопривода вращения в сквозность представляется в виде:

$$y = 2.5 + \frac{x}{18} \quad (1)$$

Формула для преобразования угла поворота сервопривода наклона в сквозность выглядит следующим образом:

$$y = 2.5 + \frac{x}{27} \quad (2)$$

3. Формирование ШИМ сигнала.

ШИМ сигнал формируется с помощью элемента Simulate Signal. После размещения элемента на диаграмме следует задать ему следующие параметры генерации сигнала:

- тип сигнала – Square;
- частота – 50 Гц;
- амплитуда – 2.5;
- сдвиг – 2.5.

4. Подача сформированных сигналов на генератор сигналов.

Генератор сигналов управляется с помощью элемента NI ELVISmx Arbitrary Waveform Generator. В параметрах этого элемента следует задать тип выходных сигналов и имена выходов сигналов. К генератору необходимо подключить сигналы, сформированные в предыдущем пункте. Также, для непрерывной работы программы необходимо поместить все элементы программы в бесконечный цикл while.

Готовая программа представлена на рис. 9.

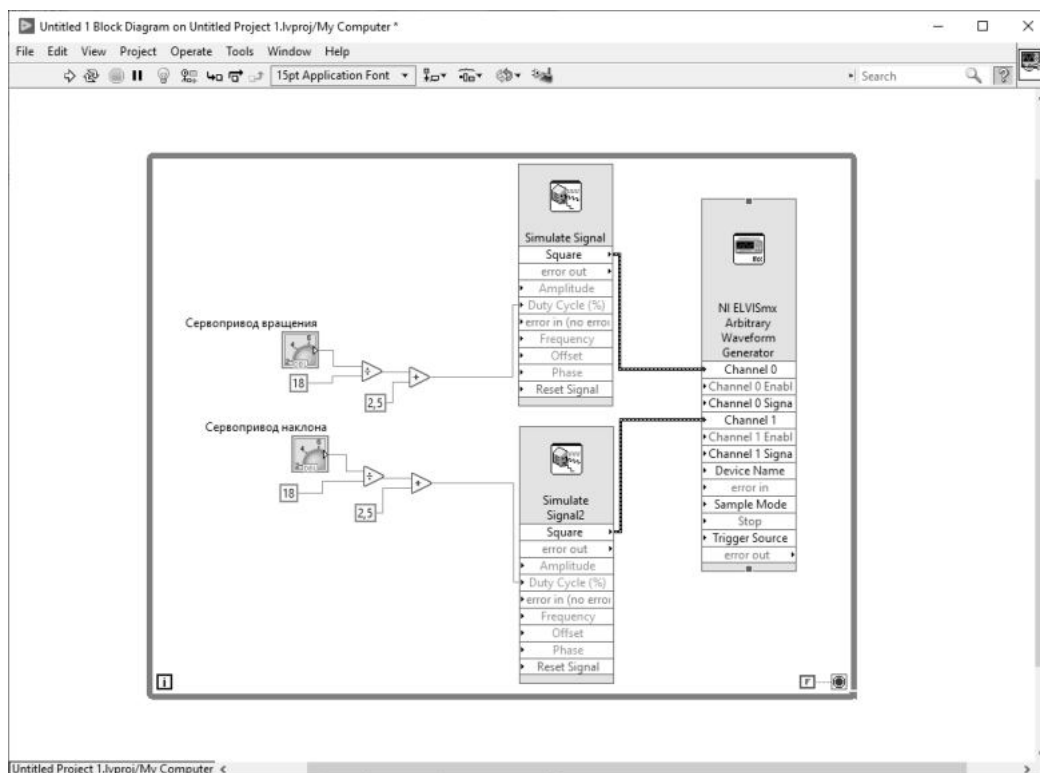


Рис 9. Программа управления сервоприводами

Заключение. Таким образом, рассмотренный в статье лабораторный стенд позволит обучать студентов БГТУ "Военмех" различным методам стабилизации наглядно. Преимуществом также является то, что стенд выполнен на современной элементной базе и не требует специальных навыков программирования. Кроме того, данный стенд может быть доработан, что позволит включить в учебный курс студентов новые прикладные лабораторные работы.

Библиографический список

1. Хамидуллин В. К. Технические средства навигации и управления движением. СПб.: БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2019. 142 с.
2. Распопов В.Я. Теория гироскопических систем. Гиросtabilизаторы. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 388 с.
3. Джеффри Тревис. Lab VIEW для всех / Пер. с англ. Клушин Н. А. ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. 544 с.

УДК 621.391.63:681.78

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТРА ПРИЕМНОГО ТЕЛЕСКОПА ТЕРМИНАЛА ЛАЗЕРНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

О. К. Иванов

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

На сегодняшний день с помощью спутников уже запущены системы ГЛОНАС, GPS, составлены точнейшие карты местности, а также осуществлен доступ к голосовой связи и сети интернет в отдаленных уголках планеты. На этом диапазон возможностей их применения не заканчивается. Одним из самых перспективных и сложных направлений развития коммуникационных технологий является лазерная космическая связь.

Как в космических миссиях появляются новые изобретения и технологии, способные собирать больше информации, чем прежде, так и на Земле наравне с качеством растут объемы передаваемых сведений. Это приводит к необходимости развития новых способов обмена данными, которые должны обладать высокой скоростью передачи информации и обеспечивать безопасность канала связи. Поэтому на смену традиционной радиосвязи приходит лазерная связь, также известная как оптическая связь.

Лазерные системы связи подходят для космических миссий благодаря ряду преимуществ, таких как меньшие объемы, мощность и вес. Меньшая мощность способствует оптимизации электропотребления космических систем, а меньшие габариты позволяют освободить больше места для научных приборов. Кроме того, расход топлива для управления положением спутника в пространстве при быстрой переориентации антенн меньше для оптических антенн. Технология оптической связи может позволить собирать больше научных данных и исследовать Вселенную дальше, чем когда-либо прежде.

Оптическая линия связи включает в себя три основных компонента: передатчик, канал передачи в свободном пространстве (среда, в которой распространяется излучение) и приемник для обработки принятого сигнала. Передатчиком служит мощный полупроводниковый лазерный диод. На принимающей стороне оптическая система фокусирует оптический сигнал на высокочувствительный фотодиод (или лавинный диод), который преобразует световой пучок в электрический сигнал, после чего сигнал демодулируется и преобразуется в сигналы выходного интерфейса.

При использовании оптической линии связи информация передается на очень большие расстояния, а её носителем является лазерное излучение, которое обладает свойством расходимости. С увеличением расстояния от исходной точки происходит расширение лазерного луча в поперечном сечении. Если на выходе поперечный размер пучка мог составлять всего 5 сантиметров, то через 2 тысячи километров это пятно может достигать порядка нескольких сотен метров. Мощность, которая была сфокусирована в маленький пучок, распределяется по пятну (за исключением потерь), что затрудняет прием сигнала. У приемников оптического излучения есть пороговые значения измеряемой энергии, ниже которых детектирование сигнала невозможно. Поэтому в зоне приема излучение необходимо сфокусировать на приемное устройство. Для этого применяется один из ключевых компонентов оптической системы – телескоп.

Наиболее важным параметром телескопа является диаметр приемной апертуры. Рассчитав данное значение, можно определить габариты телескопической системы. Для нахождения данного критического параметра предлагается применять энергетический расчет.

Исходными данными, необходимыми для расчета, являются следующие параметры: частота битовых ошибок – BER , битовая скорость – R , длина волны излучения – λ , радиус выходящего лазерного пучка со спутника передатчика – w_0 , расстояние между приёмником и передатчиком – z , мощность сигнала на передатчике – P_t , схема модуляции сигнала.

Немаловажным вопросом при организации канала связи является выбор схемы, по которой будет осуществляться модуляция сигнала. Длительное время наибольшую популярность имели системы модуляции интенсивности прямого обнаружения благодаря низкой сложности проектирования и простоте реализации. Однако наравне с преимуществами, данные системы имеют и недостатки - они ограничены помехами приемника и вызванными в канале связи нарушениями, такими как амплитудные и фазовые колебания, что снижает общую производительность канала.

В настоящее время является установленным фактом, что когерентное обнаружение в оптических системах помогает улучшить качество связи, обеспечивая отличную частоту передачи, избирательность и повышенную чувствительность приемника. Методы когерентного обнаружения, хотя и более сложные в реализации, быстро набирают популярность. Это объясняется тем фактом, что последние достижения в области электронных и радиочастотных устройств позволили удобно интегрировать методы когерентного обнаружения с современной цифровой обработкой сигналов. Эта комбинация в ходе исследований успешно продемонстрировала свои преимущества превосходного обнаружения сигнала даже в условиях зашумленного канала [2]. В связи с этим, при организации каналов связи, предпочтение отдается схемам модуляции в сочетании с гомодинным или гетеродинным приемником.

Для сравнения производительности канала оптической связи с использованием различных схем модуляции первым шагом задается требуемое значение частоты битовых ошибок. Далее определяется отношение сигнала к шуму (Signal-to-Noise Ratio - SNR), при котором удастся достичь поставленной цели. На рис. 1. представлен график [3], позволяющий сравнить некоторые схемы модуляции оптического сигнала без учета влияния атмосферы.

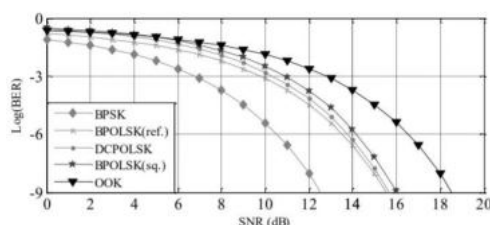


Рис. 1. Сравнение характеристик BER различных схем модуляции в режиме отсутствия турбулентности

Из рис. 1. Видно, что при использовании двоичной фазовой манипуляции (BPSK) затрачивается меньше энергии, для достижения соответствующего уровня BER, чем для других схем модуляции. В первую очередь это связано с более простой реализацией метода. Так же при BPSK модуляции скорость передачи информации ниже, по сравнению с другими, представленными когерентными методами модуляции, что приводит к меньшему числу ошибок. Для достижения того же уровня ошибок, при использовании методов некогерентной модуляции оптического сигнала (на графике такой является схема модуляции OOK), приходится затрачивать наибольшее количество энергии.

В качестве примера для расчета были заданы исходные параметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные параметры для энергетического расчета

Величина	Значение
BER	10^{-8}
R	2 Гбит/с
λ	1550 нм
w_0	5 мм
z	2000 км
P_t	100 мВт
Схема модуляции сигнала	BPSK

Первым этапом энергетического расчета является выбор требуемой частоты битовых ошибок. После чего производится расчет значения SNR. Для каждой схемы модуляции формулы, устанавливающие связь между BER и SNR, отличаются.

Для BPSK модуляции это формула 1 [4]:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (1)$$

где $\operatorname{erfc}(x)$ – функция ошибок (представлена в формуле 2), E_b/N_0 – это метрика, которая показывает отношение энергии сигнала, приходящейся на 1 бит принимаемого сообщения E_b , к энергетической спектральной плотности шума N_0 . По своей сути E_b/N_0 представляет собой SNR, нормированное на ширину полосы W и битовую скорость R .

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2)$$

Для ООК модуляции связь между BER и нормированным SNR определяется формулой 3 [5]:

$$\text{BER} = \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (3)$$

С помощью программы MathCad для формулы 1 был получен следующий график, рис. 2.:

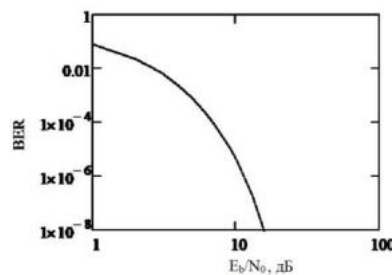


Рис. 2. Зависимость BER от E_b/N_0 в режиме отсутствия турбулентности для BPSK модуляции

При заданном $\text{BER} = 10^{-8}$ значение E_b/N_0 составляет 15,75 дБ.

Отношение сигнал/шум по мощности SNR можно выразить в следующем виде [6], формула 4:

$$\text{SNR(dB)} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log_{10} \left(\frac{R}{W_u} \right), \quad (4)$$

где R – битовая скорость, W_u – ширина полосы шума.

При использовании BPSK модуляции один бит кодируется одним символом, это значит, что для BPSK модулированного сигнала со скоростью передачи данных 2 Гбит/с основная часть энергии лежит в полосе ± 2 ГГц, то есть в полосе $W = 4$ ГГц. При использовании цифровых приемников, обычно, реализуются согласованные фильтры, и ширина полосы шума принимается равной ширине полосы сигнала.

Для дальнейшего расчета необходимо представить SNR как линейную величину (перевести из дБ в разы):

$$\text{SNR(dB)} = 10 \log_{10} (\text{SNR}) \quad (5)$$

Заменив в формуле 4 левую часть на правую часть из формулы 5 можно сразу получить требуемое значение, $\text{SNR} = 18,78$ раз.

Зная SNR, можно найти принимаемую мощность. Отношение сигнал/шум для когерентного приёма в случае ограничения дробовым шумом локального гетеродина примет следующий вид (в данной формуле SNR является линейной величиной):

$$\text{SNR} = \frac{\langle i_c^2 \rangle}{\langle i_{\text{шум}}^2 \rangle} = \frac{\eta_{\text{het}} \cdot \eta_e \cdot P_R}{h \cdot \nu \cdot W} \quad (6)$$

где η_{het} – эффективность гетеродинного смещения оптических полей, η_e – квантовая эффективность приемника, P_R – мощность принимаемого сигнала, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, ν – частота излучения, W – ширина полосы пропускания электронного тракта.

Для энергетического расчета значение η_{het} взято из аналогов и принято равным 0,4, также и для $\eta_e = 0,7$ (принято с запасом). Частота излучения находится из соотношения 7:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (7)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Подставив найденные значения в формулу 6, P_R получилась равной 34,4 нВт.

В данном расчете при описании пучка излучения используется идеальное приближение, известное как Гауссов пучок. Интенсивность в таком пучке распределена по закону Гаусса.

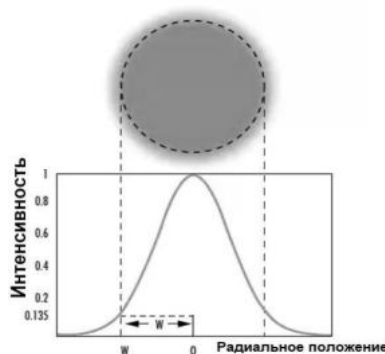


Рис. 3. – Распределение интенсивности в Гауссовом пучке в зависимости от координаты.
 W - радиус лазерного пучка по уровню интенсивности $1/e^2$

В реальных системах излучение нельзя считать полностью Гауссовым из-за отклонений (присутствует ограничение по дифракции), поэтому вводится специальный параметр – качество пучка или фактор пучка M^2 . Этот фактор измеряется средствами математической статистики, а затем указывается в паспорте излучающего прибора.

Профиль интенсивности не остается постоянным при распространении пучка в пространстве, следовательно, есть зависимость минимального радиуса пятая « w » (перетяжки) от расстояния « z », которая отображена в формуле 8 [7]:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}}, \quad (8)$$

где w_0 – радиус выходящего лазерного пучка со спутника передатчика, z – расстояние между приёмником и передатчиком, z_R – длина перетяжки, находится по формуле 9.

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} \quad (9)$$

После подстановки формулы 9 в формулу 10, $w(z)$ получилось равным 197 м. Именно такой радиус поперечного сечения будет иметь лазерный пучок на расстоянии 2000 км от передатчика.

Далее необходимо определить интенсивность в пучке по формуле 10 [7]:

$$I = \frac{2P_t}{\pi \cdot w(z)^2} \cdot e^{-\frac{2R^2}{w(z)^2}}, \quad (10)$$

где P_t – мощность сигнала на передатчике, R – необходимый радиус приёмной апертуры.

Интенсивность света – это воспринимаемая мощность на единицу телесного угла. То есть, чтобы рассчитать всю мощность на приёмнике, необходимо домножить полученное значение на площадь приёмной апертуры телескопа:

$$P_r = S \cdot I = \pi R^2 \cdot I \quad (11)$$

Объединив формулы 10 и 11, можно вычислить необходимый радиус приемной апертуры. Он составил 8,2 см. Чтобы получить диаметр, необходимо полученное значение умножить на 2. Поскольку расчет проводился для гауссова пучка, то данное значение соответствует уровню интенсивности $1/e^2$, где содержится 86,5% мощности сигнала. Чтобы телескоп мог принимать 100% мощности, необходимо увеличить полученное значение примерно в 1,5 раза. То есть итоговое значение приемной апертуры $D = 8,2 \cdot 2 \cdot 1,5 = 24,6$ см.

Полученное значение диаметра приемной апертуры сравнимо с аналогами [8]. Энергетический расчет по приведенным формулам показал, что они верны.

Таким образом, удается получить минимальный необходимый диаметр приемного телескопа терминала лазерной космической связи. Данный расчет предполагает связь между двумя объектами в космосе. Для связи между спутником и наземной станцией в формулах необходимо учитывать влияние турбулентной атмосферы.

Библиографический список

1. Заказнов Н. П. и др. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов/Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. Н. Кузичев. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. — 448 с.
2. Miglani R., Malhotra J. S. Performance enhancement of high-capacity coherent DWDM free-space optical communication link using digital signal processing //Photonic Network Communications. – 2019. – Т. 38. №. 3. С. 326-342.
3. Tang X. Polarisation shift keying modulated free-space optical communication systems. – University of Northumbria at Newcastle (United Kingdom), 2012.
4. Divya M. Bit error rate performance of bpsk modulation and ofdm-bpsk with rayleigh multipath channel //International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2013. – Т. 2. – №. 4. – С. 623-626.
5. Choyon A. K. M. S. J., Chowdhury R. Performance comparison of free-space optical (FSO) communication link under OOK, BPSK, DPSK, QPSK and 8-PSK modulation formats in the presence of strong atmospheric turbulence //Journal of Optical Communications. – 2020.
6. Damm W. Signal to Noise, Carrier to Noise, EbNo on Signal Quality Ra-tios //NoiseCom Resource Library: Webinars', [Электронный ресурс] // Noisecom. URL: <http://www.noisecom.com/resource-library/webinars/sn-cn-ebno-webinar>. (дата обращения: 03.04.2022).
7. Galvez E. J. Gaussian beams //Colgate University. – 2009.
8. LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer) [Электронный ресурс] // URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/ladee> (дата обращения: 28.12.2021).

МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ СЛОЖНОЙ ЗАДАЧИ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ РАСКРОЯ И УПАКОВКИ

А. И. Седых, А. И. Чаусовский

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

При создании расчетной программы для компании, занимающейся грузоперевозками, возникла проблема, заключающаяся в необходимости разместить некоторое множество грузов в наименьшем количестве машин, зная параметры (длину и ширину) груза и полезной площади загрузки. Высота грузов и машины не учитывается, поскольку введено условие о невозможности штабелирования грузов. Кроме того, задача имеет допущения:

- грузы могут располагаться только внутри полезного пространства;
- грузы не могут наслаиваться друг на друга;
- нагрузка на ось и другие особые требования не учитываются.

Обычно количество грузов не превосходит 100, а количество машин 10, что приводит к огромной вычислительной сложности при использовании метода полного перебора. Для того, чтобы сократить время вычислений можно применить эвристические алгоритмы, дающие решения, которые могут не быть оптимальными, но будут выполняться за более короткое время.

Представленную задачу можно свести к задаче прямоугольного раскроя для серийного производства. Она ставится следующим образом: дано n прямоугольников размерами $a_i \times b_i$ и заготовки с размерами $A \times B$, требуется разработать план раскроя заготовок на требуемые прямоугольники таким образом, чтобы количество использованных заготовок было минимальным. Первое упоминание этой задачи приписывается Гилмору и Гомори (1961) [1]. Её типология впервые описана в *European Journal of Operational Research* в 1990 году преподавателем Aachen университета Н. Dyckhoff [2]. В 2007 году G. Wascher расширил типологию задачи разрезания и упаковывания [3]. На 2022 год она решается при помощи нескольких зарубежных платных ПО, например, ESICUP [4], вышедший в релиз в 2003 году и основанный на исследовании Н. Dyckhoff.

Программное обеспечение ESICUP использует алгоритмы двух категорий: ориентированного дерева и локального поиска. Рассмотрим эти виды алгоритмов подробнее.

Для рассмотрения концепции ориентированного дерева требуется ввести понятие компактности упаковки в направлении. Упаковка является компактной в некотором направлении в том случае, если в этом направлении невозможно переместить ни один прямоугольник, не поменяв при этом местоположение какого-либо другого. Алгоритм сводится к выбору исходной направленности упаковки и постепенному присоединению к корневой стороне, определенной направленностью компоновки, наиболее подходящих по некоторому условию приспособленности прямоугольников. Пример левонаправленной упаковки можно увидеть на рис. 1.

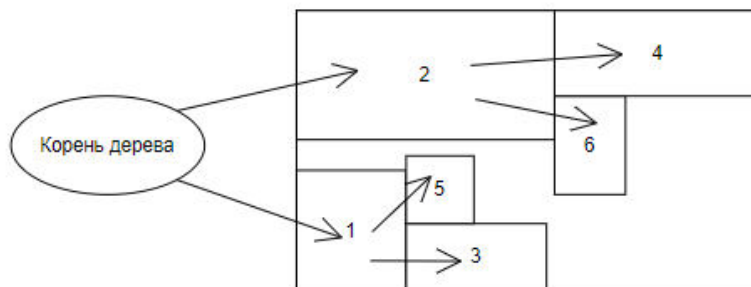


Рис. 1. Пример L-компоновки

Концепция локального поиска базируется на термине окрестности, то есть множестве решений, полученных при единичном применении операции к решению. Из этого следует, что эти алгоритмы являются итерационными и поиск в них производится на основании текущего решения. К представителям данной концепции так же относят класс метаэвристических способов решения данной задачи, к числу которых относятся системы искусственного моделирования реальных процессов: генетические и муравьиные алгоритмы, алгоритмы имитации отжига и другие, которые описаны в [5] и в рамках данной статьи рассмотрены не будут.

Исходя из [6] наиболее популярным и часто реализуемым представителем подхода ориентированного дерева является алгоритм Skyline. В качестве представителя концепции локального поиска будет представлен алгоритм Максимальных прямоугольников, который можно считать усовершенствованной версией алгоритма Гильотины, описанного в [7].

Рассмотрим подробнее эти алгоритмы и сравним результаты их использования.

Алгоритм Skyline. Изначально имеется множество неупакованных прямоугольников, каждый из которых имеет свой идентификатор и пустое множество упакованных прямоугольников. Задача сводится к формированию направленной компоновки по функции приспособленности. На каждом шаге построения дерева выбирается неупакованный предмет и примеряется к родительскому предмету. Усложнение алгоритма Skyline относительно построения дерева в соответствии с направленностью компоновки заключается в том, что до и после установки прямоугольника в некоторую позицию – формируется ломанная линия, огибающая контур всех упакованных объектов. В старом контуре выбирается максимально нижний горизонтальный отрезок и в крайне-левом возможном положении к этой линии примеряется каждый неупакованный прямоугольник. Для каждого из примеренных прямоугольников вычисляется функция приспособленности, которая может быть связана с различными параметрами, например, со сравнением количества углов в старом и новом контурах (рис. 2). Затем прямоугольник с

наибольшим значением приспособленности вносится во множество упакованных и становится наследником для объекта, к которому он прикрепляется.



Рис. 2. Этап выбора местоположения следующего элемента, Skyline

Алгоритм Гильотины, на котором строится алгоритм Максимальных прямоугольников звучит следующим образом: пусть S – площадь заготовки $A \cdot B$. Тогда для каждого прямоугольника $a_i \cdot b_i$, исходя из принципа направленности компоновки выбирается свободный прямоугольник S_i , принадлежащий площади S , наиболее подходящий по определенным критериям. Если такого прямоугольника нет, то берется новая заготовка. После компоновки выбранный прямоугольник S_i делится на новые свободные прямоугольники S_i^1 и S_i^2 и вносятся в список свободных.

Критерием выбора S_i прямоугольника может служить его наименьшая площадь из возможных.

Алгоритм Максимальных прямоугольников. В алгоритме гильотины хранится список попарно не пересекающихся прямоугольников, представляющих свободную полезную область. В отличие от алгоритма Гильотины, который выбирает одну из двух осей разделения, алгоритм максимальных прямоугольников выполняет операцию, которая соответствует выбору обеих осей разделения одновременно. На рис. 3 можно видеть, что в момент помещения в крайний левый угол прямоугольника, вычисляются и заносятся в список прямоугольники, имеющие максимальную длину в любом из направлений.

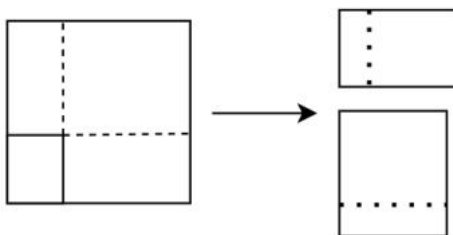


Рис. 3. Этап выбора местоположения следующего элемента, Skyline.

В случае, если попытаться воспользоваться идеей ниже-левой ориентации, то алгоритм будет выглядеть следующим образом: нужно поместить каждый прямоугольник в положение, где y - координата верхней стороны является наименьшей, и, если таких допустимых позиций несколько, выбрать ту, которая имеет наименьшее значение x - координаты. Результат работы алгоритма Максимальных прямоугольников приведен на рис. 4, овалами выделены области размещения максимальных прямоугольников, хранящиеся в списке в момент установки последнего из упакованных прямоугольников.

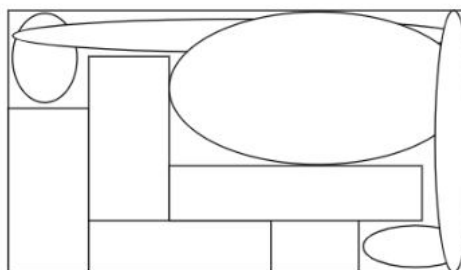


Рис. 4. Результат работы алгоритма максимальных прямоугольников с ниже-левой направленностью компоновки

Асимптотические сложности алгоритмов по времени выполнения: Skyline – $O(n^2)$, Максимальные прямоугольники - $O(S^2 \cdot n)$, где S – площадь заготовки.

Асимптотические сложности алгоритмов по памяти: Skyline – $O(n)$, Максимальные прямоугольники - $O(S)$, где S – площадь заготовки.

Результат выполнения целевой программы с 50 грузами, пакуемыми в машины с полезной площадью загрузки $13 \cdot 3$ метра способом максимальных прямоугольников можно увидеть на рис. 5, а данные о комплектации машин – в таблице 1.

Таблица 1
Комплектация машин

№ машины	ID груза	Ширина груза, м	Длина груза, м
1	7	2	3
	23	3	5
	40	3	6
2	19	1	8
	27	1	5
	28	2	8
	30	2	5
3	5	1	4
	12	1	4
	38	2	5
	43	8	2
4	44	1	5
	9	1	3
	11	2	6
	21	1	3
	25	1	3
	26	2	7
5	48	1	4
	2	2	1
	4	1	2
	6	2	1
	10	2	1
	14	1	2
	24	2	6
6	31	2	7
	45	3	1
	8	1	1
	13	1	1
	15	1	1
	20	1	1
	33	1	2
	34	1	1
	36	1	1
	37	1	1
7	42	2	6
	47	2	7
	3	3	3
	16	3	3
8	29	2	4
	49	3	3
	1	2	2
	22	3	2
9	32	2	4
	46	4	2
	17	2	2
	18	2	2
	35	2	2
	39	2	2
	41	2	2
	50	2	2

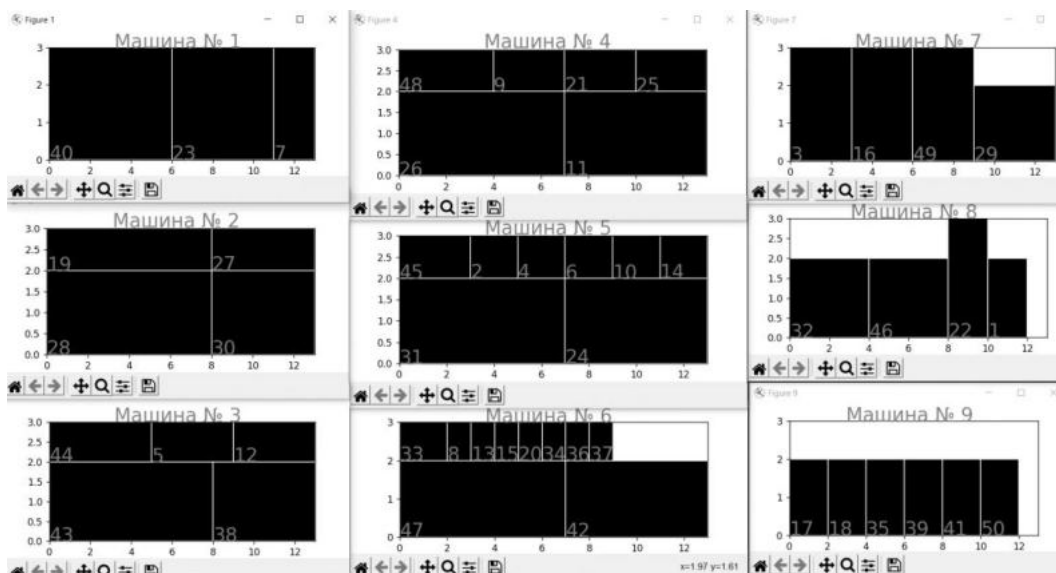


Рис. 5. Результат работы программы

Библиографический список

1. Gilmore P.C, Gomory R.E. A linear programming approach to the cutting stock problem, *Operations Research*. 1961.
2. Dyckhoff H, Finke U. *Cutting and Packing in Production and Distribution: A Typology and Bibliography*. Physica, Heidelberg. 1992.
3. Wäscher G., Haußner H., Schumann H. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*. 2007.
4. ПО ESICUP, официальный сайт [Электронный ресурс]. URL:<https://www.euro-online.org/websites/esicup/> (дата обращения: 04.03.2022).
5. Руднев А.С. Алгоритмы и задачи поиска для задач двумерной упаковки: дис. ... канд. ф.-м. наук: 05.13.18: защищена 15.03.10: утв. 21.06.10. — Новосибирск, 2010. — 104 с.
6. J. Jylänki A Thousand Ways to Pack the Bin - A Practical Approach to Two-Dimensional Rectangle Bin Packing. 2010.
7. А.А. Андрианова, Т.М. Мухтарова, В.Р.Фазылов Формирование карты гильотинного раскроя листа по функциям гильотинного размещения. 2017.

УДК 531.78

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЯГИ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Шкурупий В.А., Будный Н.Л.

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

ВВЕДЕНИЕ

Электроракетные двигатели (ЭРД) являются альтернативой химическим при разработке двигательных установок космических аппаратов. Данный тип двигателей отличается высоким удельным импульсом, однако при этом – малой тягой. Рабочие процессы в таких двигателях отличаются существенной сложностью, в связи с чем их моделирование с использованием аналитических или численных методов обладает ограниченной точностью. Поэтому экспериментальное исследование тяговых характеристик таких двигателей остается актуальной задачей.

Особенностью выполнения измерения является весьма малая величина тяги, как правило составляющая от долей до сотен миллиньютонов, что накладывает определенные требования на конструкцию стенда и измерительное оборудование. Существенными преимуществами обладает стенд измерения тяги уравновешивающего преобразования – он позволяет достичь большей чувствительности измерения, меньшей погрешности, а также минимизировать перемещения двигателя при огневых испытаниях. Также, использование принципа уравновешивающего преобразования позволяет создать более компактный стенд, что весьма актуально для испытаний в малогабаритных вакуумных камерах.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию математической модели динамики стенда для измерения тяги ЭРД уравновешивающего типа.

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения надежности ракетных двигателей и исследования тяговых характеристик вновь разрабатываемых двигателей, что требует создания стендов для огневых испытаний с оптимальными параметрами.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Цель измерения тяги в установившемся режиме заключается в определении неизвестной силы тяги в процессе испытания. Уравновешивающее преобразование реализуется путем приложения управляющей силы для компенсации отклонения стенда от нейтрального положения, вызванного измеряемой силой [1,2,3]. При сведении отклонения подвижной части стенда к нулю от исходного положения, момент силы тяги будет скомпенсирован моментом уравновешивающей силы, что, при известных габаритах стенда, позволяет измерить тягу.

В качестве базового варианта конструкции используется стенд с противовесом, описанный в работе [3]. На рисунке 1а представлена схема стенда.

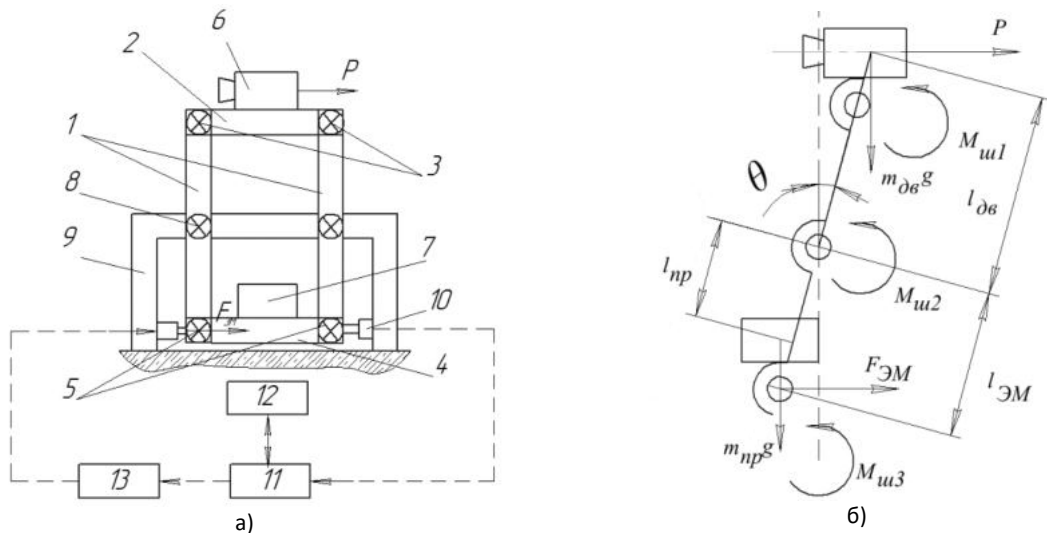


Рисунок 1 – а) Стенд уравнивающего преобразования с противовесом; б) – Расчетная схема

Подвижная часть стенда состоит из стержней 1, соединенных с верхней подставкой 2 гибкими шарнирами 3, и с нижней подставкой 4 гибкими шарнирами 5. На верхней подставке 2 монтируется исследуемый двигатель 6. На нижней подставке 4 монтируется противовес 7. Подвижная часть с помощью гибких шарниров 8 соединяется с неподвижным основанием 9. При включении двигателя происходит вращение стержней под действием момента. Вращательное движение стержней за счет наличия гибких шарниров преобразуется в плоскопараллельное перемещение пластин. Перемещение пластины измеряется с помощью датчика (линейного дифференциального трансформатора) 10. Датчик соединяется с модулем ввода-вывода аналоговых сигналов 11, соединенного с ЭВМ 12. Сигнал отклонения положения подвижной части стенда на ЭВМ преобразуется в управляющий сигнал, который через модуль ввода-вывода 11 подается через усилитель 13 на электромагнит (актуатор) 14, сердечник которого закреплен на подвижной части стенда, а обмотка – на неподвижной. В результате приложения управляющей силы, по мере прохождения переходного процесса, подвижная часть стенда возвращается в исходное нулевое положение. Сформированный управляющий сигнал с ЭВМ будет являться функцией тяги двигателя. Противовес позволяет исключить влияние посторонних вибраций на процесс измерения (в случае, если стенд будет идеально статически уравновешенным).

Конструкция стенда должна также предусматривать ряд дополнительных устройств: систему тарирования, электромагнит компенсации дрейфа нуля и т.п. Однако, данные устройства не оказывают влияния на динамику стенда, поэтому в рамках данной статьи они рассматриваться не будут.

Рассмотрим математическую модель, описывающую вращательное движение подвижной части стенда относительно точки закрепления 8 (рисунок 1б). Уравнение движения записывается в виде:

$$J\ddot{\theta} = Pl_{oe} \cos \theta - F_{эм} l_{эм} \cos \theta + \sum_{i=1}^N M_{T,i} + \sum_{i=1}^N M_{x,i} + \sum_{i=1}^N M_{y,i} + \sum_{j=1}^N M_{u,j} \quad (1)$$

где J – момент инерции подвижной части стенда, θ – угол отклонения подвижной части стенда от вертикального положения, P – тяга, l_{oe} – расстояние от точки установки двигателя до точки закрепления, $F_{эм}$ – сила со стороны электромагнита, $l_{эм}$ – расстояние от точки установки электромагнита до точки закрепления. Каждый i -й элемент конструкции создает момент силы тяжести $M_{T,i}$ равный по модулю:

$$|M_{T,i}| = m_i g l_i \sin \theta \quad (2)$$

где m_i – масса i -го элемента, g – ускорение свободного падения, l_i – расстояние от центра масс i -го элемента до точки закрепления.

При наличии посторонних вибраций на i -й элемент стенда будут действовать виброускорения по двум осям, вызывая появление моментов:

$$|M_{x,i}| = m_i \ddot{x}_i \cos \theta \quad (3)$$

$$|M_{y,i}| = m_i \ddot{y}_i \sin \theta \quad (4)$$

Шарнирный момент в j -м шарнире равен:

$$|M_{u,j}| = k_{u,j} \theta \quad (5)$$

где $k_{u,j}$ – жесткость j -го шарнира.

Моменты в уравнение (1) подставляются с учетом знаков. Следует отметить, что в случае идеального уравнивания вибрации полностью компенсируются; однако же в реальных условиях из-за несовершенства изготовления и под действием термических деформаций балансировка стенда может нарушаться, что приводит к появлению моментов (3-4).

Сила, действующая на подвижную часть со стороны электромагнита, равна:

$$F_{эм} = k_F I \quad (6)$$

где k_F – коэффициент чувствительности, I – ток, протекающий через обмотку электромагнита.
 Электромагнит может быть упрощенно рассмотрен как последовательное соединение источника управляющего напряжения U , активного сопротивления обмотки R , индуктивности обмотки L и включенного встречно источника напряжения E – противоЭДС, появляющегося при изменении потокоцепления через обмотку. Тогда:

$$U = RI - E - L \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

Соответственно:

$$E = k_{\text{ЭДС}} \frac{dx_c}{dt} \quad (8)$$

где $k_{\text{ЭДС}}$ – коэффициент противоЭДС, x_c – положение сердечника электромагнита.
 Ввиду малости угла отклонения штанги, можно считать, что:

$$\frac{dx_c}{dt} \approx -l_{\text{эм}} \dot{\theta} \quad (9)$$

Управляющее напряжение U задается путем усиления управляющего сигнала, формируемого классическим ПИД-регулятором, который реализуется программным образом на ЭВМ, т.е.:

$$U = k_y \left[k_{\text{П}} x_{\text{изм}}(t) + k_{\text{И}} \int_0^t x_{\text{изм}}(t) + k_{\text{Д}} \frac{dx_{\text{изм}}(t)}{dt} \right] \quad (10)$$

где k_y – коэффициент усиления, $k_{\text{П}}$, $k_{\text{И}}$, $k_{\text{Д}}$ – коэффициент настройки ПИД-регулятора, а измеряемое датчиком линейное перемещение равно:

$$x_{\text{изм}} = l_{\text{изм}} \sin \theta \quad (11)$$

где $l_{\text{изм}}$ – расстояние от точки установки датчика до точки закрепления.

Таким образом, была разработана математическая модель стэнда, рассмотрена математическая модель актуатора, рассмотрен принцип работы стэнда, принцип работы ПИД- регулятора.

Моделирование движения стэнда осуществляется путем численного интегрирования уравнений (1) и (7) с учетом (2-6) и (8-10).

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Реализация разработанной математической модели с учетом работы ПИД-регулятора выполнена в среде Simulink. Блок-схема модели представлена на рисунке 2.

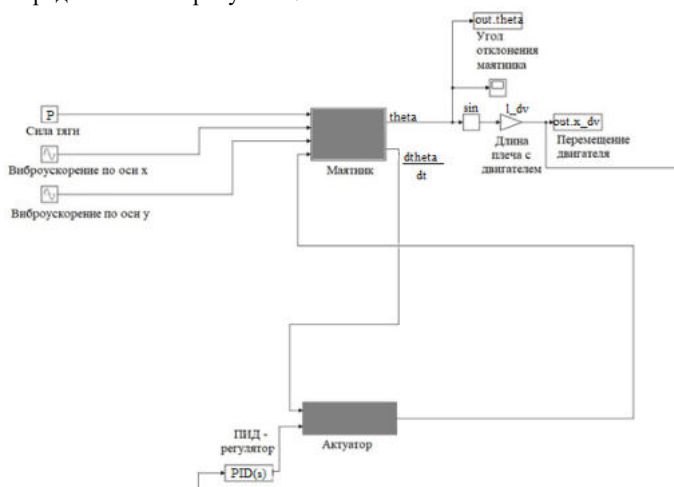


Рисунок 2 – Модель двигателя

Подсистемы подвижной части («маятника») и электромагнита («актуатора»), представлены на рисунках 3 и 4.

С использованием разработанной модели выполнен синтез регулятора, обеспечивающего качественный переходный процесс.

Результаты моделирования работы системы при измерении тяги величиной $P = 0,3$ Н представлены на рисунке 5.

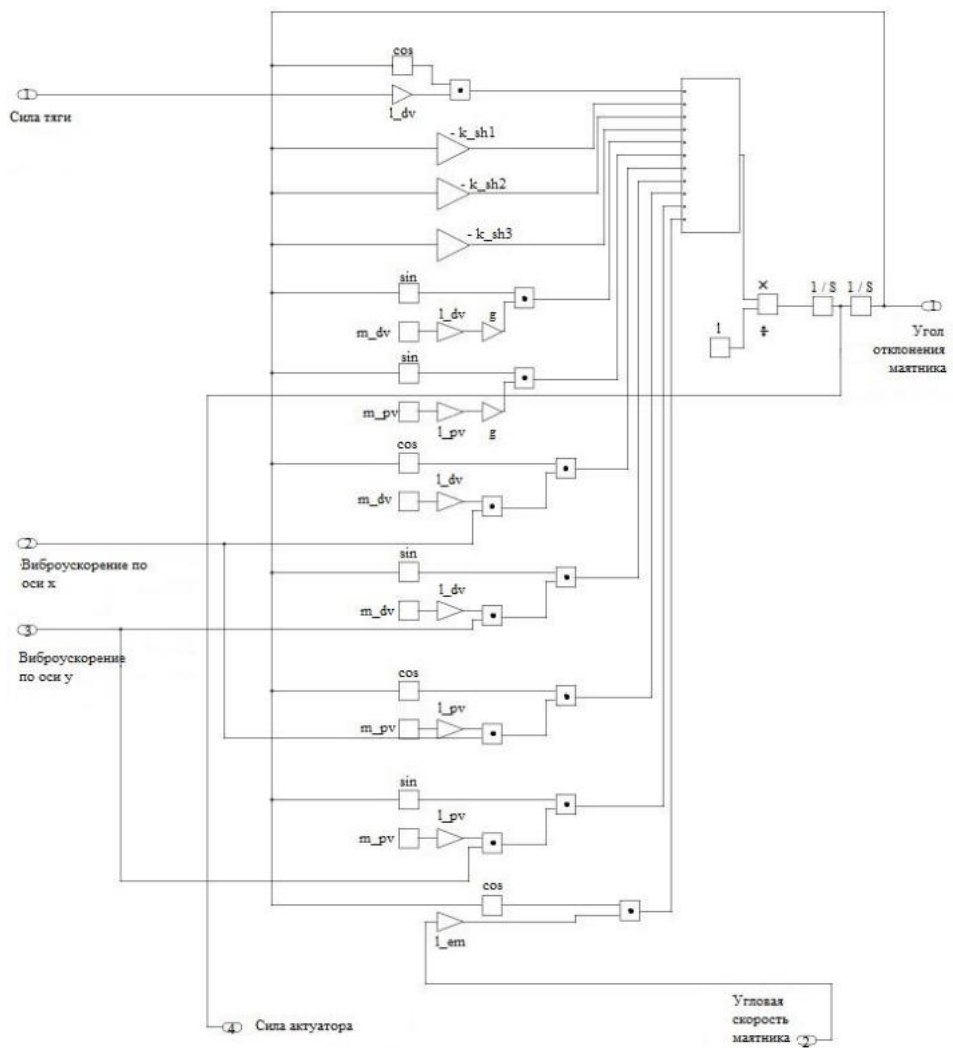


Рисунок 3 – Подсистема подвижной части стенда («маятника»)

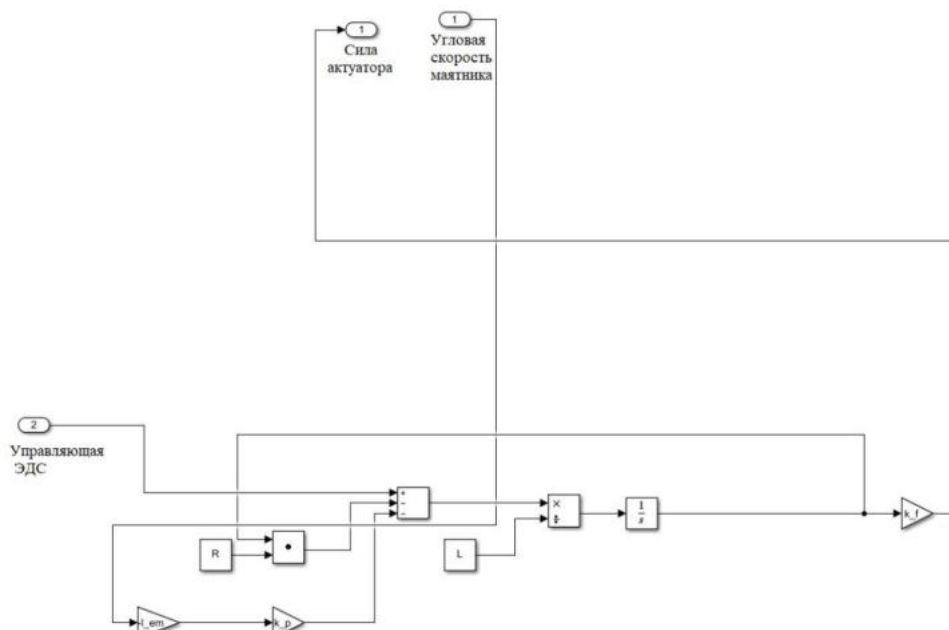


Рисунок 4 – Подсистема электромагнита «актуатора»

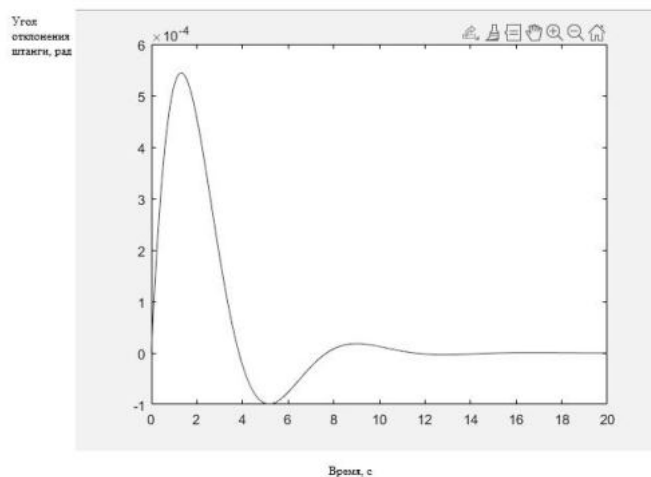


Рисунок 5 – Переходный процесс при приложении тяги

Полученная модель может быть полезна при анализе проектных параметров стенда, определении динамической погрешности, разработке мероприятий по повышению точности измерения.

Библиографический список

1. Koizumi, H. Development of Thrust Stand for Low Impulse Measurement from Microthrusters / H. Koizumi, K. Komurasaki, Y. Arakawa // Review of Scientific Instruments. - 2004. - № 10, с. 3185–3190.
2. Xu, K. High-Power, Null-Type, Inverted Pendulum Thrust Stand / K. Xu, M. Walker // Review of Scientific Instruments. – 2009. №5, с. 55 -103.
3. Tartler, Brett R. Construction and Performance of an Inverted Pendulum Thrust Balance / Brett R. Tartler. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2010. – 134 с.
4. Manzella, D. Evaluation of Low Power Hall Thruster Propulsion / D. Manzella, S. Oleson, J. Sankovic, T. Haag, A. Semenkin, V. Kim // 32nd Joint Propulsion Conference. – USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper, 1996. – с. 27 – 36.

УДК 004.032.26

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

М. Д. Архипов

Московский авиационный институт

Одной из наиболее фундаментальных и широко изучаемых проблем в области компьютерного зрения является обнаружение объектов. Задача направлена на то, чтобы нарисовать несколько ограничивающих рамок объектов на заданном изображении, что очень важно во многих областях, включая автономное вождение. Как правило, эти алгоритмы обнаружения объектов можно разделить на две категории: одноступенчатые модели и многоступенчатые модели. В этом посте мы углубимся в ключевые идеи многоступенчатых конвейеров для обнаружения объектов, просмотрев некоторые из наиболее значимых работ в этой области.



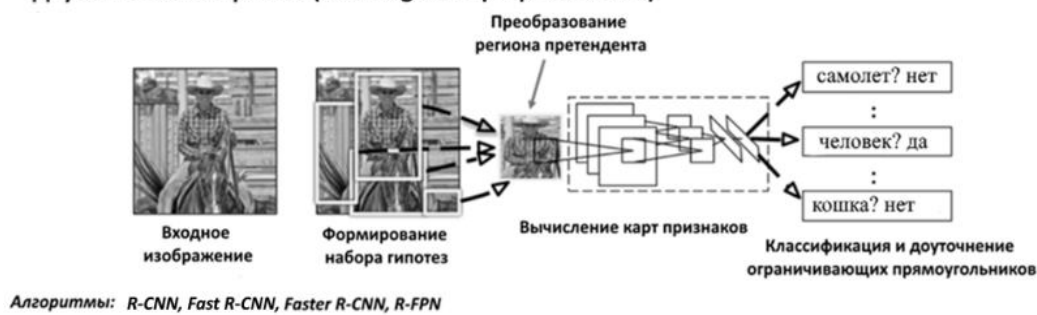
Рисунок 1. Пример обнаружения объектов нейронной сетью

Выделение отличительных признаков, один из самых важных элементов алгоритмов обнаружения объектов. Разработка алгоритма извлечения отличительных признаков требует работы команды опытных специалистов в течении значительного времени. Оптимальность работы таких алгоритмов напрямую зависит от количества различных объектов интереса и их разнообразия. Даже профессионалам не всегда удастся найти идеальное решение, консенсус достигается за счет намеренного допущения погрешностей работы алгоритма. При возникновении

необходимости дополнить работу алгоритма новыми объектами приходится заново привлекать специалистов для дополнения или изменения алгоритма.

Применить нейронную сеть ко множеству прямоугольников в различных местах на изображении. Нейронная сеть должна классифицировать каждый образец как фон или объект интереса.

Двухэтапные алгоритмы (two stage или proposal based)



Одноэтапные алгоритмы (one stage или proposal free)



Рисунок 2. Семейство алгоритмов обнаружения

Остановимся подробно на двухступенчатом обнаружении объектов. Одна ветвь детекторов объектов основана на многоступенчатых моделях. Исходя из работы R-CNN, одна модель используется для извлечения областей объектов, а вторая модель используется для классификации и дальнейшего уточнения локализации объекта. Известно, что такие методы относительно медленные, но очень мощные, но недавний прогресс, такой как совместное использование функций, улучшил двухступенчатые детекторы, чтобы иметь аналогичные вычислительные затраты с одноступенчатыми детекторами. Поэтому важно понимать все основные алгоритмы в двухступенчатых детекторах.

Терминология. Ограничивающая рамка (bounding box) – координаты, ограничивающие определенную область изображения, – чаще всего в форме прямоугольника. Может быть представлена 4 координатами в двух форматах: центрированный и обычный. Гипотеза (Proposal), P – определенный регион изображения (заданный с помощью ограничивающей рамки), в котором предположительно находится объект. End-to-end обучение – обучение, при котором на вход сети поступают сырые изображения, а на выходе – готовые ответы. IoU (Intersection-over-Union) – метрика степени пересечения между двумя ограничивающими рамками.

Предлагается наивная версия двухэтапного алгоритма обнаружения на основе сверточной нейронной сети, который впоследствии улучшен и ускорен. Алгоритм состоит из трех этапов:

- 1) Формирование набора гипотез (region proposal), т. е. поиск областей изображения, которые могут содержать объекты
- 2) Второй этап - это сверточная нейронная сеть, которая вычисляет карты признаков из каждой области-кандидата.
- 3) Заключительный этап - это полносвязанный слой, который классифицирует и доуточняет ограничивающие прямоугольники.

Наборы гипотез могут быть сформированы с использованием различных методов, обычно используется выборочный поиск. Чтобы обобщить выборочный поиск, к изображению применяется алгоритм сегментации, и на основе карты сегментации рисуются предположения по регионам (ограничивающие рамки). Карта сегментации итеративно объединяется, и предположения по более крупным регионам извлекаются из уточненной карты, как показано на рисунке 3.

Второй и третий этапы вместе можно рассматривать как обычную сверточную нейронную сеть, который работает над набором гипотез выделенного региона. Часто используется часть свертки AlexNet в качестве второго этапа, в то время как может быть использована любая другая архитектура. Поскольку наборы гипотез имеют разные размеры, обычно применяется самый наивный способ деформации и изменения размера всех ограничивающих рамок до желаемого размера.

Также используют классификатор ограничивающих рамок, обученный для дальнейшего уточнения оценки ограничивающих рамок, выполненной путем сегментации. Другая сеть обучена вводить карты объектов и регрессировать смещения ограничивающих рамок, представляющих относительные перемещения и коэффициенты масштабирования ширины/высоты в логарифмическом масштабе. Этот метод показал повышение производительности.

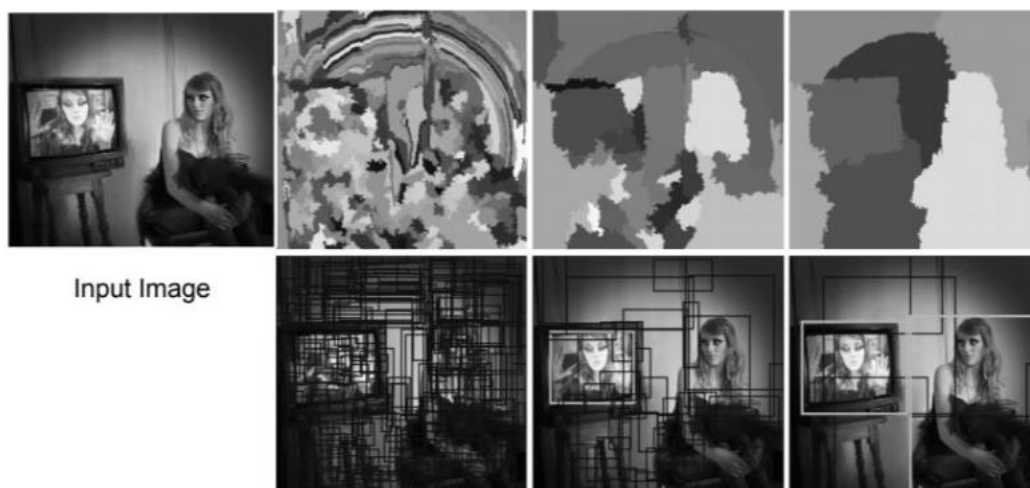


Рисунок 3. Карта сегментации изображения

Чтобы отклонить предложения о перекрывающихся областях при выводе, где два или более ограничивающих прямоугольника указывают на один и тот же объект, предлагается жадный алгоритм, который отклоняет область, если она имеет высокий коэффициент пересечения по объединению (IoU) с другой областью, которая имеет более точный прогноз.

Детектор в результате работы выдает в качестве выхода множество рамок. Часто это рамки для одного и того же объекта, и они пересекаются. Решением является использовать некоторый алгоритм кластеризации. Один из вариантов это Non Maximum Suppression (NMS):

- 1) Необходимо ранжировать все прямоугольники по достоверности, перейти к первому объекту.
- 2) Проверить все объекты из списка на IoU, которые больше порогового значения.
- 3) Все объекты, удовлетворяющие условию удалить из списка
- 4) Перейти к следующему объекту. Повторить тоже самое со всеми оставшимися объектами в списке.

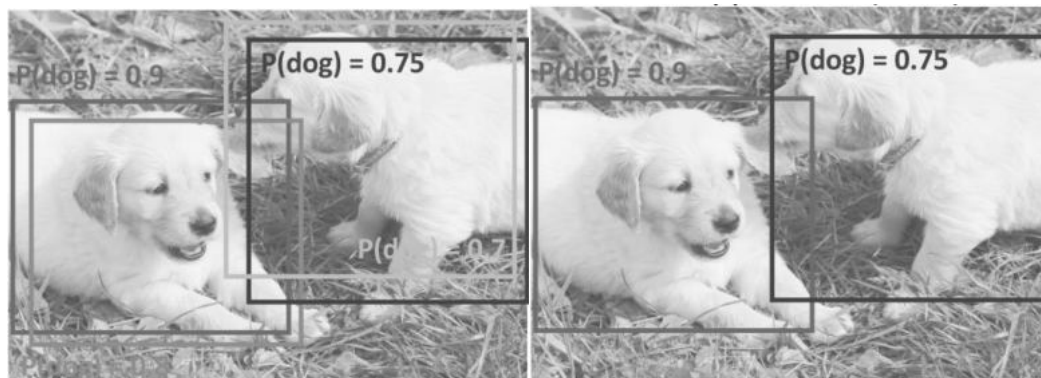


Рисунок 4. Пример работы алгоритма кластеризации

Превосходство производительности R-CNN по сравнению с другими методами обусловлено идеей выполнения выборочного поиска в стиле "снизу-вверх", также использующего сверточную нейронную сеть для локализации объектов и методов, используемых для точной настройки сети на основе данных обнаружения объектов. Но R-CNN очень трудоемки, потому что он применяет сверточную нейронную сеть примерно к 2000 выделенным областям выборочного поиска.

В настоящий момент двухэтапные алгоритмы обнаружения объектов является более точными по сравнению с одноэтапными, но в тоже время проигрывают в скорости работы.

Библиографический список

1. Сеть YOLOv4 [Электронный ресурс]/URL: <https://habr.com/ru/post/503200/> (Дата обращения 27.03.2022)
2. Сеть R-CNN [Электронный ресурс]/URL: https://vbystricky.github.io/2017/06/rcnn_etc.html/ (Дата обращения 27.03.2022)
3. Обнаружение объектов [Электронный ресурс]/URL: <https://habr.com/ru/company/jetinfosystems/blog/498294/> (Дата обращения 28.03.2022)

УДК 004.052.42

ОБЗОР МЕТОДОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ФАЗЗИНГ-ТЕСТИРОВАНИЯ

Р. С. Рузубаев

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

В стандарте ISO 9000:2000 процесс верификации программного продукта имеет следующее определение. «Верификация – подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные

требования были выполнены». Предметом верификации является процедура проверки выполнения формальных требований на модели [1]. Принято выделять следующие группы методов верификации:

- формальные методы;
- статический анализ;
- динамические методы;
- экспертиза;
- синтетические методы.

Долгое время считалось, что динамические методы верификации программного обеспечения являются слишком трудоемкими, и обнаруженные программные дефекты не оправдывают потраченных ресурсов и усилий. Однако, две важные тенденции развития современной индустрии разработки программного обеспечения позволяют по-новому взглянуть на эту проблему. С одной стороны, при постоянном увеличении объема и сложности ПО любые автоматические средства обнаружения ошибок и контроля качества могут оказаться полезными и востребованными. С другой – непрерывный рост производительности современных вычислительных систем позволяет эффективно решать все более сложные вычислительные задачи.

В рамках динамических методов верификации, оценка свойств программной системы осуществляется по результатам ее реальной работы или работы некоторых ее моделей и прототипов. При этом:

1) Имеется возможность контролировать характеристики системы в ее рабочем окружении, которые иногда невозможно достаточно полно проанализировать с помощью других подходов.

2) Системы тестирования, профилирования или мониторинга могут быть сделаны один раз и использоваться многократно для широкого набора однотипных программных продуктов, в данном случае лишь сами тесты необходимо подготавливать отдельно для каждой проверяемой системы.

3) Подготовка тестов на ранних этапах создания программного обеспечения позволяет обнаружить дефекты в описании требований и проектных документах — фактически, разработчики тестов вынуждены в ходе своей деятельности выполнять экспертизу артефактов, служащих основой для тестов.

4) Для применения методов динамического анализа необходимо иметь работающую систему или хотя бы некоторые ее компоненты, поэтому эти методы не получиться использовать на первых стадиях разработки.

5) Динамический анализ обнаруживает в программах только ошибки, проявляющиеся при работе этих программ, а, например, дефекты удобства сопровождения найти не помогут, однако, обнаруженные ошибки обычно считаются более серьезными.

6) Для применения динамического анализа необходима дополнительная подготовка — создание тестов и разработка тестовой системы, позволяющей выполнять созданные тесты, или разработка системы мониторинга, позволяющей контролировать определенные характеристики поведения проверяемой системы.

Одним из методов динамического анализа является метод фаззинг-тестирования. Метод фаззинга заключается в выявлении уязвимостей программного обеспечения путем ввода большого количества наборов входных данных, создаваемых вручную или при помощи фаззера, с последующим отслеживанием возникновения исключений в работе программного обеспечения (аварийных завершений, утечек памяти и т.п.). Программа, выполняющая фаззинг-тестирование, называется фаззером [2].

Точки входа для данных в программу могут быть самые разные: строка текста, введенная через графический интерфейс, бинарные данные из файла, значения полей в сетевом запросе. Вместо программы могут быть драйверы, конфигурационные, текстовые или бинарные файлы или, например, сетевые протоколы.

Также фаззинг-тестирование может применяться в отношении различных модулей исследуемого программного обеспечения, связанных с обработкой входящего сетевого трафика, команд, файлов и др.

В зависимости от способа генерации входных данных фаззинг-тестирование бывает мутационное и генерационное. В ходе мутационного фаззинг-тестирования входные данные формируются в результате «мутаций» эталонных образцов входных данных (перехваченных сетевых пакетов, корректно сформированных входных файлов программы и др.), которые заключаются в выполнении изменения некоторых участков эталонных образов входных данных по заданному алгоритму (в качестве таких изменений могут осуществляться случайное инвертирование битов, перестановка блоков данных, изменение порядка следования блоков данных и др.). В ходе генерационного фаззинг-тестирования формирование входных данных осуществляется в соответствии с заданным форматом данных [3].

В зависимости от наличия исходных текстов, сведений об архитектуре и функциональных возможностях программного обеспечения выделяют три вида фаззинг-тестирования: фаззинг-тестирование черного ящика (сведения о внутреннем устройстве исследуемого программного обеспечения отсутствуют), фаззинг-тестирование серого ящика (имеются неполные сведения о внутреннем устройстве исследуемого программного обеспечения) и фаззинг-тестирование белого ящика (имеются полные сведения о внутреннем устройстве исследуемого программного обеспечения).

В классификации фаззеров также выделяются простые фаззеры (dumb fuzzers) и умные фаззеры (smart fuzzers). Умные фаззеры пытаются получить информацию о структуре тестируемого объекта и на основе полученной информации об объекте изменять подаваемые на вход объекта данные. В отличие от умных фаззеров простые фаззер никак не анализируют структуру тестируемого объекта и подают на вход абсолютно случайные данные.

В качестве примера простого фаззера можно рассмотреть утилиту MiniFuzz, которая выполняет фаззинг файлов. Графический интерфейс программы MiniFuzz изображен на рисунке 1. Данный проект был разработан корпорацией Microsoft для тестирования своих собственных проектов. Дело в том, что использование фаззеров является обязательным этапом методологии SDL, принятой в этой компании для разработчиков безопасного кода. С помощью MiniFuzz можно тестировать любое приложение; главное, чтобы в качестве одного из параметров запуска был указан путь к файлу, который ему необходимо открыть (например, C:\test.exe или D:\winword.doc). Для начала работы необходимо составить выборку из «правильных» файлов, которые корректно воспринимаются тестируемым приложением, и переместить их в каталог, который обозначен в поле Template files, а также выбрать приложение для проверки, указав параметры для его запуска.

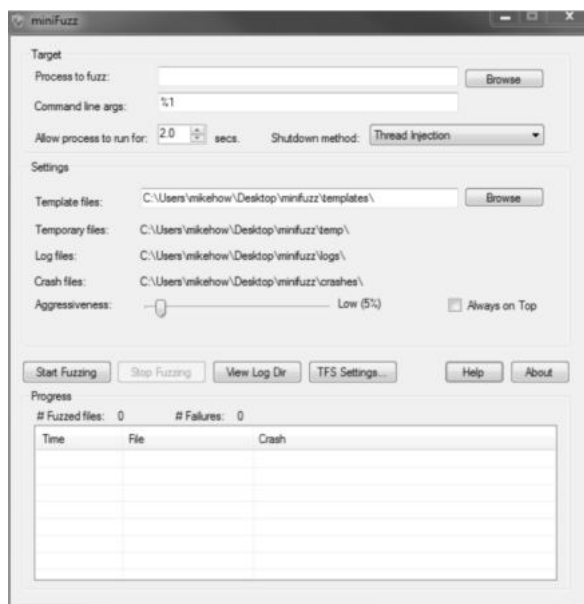


Рис. 1. Графический интерфейс утилиты MiniFuzz

В качестве примера умного фаззера можно рассмотреть программу American Fuzzy Loop. Данный программный продукт позволяет выполнять как генерационное, так и мутационное фаззинг-тестирование, способен использовать заготовленные тесты автоматизировано, а также автоматизировано документировать результаты тестов в виде текстовых отчетов. Также данная программа имеет консольный интерфейс и широкий набор возможностей изменения запуска тестируемой программы. На рисунке 2 изображен интерфейс программы American Fuzzy Loop.

```

american fuzzy lop ++2.59d (main) [explore] {1}
process timing
  run time : 0 days, 0 hrs, 6 min, 0 sec
  last new path : n/a (non-instrumented mode)
  last uniq crash : 0 days, 0 hrs, 0 min, 0 sec
  last uniq hang : 0 days, 0 hrs, 0 min, 15 sec
cycle progress
  now processing : 0/327 (0.00%)
  paths timed out : 0 (0.00%)
stage progress
  now trying : havoc
  stage execs : 84/256 (32.81%)
  total execs : 124k
  exec speed : 333.2/sec
fuzzing strategy yields
  bit flips : 0/1976, 0/1975, 0/1973
  byte flips : 0/247, 0/246, 0/244
  arithmetics : 0/13.8k, 0/25, 0/0
  known ints : 0/1480, 0/6888, 0/10.7k
  dictionary : 0/0, 0/0, 0/0
  havoc/rad : 1954/84.5k, 0/0, 0/0
  py/custom : 0/0, 0/0
  trim : n/a, 0.00%
overall results
  cycles done : 327
  total paths : 1
  uniq crashes : 1
  uniq hangs : 3
map coverage
  map density : 0.00% / 0.00%
  count coverage : 0.00 bits/tuple
findings in depth
  favored paths : 0 (0.00%)
  new edges on : 0 (0.00%)
  total crashes : 1
  total tmouts : 452 (452 unique)
path geometry
  levels : 1
  pending : 0
  pend fav : 0
  own finds : 0
  imported : n/a
  stability : n/a
[cpu001:100%]

```

Рис. 2. Интерфейс программы American Fuzzy Loop

Существенным недостатком фаззинга является чрезвычайно долгое время поиска ошибок (на практике от нескольких дней до нескольких недель, в теории - до бесконечности). Для повышения скорости тестирования предлагается использовать:

- фаззинг-тестирование непосредственно для участков памяти исследуемого программного обеспечения, в ходе которого осуществляется их модификация. В результате такого фаззинг-тестирования осуществляется выявление лишь потенциальных уязвимостей, реальное наличие которых надо подтвердить в ходе дальнейших исследований;
- при проведении фаззинг-тестирования белого ящика - покрытие исходных текстов программы. При оценке покрытия исходных текстов тестируемое ПО собирается со специальными настройками или библиотеками и запускается в особом окружении, в результате чего определяется процент исходных текстов тестируемой программы, который был выполнен в процессе тестирования. Этот процесс позволяет определить части системы, которые при нормальной работе используются редко или никогда не используются. Результаты проверки покрытия можно использовать для изменения тестовых данных подаваемых на вход программы при фаззинг-тестировании. То есть направленность фаззинга будет определяться результатами покрытия исходного текста программы в предыдущих итерациях тестирования.

Фаззинг позволяет определить слабые места в программном обеспечении и предупредить их эксплуатацию в дальнейшем. Усовершенствование данного метода исследования программ на уязвимости является актуальной задачей в области верификации программного обеспечения.

Научный руководитель – к. т. н., доцент Гуцин А. Н.

Библиографический список

1. Смирнова Н. Н. Верификация и тестирование программных систем: учебное пособие / Н. Н. Смирнова; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2014, -65с.
2. Кэргайл Д, Миллер Б. Генератор Фаззинга, *Computer Sciences Technical Report #1268*, "Университет Висконсина в Мэддисоне"; 1988.
3. Саттон М. Грин А. Амини П. Fuzzing: Исследование уязвимостей методом грубой силы, "Символ Плюс". – СПб.-Москва; 2009. – 560 с.

УДК 621.78

ОБЩИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ОБЛАСТЕЙ ДОСТИЖИМОСТИ

А. В. Кириллов

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

Введение

При решении задач управления возникает необходимость оценки возможностей динамической системы (ДС). Для решения этой задачи можно использовать область достижимости (ОД), под которой понимается некоторая область пространства состояния, в которой может оказаться управляемая система в заданный момент T .

Описание области достижимости

Рассмотрим следующую систему

$$\dot{X}(t) = f(t, X(t), U(t)), X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где $X^T = (x_0, x_1, \dots, x_n)$ – n -мерный вектор состояния; $U^T = (u_0, u_1, \dots, u_m)$ – m -мерный вектор управления; $X_0^T = (x_0(t_0), x_1(t_0), \dots, x_n(t_0))$ – n -мерный вектор начальных условий.

На вектор управления накладывается ограничение

$$U \in D, \quad (2)$$

где D – допустимая область возможных управлений.

Областью достижимости управляемой системы в k -мерном пространстве $\{x_0, x_1, \dots, x_k\}$ ($k \leq n$) для начального состояния X_0 в момент T при ограничении на управление (2) называют множество $G(t_0, X_0, U, T)$ точек $q = \{x_0(T), x_1(T), \dots, x_k(T)\}$, в которые возможно перевести систему из начального состояния X_0 в момент времени T за счет выбора вектор-функции управления $U(t)$, удовлетворяющего ограничениям [1].

Аналитический метод построения областей достижимости возможен только для простейших динамических систем, поэтому для получения областей достижимости сложных динамических систем используются численные методы. Рассмотрим данный подход.

Численный метод построения области достижимости.

Построение границы области достижимости проводится по точкам, полученным из решения следующей задачи оптимального управления – поиска управления, обеспечивающего максимальное перемещение по заданному направлению \vec{l} [2]. Критерий оптимальности подобной задачи имеет вид:

$$J = l^T X(T), \quad (3)$$

где $X^T(T) = (x_0(t), x_1(t), \dots, x_n(t))|_{t=T}$.

Для решения задачи используется необходимое условие принципа максимума. При использовании традиционной формы принципа максимума, вместо поиска максимума критерия (3) проводится поиск минимума критерия:

$$J_1 = -J = -l^T X. \quad (4)$$

Функция Гамильтона для системы (1) с терминальным критерием (4) имеет вид:

$$H = \Psi^T f. \quad (5)$$

Решая сопряженную систему уравнений

$$d\Psi_x/dt = -\partial H/\partial x, \quad (6)$$

и учитывая условия трансверсальности

$$[\partial J_1/\partial x + \Psi]_{t=T}^T \delta x_T = 0, \quad (7)$$

где $\delta z_T = [\delta x_0, \delta x_1, \dots, \delta x_n]$, находим решение сопряженной системы в виде:

$$\tilde{\Psi}^T(t) = (\Psi_0(t), \Psi_1(t), \dots, \Psi_n(t)). \quad (8)$$

Представляя функцию Гамильтона (5) следующим образом

$$H = H_1^T U + H_0, \quad (9)$$

где H_0 - слагаемые функции, не содержащие управления и H_1 - слагаемые функции, содержащие управление, а также используя решение сопряженной системы (8) и предположение о том, что на управление не наложено ограничений, найдем оптимальное управление $\tilde{u}(t)$ из следующего равенства

$$\frac{\partial H}{\partial u} \Big|_{u=\tilde{u}} = 0, \quad (10)$$

Решением приведенного выше уравнения (10) является управление $\tilde{u}(t)$, обеспечивающее максимальное перемещение по заданному направлению \dot{l} . Решая систему (1) с использованием найденного управления $\tilde{u}(t)$, получаем точку границы области достижимости по направлению \dot{l} . Для построения кривой, ограничивающей область достижимости, необходимо провести приведенные выше расчеты при изменении направления вектора \dot{l} от 0 до 2π . В зависимости от требуемой точности построения области достижимости, используется разная дискретизация шага при выборе направления. Для иллюстрации данного подхода рассмотрим пример.

Пример

Построим область достижимости в плоскости OXY для следующей системы, описывающей перемещение по плоскости материальной точки с расходуемой массой:

$$\begin{cases} dV_x/dt = R \cos(\vartheta)/m; \\ dV_y/dt = R \sin(\vartheta)/m; \\ dx/dt = V_x; \\ dy/dt = V_y; \\ dm/dt = -R/U_e, \end{cases} \quad (11)$$

где U_e - эффективная скорость истечения газов; R - тяга двигателя; R/U_e - скорость расхода массы; x, y - координаты местоположения, V_x, V_y - компоненты вектора скорости по соответствующим координатам; m - масса материальной точки.

Начальные условия для системы (11)

$$t = t_0; V_x = V_{x_0}; V_y = V_{y_0}; x = x_0; y = y_0; m = m_0. \quad (12)$$

На тягу накладывается ограничение $0 \leq R \leq R_{\max}$.

Используемый критерий оптимальности (4) для системы (11) запишется как

$$J_2 = -\cos(\xi) \cdot x(T) - \sin(\xi) \cdot y(T), \quad (13)$$

где ξ - угол наклона вектора \dot{l} .

Функция Гамильтона (5) приобретет вид:

$$H = \Psi^T f = \Psi_{V_x} \cdot R \cos(\vartheta)/m + \Psi_{V_y} \cdot R \sin(\vartheta)/m + \Psi_x V_x + \Psi_y V_y - \Psi_m \cdot R/U_e. \quad (14)$$

Тогда сопряженная система (6) будет записана следующим образом:

$$\begin{cases} d\Psi_{V_x}/dt = -\partial H/\partial V_x = -\Psi_x; \\ d\Psi_{V_y}/dt = -\partial H/\partial V_y = -\Psi_y; \\ d\Psi_x/dt = -\partial H/\partial x = 0; \\ d\Psi_y/dt = -\partial H/\partial y = 0; \\ d\Psi_m/dt = -\partial H/\partial m = \Psi_{V_x} \cdot R \cos(\vartheta)/m^2 + \Psi_{V_y} \cdot R \sin(\vartheta)/m^2. \end{cases} \quad (15)$$

Первые четыре уравнения имеют решение вида:

$$\begin{cases} \Psi_{V_x}(t) = -C_1 t + C_3; \\ \Psi_{V_y}(t) = -C_2 t + C_4; \\ \Psi_x(t) = C_1 = const; \\ \Psi_y(t) = C_2 = const. \end{cases} \quad (16)$$

Постоянные C_1, C_2, C_3, C_4 находятся из условия трансверсальности (7):

$$\begin{cases} \Psi_{V_x}(T) = 0; \\ \Psi_{V_y}(T) = 0; \\ \Psi_x(T) = \cos(\xi); \\ \Psi_y(T) = \sin(\xi). \end{cases} \quad (17)$$

Применяя (17) к (16) получим

$$\begin{cases} \Psi_{V_x}(t) = \cos(\xi) \cdot (T - t); \\ \Psi_{V_y}(t) = \sin(\xi) \cdot (T - t); \\ \Psi_x(t) = \cos(\xi); \\ \Psi_y(t) = \sin(\xi). \end{cases} \quad (18)$$

Перепишем функцию Гамильтона следующим образом

$$H = \left(\Psi_{V_x} \cdot \cos(\mathcal{G}) / m + \Psi_{V_y} \cdot \sin(\mathcal{G}) / m - \Psi_m / U_e \right) R + H_0,$$

где $H_0 = \Psi_x V_x + \Psi_y V_y$ - слагаемое, не содержащее управления.

Так как на угол \mathcal{G} нет ограничения, то оптимальное значение $\tilde{\mathcal{G}}$ найдем из условия минимума частной производной функции Гамильтона:

$$\partial H / \partial \mathcal{G} \Big|_{\mathcal{G}=\tilde{\mathcal{G}}} = \left(\Psi_{V_x} \cdot \cos(\mathcal{G}) - \Psi_{V_y} \cdot \sin(\mathcal{G}) \right) / m = 0,$$

откуда с учетом (18) получим $tg(\tilde{\mathcal{G}}(t)) = \Psi_{V_y}(t) / \Psi_{V_x}(t) = tg(\xi) = const$, т.е. $\tilde{\mathcal{G}}(t) = \xi = const$.

Рассмотрим изменение $\Psi_m(t)$. Последнее уравнение системы (15) с учетом (18) можно записать следующим образом:

$$d\Psi_m / dt = R / m^2 (T - t),$$

откуда следует отметить, что $d\Psi_m / dt > 0$, но поскольку из условия трансверсальности (7) $\Psi_m(T) = 0$, то $\Psi_m(t) < 0$ при $t_0 \leq t \leq T$.

Тогда функцию Гамильтона можно записать в виде:

$$H(t, X, \mathcal{G}, R) = \left((T - t) / m - \Psi_m / U_e \right) R + H_0$$

Таким образом, для расчета точек на границе ОД нужно двигаться с максимальной тягой, в направлении вектора смещения \vec{l} , т.е. $\tilde{\mathcal{G}} = \xi$.

Изменяя угол ξ от 0 до 2π и интегрируя систему уравнений (12) с $\mathcal{G} = \xi$ при максимальной тяге, получим все точки на границе области достижимости.

Центр области достижимости получим интегрируя систему уравнений (12) с нулевым управлением.

Способы уменьшения количества вычислений

Как было указано ранее, в зависимости от требуемой точности построения области достижимости, используется разная дискретизация шага при выборе направления. С учетом приведенного выше примера можно сделать вывод о необходимости многократного проведения численного интегрирования. Для уменьшения общего количества необходимых расчетов можно применить специальные методы, позволяющие ограничиться малым набором точек границы.

Аппроксимация границы области достижимости методом наименьших квадратов

Данный метод широко распространен [3]. С его помощью можно найти кривую максимально близко подходящую к заданным точкам. В качестве "меры близости" аппроксимирующей функции к "реальным" точкам используется сумма квадратов отклонений

$$\sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 \rightarrow \min,$$

где x_i, y_i - аргумент и значение "реальной" i -ой точки; $f(x_i)$ - значение аппроксимирующей функции в i -ой точке.

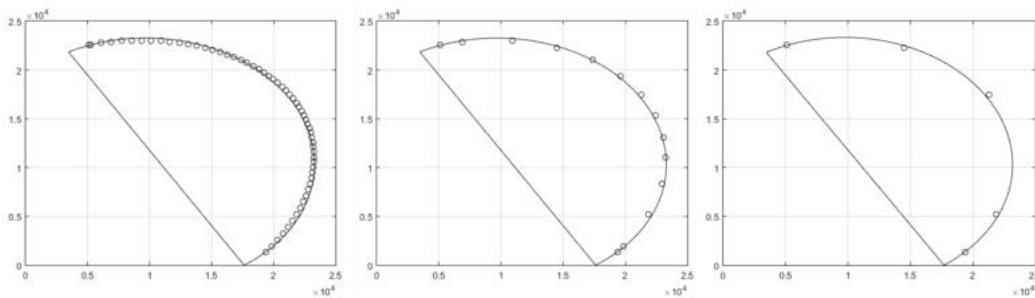


Рисунок 16 "Построение ОД при применении аппроксимации полиномом 3-ей степени по 145-и, 39-и, 5-и точкам"

Следует отметить, что в случае применения критерия вида (3) целесообразно использовать полярную систему координат и представлять аппроксимирующую функцию в виде полинома

$$r(\phi) = a_0 + a_1\phi + a_2\phi^2 + \dots + a_n\phi^n. \quad (19)$$

где a_0, a_1, \dots, a_n - коэффициенты полинома; ϕ, r - угол и радиус полярной системы координат.

Для построения границы ОД необходимо найти коэффициенты полинома (19), для чего решается система линейных уравнений [3], размерность которой зависит от степени используемого полинома n .

На рисунке 1 представлена аппроксимация полиномом 3-степени разного количества граничных точек ОД, полученных численным методом. Можно сделать вывод, что для рассматриваемой ОД уменьшение количества граничных точек при применении аппроксимации незначительно влияет на получаемую границу ОД.

Аппроксимация границы области достижимости сплайном

Существует не одна вариация сплайнов, но каждый из них принципиально является функцией, область определения которой разбита на конечное число отрезков, на каждом из которых используется некоторая базисная функция [4]. Сплайн можно представить как набор отдельных полиномов

$$S(x) = \sum_{i=1}^m a_i B_i(x), \quad (20)$$

где $B_i(x)$ - сплайн-функции; a_i - числовые коэффициенты.

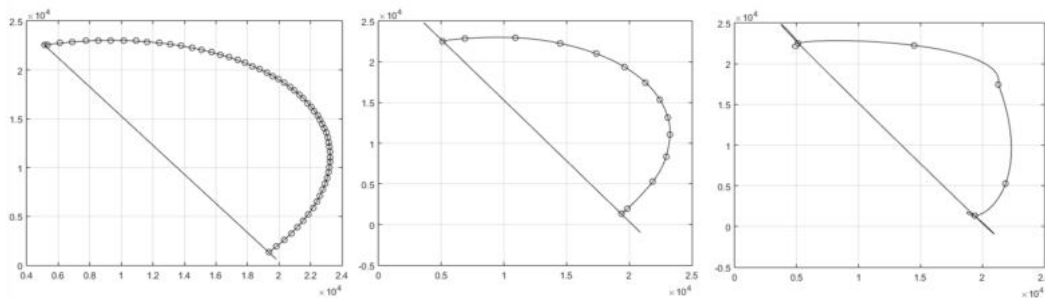


Рисунок 2 "Построение ОД при применении сплайна по 145-и, 39-и, 5-и точкам"

В данном методе для построения ОД необходимо найти как числовые коэффициенты, характеризующие вхождение в итоговую кривую сплайн-функций, так и коэффициенты этих самых сплайн-функций. Таким образом, в случае применения полиномиального сплайна, необходимо производить расчет для k линейных систем полиномов степени n .

Из анализа рисунка 2 следует, что применение сплайна возможно, но при малых значениях граничных точек получаемая кривая, ограничивающая ОД, не отображает в достаточной мере "реальные" точки.

Аппроксимация границы области достижимости эллипсом

Принцип работы заключается в геометрической подгонке методом наименьших квадратов [5] "реальных" точек к соответствующим точкам на эллипсе. На рисунке 3 приведен пример применения эллипса для 12 и 6 расчетных точек.

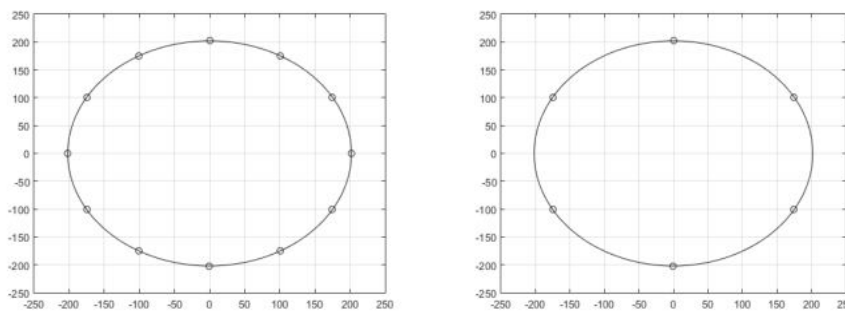


Рисунок 3 "Построение ОД при применении эллипса по 12-и, 6-и точкам"

Анализ показывает, что эллиптическая замена применима лишь для ОД, имеющих вид эллипса, для других следует использовать замену сплайном или аппроксимацию полиномом, заданным в полярных координатах.

Заключение

Таким образом, в данной статье приводится подход к определению областей достижимости и рассматриваются способы их аппроксимаций, позволяющие при применении уменьшить общее количество необходимых вычислений.

Библиографический список

1. Толпегин О. А. Области достижимости летательных аппаратов: учебное пособие. Изд. 2-е, исп. и доп. СПб: БГТУ „Военмех“, 2013. – 141 с.
2. Толпегин О. А. Методы оптимального управления: учебник и практикум для вузов. 2-е изд., исп. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2021. – 234 с.
3. Степанов М. М., Потапова Н. Н., Ерещенко Т. В. Аппроксимация функций. Волгоград: ВолгГАСУ, 2012. – 34 с.
4. Задорожный А. Г., Киселев Д. С. Построение сплайнов с использованием библиотеки OpenGL: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 88 с.
5. Ан С. Дж., Раух В., Геометрическая подгонка круга и эллипса методом наименьших квадратов, Int. J. Распознавание образов. Архив. Интел., том. 13:(7), стр. 987-996, 1999

УДК 629.7.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТА НАГРУЗКИ НА СИЛОВОЙ ГИРОСКОП ОТ ВРАЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М.М. Бойко

Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт командных приборов»

Современная космическая техника имеет высокие требования к проектированию составных частей космических аппаратов (КА), в том числе к точности их систем управления (СУ). Они должны обеспечивать работоспособность в течение длительного времени при минимальных массогабаритных и энергетических характеристиках в условиях невесомости, отсутствия конвективного теплообмена, глубокого вакуума, при значительных ударных и вибрационных воздействиях во время выведения КА на орбиту. Такому ряду требований соответствуют устройства, применяемые для систем управления угловыми движениями КА и систем их ориентации – гироскопические устройства.

Исполнительными органами систем ориентации высокоманевренных спутников являются двухстепенные силовые гироскопы, называемые гиродинами. Комплексы, построенные на их основе, могут создавать требуемые значения кинетического момента и обеспечивать заданный уровень надежности СУ.

Современный гиродин состоит из следующих основных частей:

1. Силовой гироскоп (СГ) с ротором, имеющим постоянную или изменяемую программой скорость вращения, электродвигатель и блок электроники для управления вращением, обеспечивающим необходимую величину кинетического момента ротора \vec{H} ;
2. Исполнительный электропривод (ИЭП), обеспечивающий отработку задаваемой из системы управления КА скорости разворота гироскопа относительно подвеса;
3. Датчик угла с электронным преобразователем, выдающий информацию в блок электроники электропривода и в систему управления КА;
4. Устройство контактное для передачи электропитания на гироскоп для обеспечения неограниченного поворота гироскопа в подвесе.

Кинематическая схема гиродина приведена на рис.1.

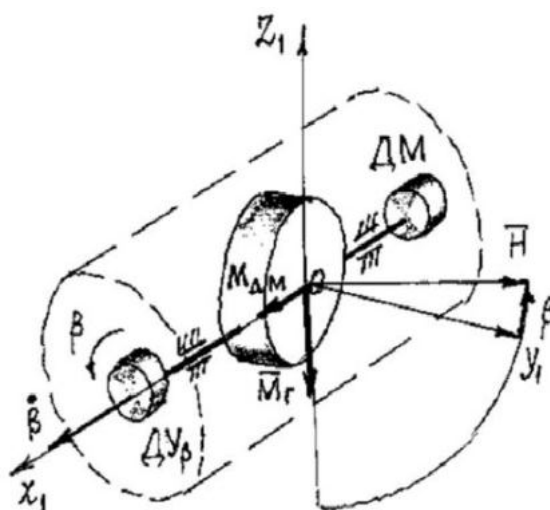


Рис.1 – Кинематическая схема гиродина

Принцип работы заключается в следующем: за счет гироскопического эффекта, возникающего при вращении гироскопа с кинетическим моментом ротора \vec{H} относительно оси подвеса с угловой скоростью ω , задаваемой системой управления, создается управляющий момент, действующий на КА. При этом возникает гироскопический

момент \vec{M}_r , величина которого пропорциональна величине кинетического момента ротора и величине его угловой скорости, следовательно гироскопический момент определяется формулой:

$$|\vec{M}_r| = |\vec{H}| \cdot |\vec{\omega}|. \quad (1)$$

Из этого следует, что, задавая величину угловой скорости подвеса силового гироскопа, обеспечивается необходимая величина управляющего момента, направление которого ортогонально оси вращения подвеса силового гироскопа. С учетом стабильного поддержания кинетического момента ротора гироскопа точность реализации управляющего момента гиродина определяется точностью и быстродействием исполнительного электропривода.

Помимо основной задачи – отработки задаваемой скорости подвеса СГ – к ИЭП гиродина предъявляется требование по удержанию подвеса в неподвижном состоянии при воздействии на него гироскопического момента, вызванного вращением КА по оси подвеса СГ, который является внешним моментом нагрузки на ИЭП. Данный режим работы гиродина может потребоваться, например, при нештатной ситуации, связанной с закруткой КА, или с иными задачами, когда алгоритм управления ориентацией КА требует неподвижного положения СГ, поскольку поворот подвеса в таком режиме может привести ко временной потере управления ориентацией КА.

В данной статье исследуется максимально допустимый момент нагрузки на ИЭП гиродина, позволяющий удерживать подвес СГ в неподвижном положении, в зависимости от скорости вращения КА. Объектом исследования является гиродин из состава КА «Обзор-Р» [2]. Для решения задачи и получения наиболее наглядных результатов применен метод математического моделирования. Модель гиродина разработана в программе MATLAB Simulink.

Математическая модель гиродина состоит из:

- математического описания ИЭП гиродина;
- уравнений движения механической части гиродина – силового гироскопа.

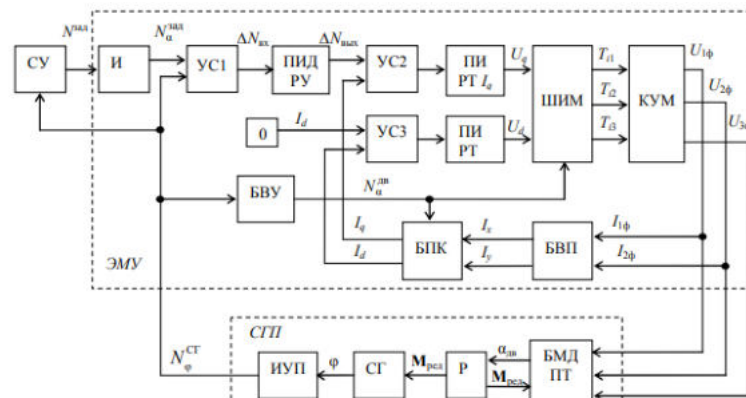


Рис.2 – Структурная схема цифрового ИЭП

Структурная схема ИЭП представлена на рис.2. ИЭП в общем виде состоит из: измерителя углового положения подвеса (ИУП), бесконтактного моментного двигателя постоянного тока (БДПТ), одноступенчатого редуктора и блока управления приводом (БУП). На каждом такте управления в БУП, имеющим контур интеграла скорости и подчиненный ему контур регулирования тока двигателя, определяется величина углового рассогласования между расчетным и измеренным углами поворота подвеса. После проведения преобразований и коррекции информация о рассогласовании поступает в контур регулирования тока двигателя, в котором происходит формирование трехфазных токов на основе данных об угловом положении ротора БДПТ, полученных по информации ИУП. На рисунке 2 приведена структурная схема из [3]. Для цифрового электропривода гиродина (ЦИЭП) приняты следующие обозначения: СУ — система управления; ЭМУ — электронный модуль управления и контроля; И — интегратор; УС (1, 2, 3) — устройство сравнения; ПИД РУ — ПИД-регулятор угла; ПИ РТ — ПИ-регулятор тока; ШИМ — широтно-импульсная модуляция; БВУ — блок вычисления угла; БПК — блок преобразования координат; БВП — блок вычисления проекций; ИУП — измеритель углового положения; СГ — силовой гироскоп; Р — редуктор; БМД ПТ — бесконтактный моментный двигатель постоянного тока.

Уравнение движения механической части гиродина относительно оси подвеса с учетом упругого скручивания оси подвеса в упрощенном виде можно представить следующим образом [4]:

$$\left(\frac{H^2}{C} + J\right) \cdot \ddot{\varphi} = \left(\frac{\alpha_{дв}}{i} - \varphi\right) \cdot C_{ред} - \mu \cdot \dot{\varphi} - M_n, \quad (3)$$

где M_n – момент нагрузки, H – кинетический момент СГ, C – суммарная жесткость элементов конструкции прибора относительно направления гироскопического момента, φ – угол поворота СГ, $\alpha_{дв}$ – угол поворота двигателя, J – момент инерции относительно оси подвеса СГ, $C_{ред}$ – угловая жесткость редуктора, μ – коэффициент вязкого трения при движении относительно оси подвеса СГ, i – передаточное отношение редуктора.

Полученная модель механической части гиродина в программе MATLAB Simulink представлена на рис.3.

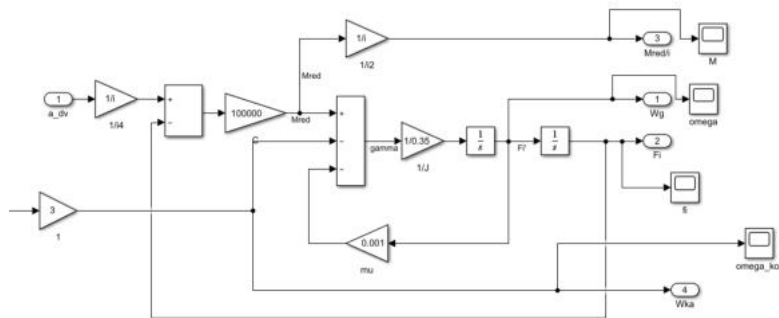


Рис.3 – Упрощенная модель механической части гиродина

Соответствие данной модели реальным характеристикам прибора показано в [4].

Входными параметрами модели были заданная нулевая скорость вращения подвеса СГ $\dot{\phi}$ и линейно увеличивающийся во времени момент нагрузки от скорости вращения КА M_H .

В результате моделирования движения силового гироскопа были получены графические зависимости исследуемых параметров от времени, представленные на рис. 4.

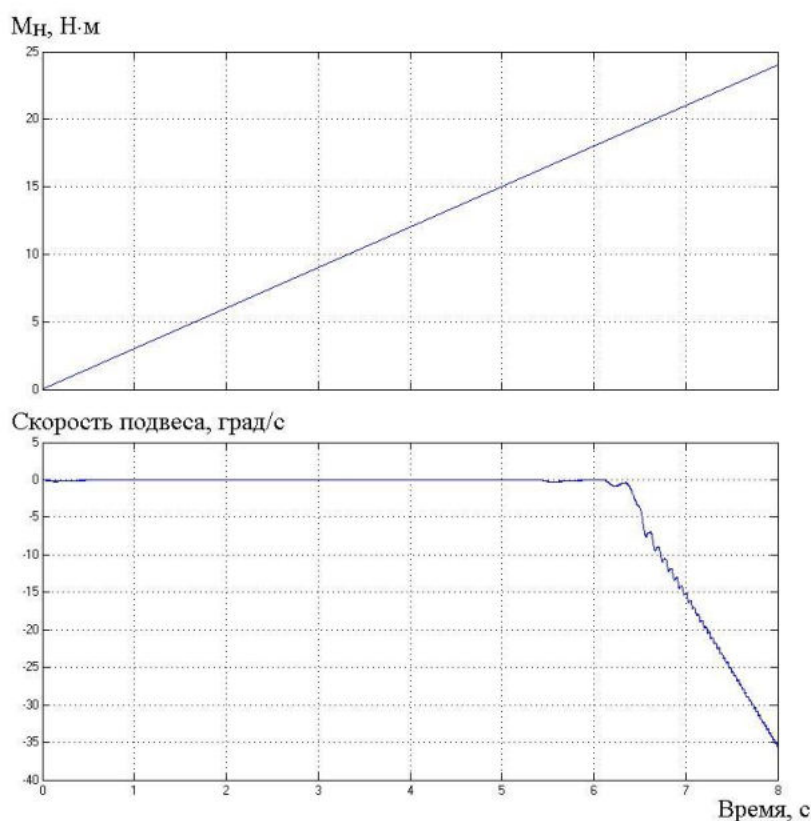


Рис.4 – Результаты моделирования

Здесь ось ординат – численные значения момента нагрузки и скорости поворота подвеса, ось абсцисс – время моделирования. Как видно из рис.4, поворот подвеса происходит при достижении управляющего момента величины 19 Н·м, что соответствует скорости вращения КА по оси подвеса СГ:

$$\omega_{KA} = \frac{M_H}{H} = \frac{19 \text{ Н} \cdot \text{м}}{100 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}} \cdot 57.3 \text{ }^\circ/\text{рад} \approx 11 \text{ }^\circ/\text{с}. \quad (4)$$

Данное значение подтверждает, что рассматриваемый гиродин отвечает предъявленным к нему требованиям по максимальной скорости вращения КА в неподвижном режиме и имеет существенный запас по данному параметру.

Полученные в результате моделирования характеристики и такого рода исследования переходных процессов при возможных нештатных воздействиях позволяют определять наиболее оптимальные параметры гиродина на ранних этапах проектирования и могут использоваться при создании соответствующих систем управления ориентацией КА.

Библиографический список

1. А. В. Сорокин, В. В. Яременко. История создания силовых гироскопов для систем управления ориентацией космических аппаратов // Гироскопия и навигация. Том 30. №1 (116), 2022. С. 84-92. DOI 10.17285/0869-7035.0087

2. Современное состояние и перспективы развития силовых гироскопических комплексов/А.Р. Мкртычян, Н.И. Башкеев, Д.О. Якимовский, Д.И. Акашев, О.Б. Яковец//Гироскопия и навигация. -2015. -№ 1(88). -С. 93-99.
3. Бураков М. В., Яковец О. Б. Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 10. С. 804—809.
4. Яковец О.Б. Вычислительная модель механической части гиродина космического аппарата // Завалишинские чтения 16: сб. докл. / ГУАП. СПб., 2016. С. 307-310.

УДК 629.7.054.07

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В. П. Наумченко, П. А. Илюшин, Д. Г. Пикунов, А. В. Соловьёв
 Филиал АО «ЦЭНКИ» - «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»

Одна из особенностей применения инерциальных навигационных систем (ИНС) заключается в необходимости наличия информации о начальных координатах, скорости и углах ориентации объекта. Эта задача может быть решена различными способами, среди которых выделяют автономную выставку, трансферную выставку по базовой ИНС и выставку при помощи корректирующих устройств, например, по спутниковой навигационной системе [1]. Реализовать последние два способа не всегда возможно по ряду причин, к которым могут относиться ограничения по массе и габаритам или наличия помех. В таком случае необходимо прибегать к первому способу, причем следует уделять особое внимание определению начальных углов ориентации в связи с необходимостью построения базовой системы координат (инерциальной, географической и др.) на борту объекта с высокой точностью. Существующие методы автономной выставки хорошо изучены и широко описываются в технической литературе [2-4] и основываются либо на измерении не менее двух неколлинеарных векторов – вектора ускорения свободного падения и вектора угловой скорости вращения Земли для БИНС, либо на физическом приведении платформы в плоскости горизонта и истинного меридиана для платформенных ИНС и БИНС на подвижном поворотном основании.

В рамках настоящей работы рассматривается алгоритм определения начальных углов ориентации ИНС платформенного класса и БИНС на поворотном основании с применением аппарата статистической многофакторной оптимизации. Ранее был рассмотрен подход построения алгоритма гирокомпасирования на базе методов одномерной безусловной оптимизации [5]. Однако этапу гирокомпасирования предшествует этап горизонтирования, когда платформа стремится совместить оси приборной системы координат (по которым ориентированы оси чувствительности (ОЧ) датчиков) с осями базовой, что при значительном начальном рассогласовании базовой и приборной систем координат неизбежно увеличит время совмещения соответствующих осей. Кроме того, большое рассогласование вызовет рост управляющего сигнала на механизм стабилизации платформы, что ухудшит динамику переходного процесса - приведет к перерегулированию, колебательному характеру переходного процесса и увеличению времени выставки.

С целью снижения времени выставки, повышения точности и качества динамических характеристик системы можно проводить этапы горизонтирования и гирокомпасирования параллельно, решая задачу пространственной оптимизации положений ОЧ датчиков. По измеренным проекциям ускорения свободного падения на ОЧ акселерометров и угловой скорости вращения Земли на ОЧ гироскопов, строится алгоритм на базе методов статистической многофакторной оптимизации, который формирует управляющие сигналы на механизм стабилизации платформы для ее приведения в положение, удовлетворяющее условию оптимальности алгоритма. Под критерием оптимальности может пониматься минимизация показаний горизонтальных акселерометров и комплексная оптимизация путем сравнения показаний тройки гироскопов. Аналитически алгоритм может представлять из себя систему конечных или дифференциальных уравнений с набором решений, удовлетворяющих критерию оптимальности.

Переориентацию платформы в пространстве за минимальное время рассмотрим в виде динамических уравнений Эйлера:

$$\begin{cases} J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z = M_x \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z = M_y \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y = M_z \end{cases} \quad (1)$$

где J_x, J_y, J_z – моменты инерции по связанным осям платформы $J_x \neq J_y \neq J_z$; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости на связанные оси платформы; M_x, M_y, M_z – компоненты управляющего момента вдоль этих осей.

При этом, на компоненты управляющего момента накладываются ограничения во избежание перерегулирования:

$$|M_x| \leq M_{x_m}, |M_y| \leq M_{y_m}, |M_z| \leq M_{z_m}. \quad (2)$$

Пусть разворот происходит с угловой скоростью ω вокруг оси Эйлера, неподвижной в пространстве. Представим проекции угловой скорости через направляющие косинусы этой оси в связанной приборной системе координат:

$$\omega_x = \omega \mu_x, \omega_y = \omega \mu_y, \omega_z = \omega \mu_z. \quad (3)$$

что позволяет записать систему (1) в виде:

$$\begin{cases} J_x \mu_x \dot{\omega} + (J_z - J_y) \mu_y \mu_z \omega^2 = M_x \\ J_y \mu_y \dot{\omega} + (J_x - J_z) \mu_x \mu_z \omega^2 = M_y \\ J_z \mu_z \dot{\omega} + (J_y - J_x) \mu_x \mu_y \omega^2 = M_z \end{cases} \quad (4)$$

И если теперь через φ обозначить угол разворота платформы относительно неподвижной оси по аналогии с (3), можно (4) представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \omega \\ \dot{\omega} = A\omega^2 + B\omega \end{cases} \quad (5)$$

где

$$A_x = \frac{J_y - J_z}{J_x \mu_x} \mu_y \mu_z; \quad A_y = \frac{J_z - J_x}{J_y \mu_y} \mu_x \mu_z; \quad A_z = \frac{J_x - J_y}{J_z \mu_z} \mu_x \mu_y; \\ B_x = \frac{1}{J_x \mu_x}; \quad B_y = \frac{1}{J_y \mu_y}; \quad B_z = \frac{1}{J_z \mu_z} \quad (6)$$

Требуется найти такое управление $M_x(t), M_y(t), M_z(t)$, которое с учетом (2) осуществит перевод системы (5) из начального состояния $\varphi(0) = const, \omega(0) = 0$ в конечное $\varphi(t) = 0, \omega(t) = 0$ за минимальное время. Критерий оптимальности запишется в виде:

$$J = \int_0^T (1 + f(\varphi, \omega, t)) dt \quad (7)$$

На основе необходимых условий оптимальности можем записать структуру оптимального управления и запишем гамильтониан в виде:

$$H = 1 + \psi_1 \omega + \psi_2 (A\omega^2 + BM) \quad (8)$$

Основа задачи оптимизации заключается в обращении в минимум гамильтониана (8) при наличии ограничений (2). В процессе решения оптимизационной задачи по минимизации (8) в общем случае образуется многоугольник допустимых элементов управления и определяются совокупность элементов управления, соответствующих оптимальной координате многоугольника. Итак, структура оптимального управления определена и, интегрируя (5) при найденном управлении с момента $t = 0$ до момента $t = T$, можно привести платформу в плоскость горизонта и истинного меридиана.

На рисунках 1-3 приводятся графики изменения углов ориентации платформы, причем на рисунке 1 изображен график при классическом способе выставки. Как видно процесс значительно затянут и составляет около 400 с для горизонтальных углов и 600 с для курсового угла.

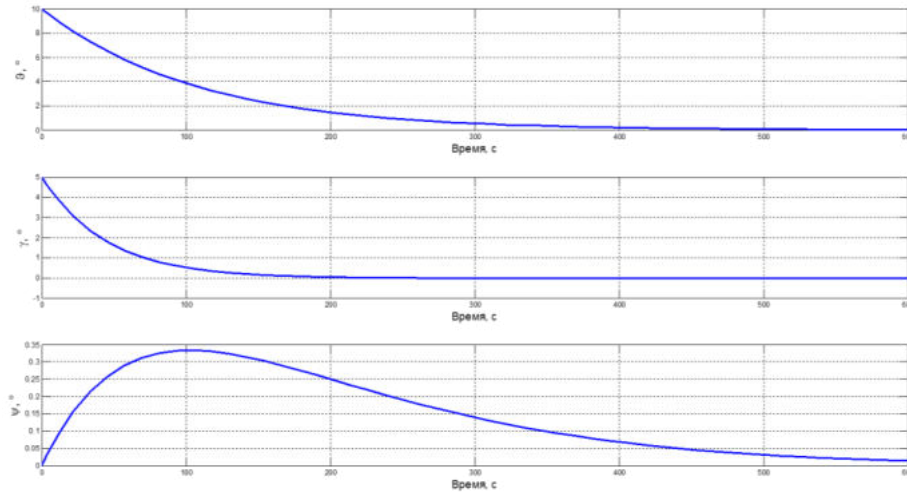


Рисунок 1 – Переходный процесс при обычной выставке

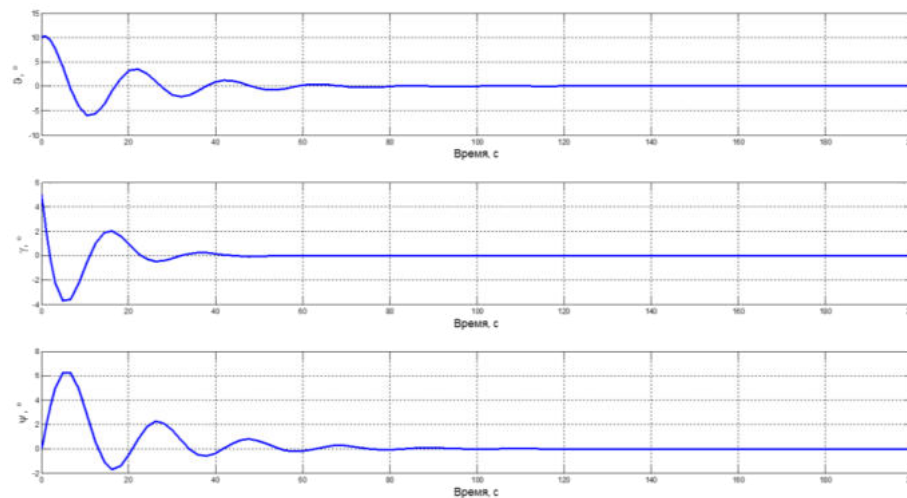


Рисунок 2 – Переходный процесс при ускоренной выставке

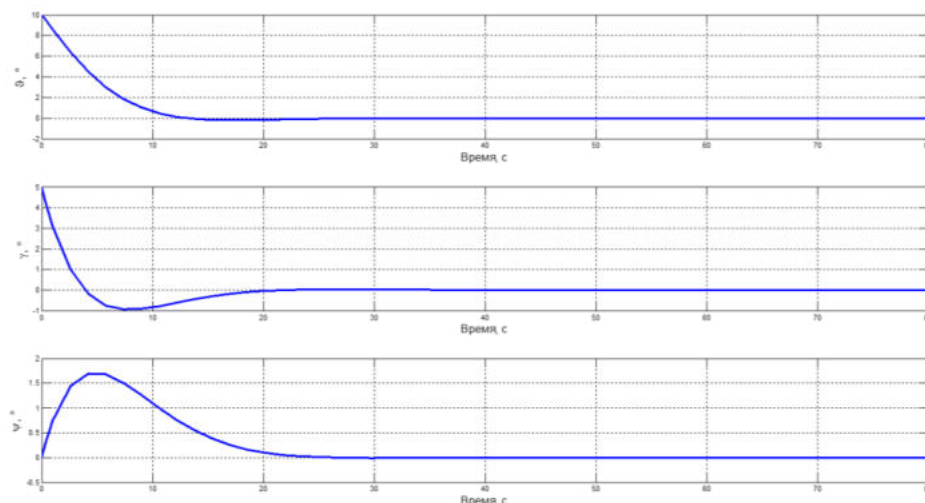


Рисунок 3 – Переходный процесс по рассматриваемому алгоритму

На рисунке 2 приводится изменение углов ориентации в ускоренном режиме выставки, когда подается большой управляющий сигнал на механизм стабилизации платформы, что приводит к увеличению скорости выставки до 80 с для горизонтальных углов и до 100 с для курсового угла, но и к повышению перерегулирования и колебательности.

На рисунке 3 приводится изменение углов ориентации при выставке с использованием рассматриваемого алгоритма. Видно уменьшение перерегулирования и колебательности, а также увеличение быстродействия до 20 с для горизонтальных углов и до 30 с для курсового угла.

На рисунке 4 изображена функциональная схема системы Платформа–ИИБ–ЦВМ. Как видно из рисунка, сигналы с блока акселерометров и гироскопов, образующих инерциальный измерительный блок, поступают в центральную вычислительную машину, где на их основе происходит решение оптимизационной задачи, в результате которой формируются оптимальный шаг поворота платформы в пространстве и сигналы управления на контур стабилизации платформы. В конечном итоге платформа приходит в плоскость горизонта и истинного меридиана, тем самым снимая неопределенность в определении параметров ориентации объекта.

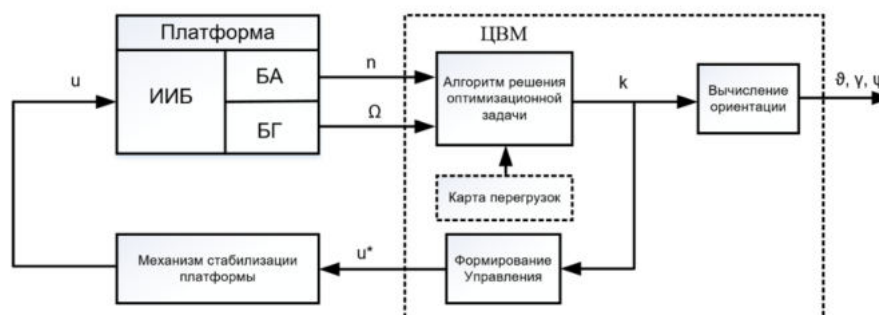


Рисунок 4 – Функциональная схема системы

Достоинством рассматриваемого алгоритма является возможность применения широкого арсенала методов оптимизации – методы классического анализа, множители Лагранжа, вариационное исчисление, динамическое программирование, принцип максимума, линейное и нелинейное программирование.

Основная сложность реализации алгоритма состоит в необходимости решения оптимизационной задачи в условиях измерительных шумов и возмущений. К основным возмущающим факторам, в первую очередь, следует отнести колебания объекта, возникающие, например, вследствие работы двигательной установки; собственные шумы измерительных датчиков. Их количественные характеристики должны включаться в вектор ограничений при решении оптимизационной задачи. В самом простом случае вектор состояния будет включать углы ориентации ИНС – курс, тангаж и крен, но для увеличения точности решаемой задачи имеет смысл расширения вектора состояния угловыми скоростями и ускорениями.

Такой подход открывает широкие возможности для определения начальной ориентации ИНС, позволяя на основе множества оптимизационных методов формировать облик алгоритма выставки, удовлетворяющего требуемым критериям качества.

Библиографический список

1. Салычев О.С., Мкртчян В.И. Подходы к выставке на подвижном основании для бесплатформенной инерциальной навигационной системы авиационного типа различного класса точности // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. №11 (83). С. 1–10.
2. Липтон А. Выставка инерциальных систем на подвижном основании, главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», М., 1971, 168 с.

3. Броксмейер Ч. Ф. Системы инерциальной навигации / Пер. с англ. канд. техн. наук М. И. Малтинского [и др.]; Под ред. д-ра техн. наук С. С. Ривкина. - Ленинград: Судостроение, 1967. - 279 с.
4. Ривкин С.С., Ивановский Р.И., Костров А.В. Статистическая оптимизация навигационных систем. – М.: Судостроение, 1976.
5. Наумченко В.П. Построение алгоритма гирокомпасирования на основе методов одномерной безусловной оптимизации при помощи гирокомпаса аналитического типа с ДУС // XLVII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2021». Москва. Сборник тезисов докладов, – М.: МАИ, 2020. С. 230 – 231.

УДК 004.422.52

ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ДАННЫХ В СПЕЦИАЛЬНОМ МАТЕМАТИЧЕСКОМ И ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ СИСТЕМ АНАЛИЗА, ОПТИМИЗАЦИИ, УПРАВЛЕНИЯ, ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Елизов М. Ю.

АО «Концерн ВКО «Алмаз - Антей»

Аннотация: рассматривается способ реализации на языке C++(Qt), распределения вычислительных ресурсов по потокам с асинхронным доступом к потокам.

Ключевые слова: Qt, потоки данных, автоматизированные системы, универсальный метод.

При проектировании программных комплексов сложных технических систем управления и обработки данных одной из наиболее трудных задач, решаемой конструкторами, является задача разработки архитектуры программного обеспечения как совокупности прикладных программ, функционирующих в виде параллельных потоков.

Для создания программ работающих с потоками данных, как в библиотеке Qt, так и в других библиотеках имеются соответствующие классы, позволяющие организовать многопоточную обработку данных в соответствии с задачами автоматизированных систем управления [1].

Однако, при наличии большого количества потоков или, что еще хуже, при их существенном различии по своему прикладному назначению, приходится расширять реализацию классов, порой в несколько раз, за счет введения членов классов, определяющих индивидуальные особенности применения каждой реализации.

Помимо этого, создаётся потребность в трате дополнительных ресурсов на постоянный контроль исполняемого потока для своевременного получения результатов его работы и продолжения выполнения основного алгоритма. Эта задача возлагается на разработчика прикладной части программного обеспечения и при более детальном рассмотрении, оказывается не такой простой.

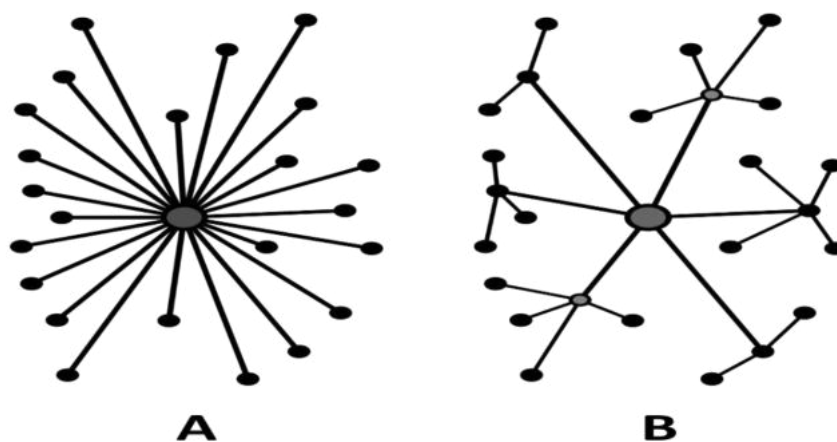


Рис. 1. Подход к реализации (А – централизованный подход, В – децентрализованный подход)

В данной статье предлагается один из вариантов создания множества потоков, позволяющий программистам освободиться от части рутинных задач организации потоков.

Упрощенно, идея перехода показана на рисунке 1. Освободившись от необходимости учета дополнительных связей, рисунок 1В, планируется сократить трудозатраты на описание каждого потока в отдельности и обеспечить единый контроль всех потоков. Применение предлагаемого способа разработки позволяет ограничиться реализацией только связей, показанных на рисунке 1А.

Сущность реализации состоит в следующем.

В архитектуре программного модуля решения данной задачи (Рисунок 2) применяется три основных действующих компонента: объекты инициаторы, менеджер потоков и контролируемые потоки.

"Менеджер потоков" является ядром универсального программного интерфейса организации и контроля потоков. Имеет права и обязанности по контролю за создаваемыми потоками, но не имеет прав владельца потока (прав, позволяющих самостоятельно открывать потоки, уничтожать или закрывать их досрочно, определять порядок распоряжения результатами потока).

Объекты инициаторы (с левой стороны) представляют собой объекты, в которых возникла необходимость создания отдельного потока для выполнения набора каких-либо задач.

Контролируемые потоки (правая сторона схемы) - это процессы (потоки процесса) созданные непосредственно менеджером потоков по запросу объекта инициатора. Каждый инициатор может запустить несколько потоков и

выполнять в них несколько задач. Количество объектов инициаторов (N) и создаваемых потоков (M) ограничивается только принципом минимальной необходимости и доступных ресурсов системы.

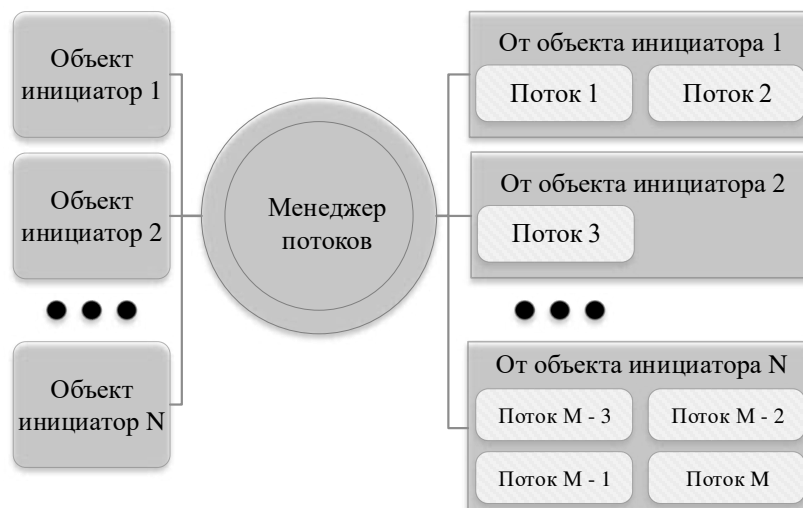


Рис. 2. Схема организации менеджера потоков

Менеджер потоков (Листинг 1), выполняет функции доступа к потокам, контроля за состоянием каждого потока, управления содержимым потоков, а также созданием и удалением потоков. Для доступа к потокам каждому присваивается универсальный уникальный идентификатор, который используется как ключ для управления.

Листинг 1 Менеджер потоков

```
class Thread_Manager
{
    Q_OBJECT
public:
    Thread_Manager();
    //Запустить поток и получить идентификатор потока
    quint8 startThread (QObject * threadClass, QObject * threadParent = 0)
    {
        //Получение свободного индекса
        quint8 threadId = findThreadId();
        //Объявляется поток
        QThread childThread = new QThread();
        //Отправка информации в поток
        connect(this, SIGNAL(sendData(quint8, quint8, QVariant)),
            newTransfer, SLOT(sendToThread(quint8, quint8, QVariant)));
        //Отправка информации из потока
        connect(newTransfer, SIGNAL(readFromThread(quint8, quint8, QVariant)), this,
            SLOT(transmitData(quint8, quint8, QVariant)));
        //Перемещение Класса от объекта инициатора в поток
        child->moveToThread(childThread);
        //Добавление потока в список
        threadMap.insert(threadId, childThread);
        //Запуск потока
        childThread->start();
    };
    //Остановить поток по ид
    void stopThread(quint8);
    //Получить поток по ид
    QObject * getThread(quint8);
public slots:
    //Получить команду из потока
    void transmitData(quint8 threadId, quint8 messageId, QVariant message)
    {
        emit readData(threadId, messageId, message);
    };
signals:
    //Отправить в поток команду
    void sendData(quint8 threadId, quint8 messageId, QVariant message);
    //Переслать команду отправителю из потока
    void readData(quint8 threadId, quint8 messageId, QVariant message);
private:
    //Список потоков запущенных из программы
```

```

 QMap<quint8, QObject *> threadMap;
 //Поиск свободного индекса
 quint8 findThreadId(quint8 prevID = 0)
 {
     //Если индекс существует берется следующий
     if (threadMap.contains(prevID))
     {
         prevID ++;
         prevID = findThreadId(prevID);
     };
     return prevID;
 };
 };
 
```

Контроль заключается в отслеживании состояния потока и сигнализации об изменении его состояния. Управление содержимым осуществляется с помощью вызова специальных функций `sendData` и `readData` (Листинг 1) для отправки информации в поток и получения данных из хранилища результатов выполнения задач, выполняемых в потоках. Для организации взаимодействия применяется сигнально-слотовая система, входящая в состав фреймворка Qt [2].

При создании потоков производятся все необходимые действия, чтобы они были управляемыми и можно было отследить их состояние. Если поток не удастся запустить, то выдается соответствующий сигнал состояния и не присваивается универсальный уникальный идентификатор потока. При необходимости прервать выполнение задачи в потоке пользователь может вызвать команду завершения потока, кроме того, имеется возможность установки условия автоматического закрытия потока при получении значения состояния, что задача завершена.

Рассмотрим реализацию предложенного варианта создания потоков на примере организации сетевого взаимодействия программных средств.

Рассматриваемый пример является частным случаем применения потоков с присущими ему особенностями, но с сохранением базовых понятий построения потоковой архитектуры программы. При обработке данных в сети на рисунке 3 показана возможность использования универсального интерфейса, для поддержания связи основной программы с потоком. Каждая реализация интерфейса содержит служебные данные такие как уникальный идентификатор и статус потока. Программные средства интерфейса позволяют погрузить необходимый класс в поток и общаться с ним по сигнал-слотовой технологии [3].

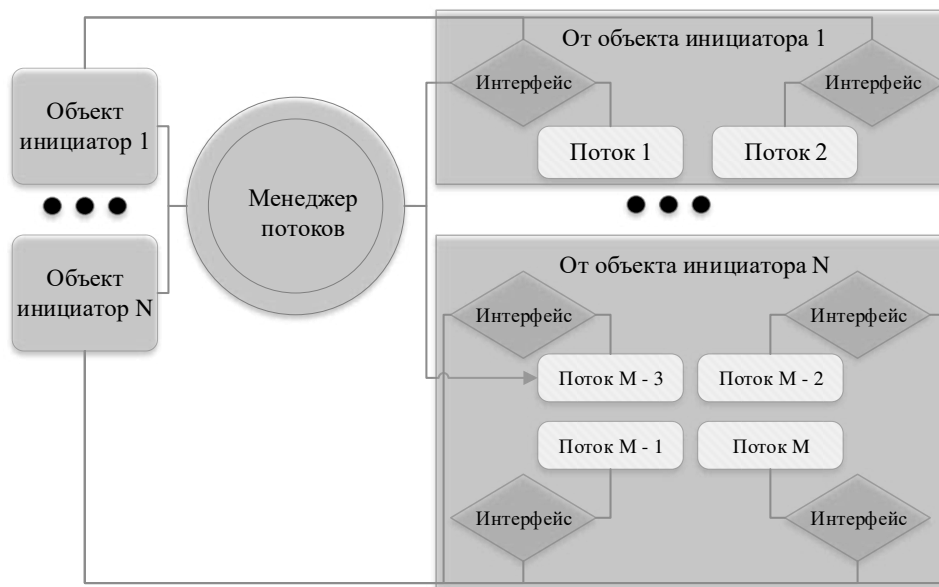


Рис. 3. Схема организации потоков с интерфейсом для каждого потока

Для доступа к функциям в потоке создается дополнительный класс (Листинг 2), который содержит специальные методы для связи с интерфейсом. От него наследуется класс, передаваемый в поток, чтобы связать предопределенные функции сигналов (`readFromThread`, `sendData`) и слотов (`sendToThread`, `readData`), связывающих систему. Назначение этих функций состоит в обеспечении возможности подключения к менеджеру потоков и интерфейсу функциональных программных модулей базовой программы, использующей потоки.

Листинг 2 Вспомогательный класс для связи с интерфейсом

```

 class Thread_Controller : public QObject
 {
     Q_OBJECT
 public:
     Thread_Controller(QObject *parent, QObject *child, quint8 threadId) :
     QObject(parent), curId(threadId)
     {
         //Объявляется поток
         childThread = new QThread();
     }
 
```

```

//Если объявлен объект инициатор
if (parent != 0) {
    //Отправка информации в поток
connect(parent, SIGNAL(sendData(quint8, QVariant)), child, SLOT(readData(quint8, QVariant)),
Qt::DirectConnection);
    //Отправка информации в объект инициатор
connect(child, SIGNAL(sendData(quint8, QVariant)), parent, SLOT(readData(quint8,
QVariant)), Qt::DirectConnection);
}
//Отправка информации в поток
connect(this, SIGNAL(sendData(quint8, QVariant)), child, SLOT(readData(quint8, QVariant)),
Qt::DirectConnection);
//Отправка информации в интерфейс
connect(child, SIGNAL(sendData(quint8, QVariant)), this, SLOT(readFromThread(quint8,
QVariant)), Qt::DirectConnection);
//Перемещение Класса от объекта инициатора в поток
child->moveToThread(childThread);
//Запуск потока
childThread->start();
};
~Parent_Thread()
{
    childThread->quit();
};
QThread * childThread;
quint8 curId;
public slots:
//Отправить команду в поток из коре
void sendToThread(quint8 threadId, quint8 messageId, QVariant message)
{
    if (threadId == curId) emit sendData(messageId, message);
};
//Получить команду из потока
virtual void readData(quint8 messageId, QVariant message)
{
    emit readFromThread(curId, messageId, message);
};
signals:
//Отправить команду в поток
void sendData(quint8 messageId, QVariant message);
//Получить команду из потока в коре
void readFromThread(quint8 threadId, quint8 messageId, QVariant message);
};

```

Таким образом, появляется возможность перемещать программные объекты в разные потоки, что позволяет ускорить реализацию разделения процесса вычислений на потоки.

Возможность организации централизованного управления потоками и контроль их выполнения позволяет повысить надежность программного обеспечения в ходе распараллеливания задач управления сложными технологическими процессами.

Изложенный способ организации архитектуры программного обеспечения, выполняющего многозадачные режимы управления на основе разделения процесса вычислений на параллельные потоки, применялся при разработке составных частей программного обеспечения в рамках перспективных работ предприятия.

Библиографический список

1. Статья «QThread - Are You Doing It Wrong?», David Johnson, 2014, qt developer days
2. Qt Documentation: Thread Support in Qt [Электронный ресурс] . URL: <https://doc.qt.io/qt-5/> (дата обращения: 27.11.21)
3. Шлее М., Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++. - СПб.:БХВ-Петербург, 2018. - 1072 с.: ил.

УДК 629.7.05

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ СЕРВИСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ТЕРРИТОРИИ АЭРОДРОМА

А.С. Кошкарлов, В.С. Семенова

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Процесс руления для любого воздушного судна (ВС) является сложным маневром, сопровождающимся повышенным риском столкновения с различными препятствиями на взлетно-посадочной полосе: сервисная техника (СТ), другие воздушные судна. Повышение безопасности данного процесса необходимо не только во время высокой загруженности аэропортов, но и в период плохих метеоусловий. В качестве решения данной проблемы предлагается объединить различные типы датчиков в системе, транслирующей обстановку за ВС и выдающей предупредительные команды экипажу в случае риска столкновения.

Основные предпосылки к разработке. Целесообразность гиперавтоматизации процессов движения ВС и сервисной техники на территории аэродрома объясняется следующим. Проведенный анализ состояния безопасности полетов по информационным бюллетеням (рис. 1) показал, что отсутствие полной информации о внешней обстановке за бортом ВС и СТ при их рулении на аэродроме в неблагоприятных погодных условиях ежегодно приводит к 20% от всех инцидентов, происходящих с ВС на земле в процессе их обслуживания.

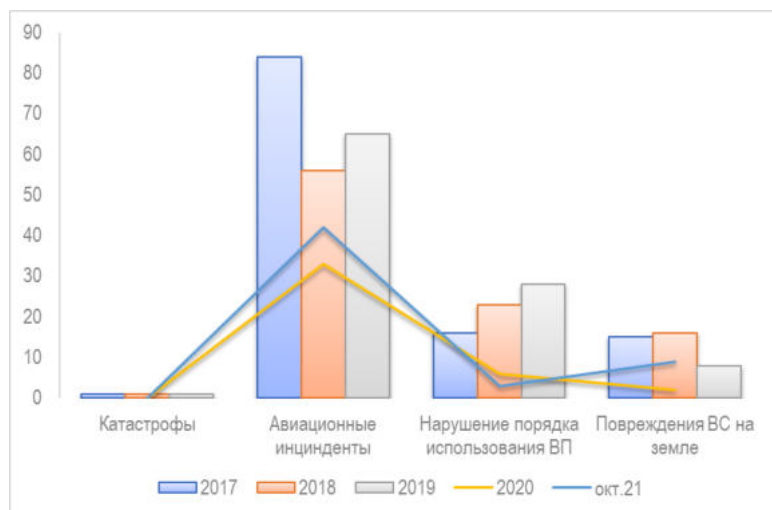


Рис. 1. Сравнительный анализ состояния безопасности полетов за 2017-2021 год

Причиной неполной информации об обстановке на маршруте движения является ряд факторов:

- человеческий фактор, сопровождающийся низким «ситуационным пониманием» [1] экипажа обстановки за бортом и недостаточно быстрое принятие решение в нештатных ситуациях;
- фактор окружающей среды, объясняемый отсутствием системы, работающую при любых погодных условиях и выдающей информацию с высокой точностью в условиях низкой видимости;
- проблема цифровизации, заключающаяся в отсутствии внедрения технологий, применяемых в автопилотах автомобилей и поездов;
- технологический фактор, заключающийся в отсутствии элементной базы, технологических разработок отечественного производства для создания ассистирующей системы.

Также, существующие системы введения запретных зон на основе спутниковой навигации имеют ограниченный функционал, который не позволяет действовать на самой взлетно-посадочной полосе. Перечисленные проблемы приводят к временному выходу ВС из эксплуатации и повышению загруженности в аэропортах. Проводимые в работе исследования направлены на повышение безопасности полетов, оптимизацию загруженности трафика аэродрома, совершенствование логистики грузовых авиаперевозок за счет совместного использования в структуре усовершенствованной системы визуального управления воздушным судном и сервисной техникой оптических и радиолокационных датчиков.

Анализ типовых опасностей и аварийных ситуаций. При рассмотрении типовых опасностей и аварийных ситуаций во время руления ВС, было выделено два полярных варианта движения: первый, когда оба участника движутся прямолинейно и второй: их криволинейное движение (рис.2). Эти ситуации являются полярными: самой простой и самой сложной для движущихся средств, остальные будут промежуточными комбинациями.

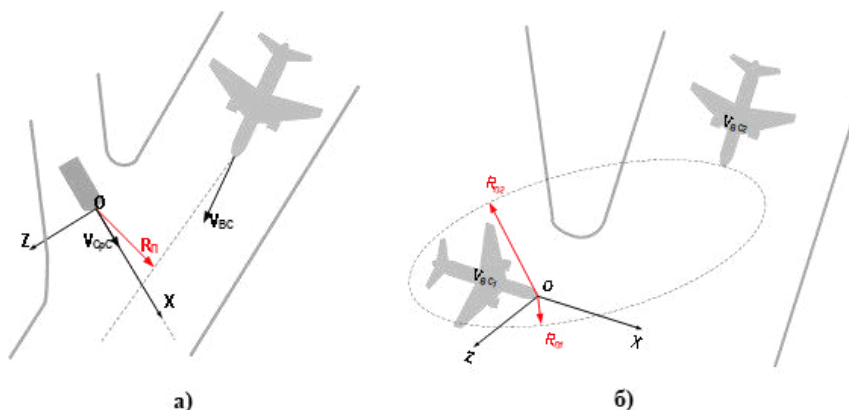


Рис. 2. Варианты движения двух воздушных судов на аэродроме: а) вид сверху основных соотношений при встречном прямолинейном движении ВС и сервисного средства; б) вид сверху основных соотношений при встречном криволинейном движении ВС и сервисного средства

Для этих крайних ситуаций были определены [2] условия сближения по изменению приращения координат:

$$\sqrt{(x_{i+1})^2 + (z_{i+1})^2} < \sqrt{(x_i)^2 + (z_i)^2}$$

и предельный радиус обгивания препятствия:

$$R_0 > R_{mc} + R_n,$$

где R_{mc} – характерный радиус транспортного средства, R_n – характерный радиус препятствия.

На основе оценивания предложенных параметров в контролируемой зоне движения будет приниматься решение о наличии опасной ситуации и далее – меры к её парированию. Таким образом, предлагаемый принцип автономного управления ВС или сервисным средством на территории аэродрома характеризуется как рефлекторно-агрегированный, т.е. с заданной частотой дискретизации осуществляется измерение параметров, оценивание ситуации в контролируемой зоне движения и выдача (или невыдача) управляющих команд на исполнительные органы движения/остановки.

Операция распознавания опасной ситуации осуществляется с частотой поступления данных от внешних датчиков. Исходными данными для данной операции являются:

- результаты одномоментных измерений координатной информации от НАП ГЛОНАСС;
- массива наблюдений от лидара и видеокамеры/стереокамеры на текущий момент;
- результатов срабатывания датчиков, означающих обнаружение препятствий, однозначно влекущих ту или иную исполнительную команду управления.

Введение в схему предварительной обработки по видам датчиков обусловлено двумя причинами:

- 1) сокращением и распараллеливанием вычислений по данным множества сенсоров;
- 2) наличием достоверного встроенного программного обеспечения производителя, настроенного на классификацию ряда объектов, которые подходят к решению нашей задачи.

Основная операция принятия решения функционирующей ассистирующей системы автономной навигации (АСАН) – это автоматическая классификация, а основная задача при макетировании: синтез системы автоматической классификации в доступных программно-аппаратных средах.

Организация функциональных связей внутри АСАН представлена на рис. 3 [3].

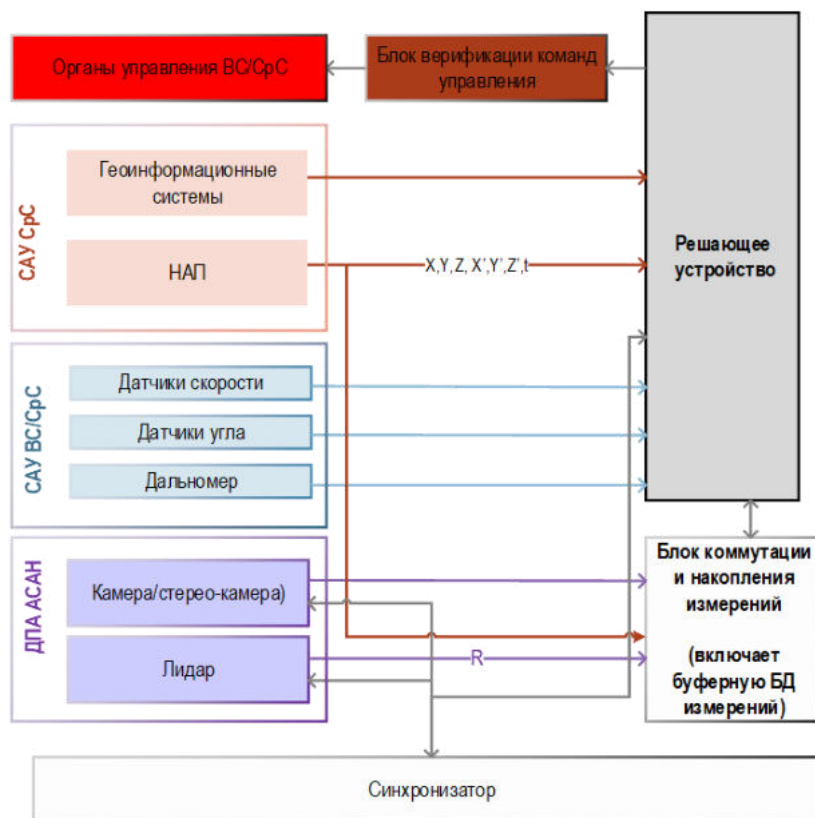


Рис. 3. Схема функциональных связей датчиков, систем, решающего устройства и органов управления воздушным средством или сервисным средством

Цветом на представленной схеме показаны три типа источников информации: данные о характеристике движения, поступающие от датчика скорости, угла и дальномера. Данные о фоновой обстановке, которые поступают от геоинформационных систем (цифровая карта аэропорта) и от навигационной аппаратуры потребителя, независимо формирующая данные о траектории движения ВС и его местоположении. Датчики контролируемой зоны, представляемые пассивным типом устройства: стерео-камерой и активным лидаром.

Измерения поступают в блок коммутации и накопления измерений и далее в блок принятия решений, где происходит классификация опасных ситуаций. Далее по результатам классификации происходит выработка управляющих команд и через блок верификации (для обеспечения кибербезопасности и НСД) поступает на органы управления, изменяющие параметры работы двигательной установки или параметры руления.

Проработка предложенного алгоритма частично была начата на базе самоходной робототехнической платформы, структура которой схематично представлена на рис. 4.

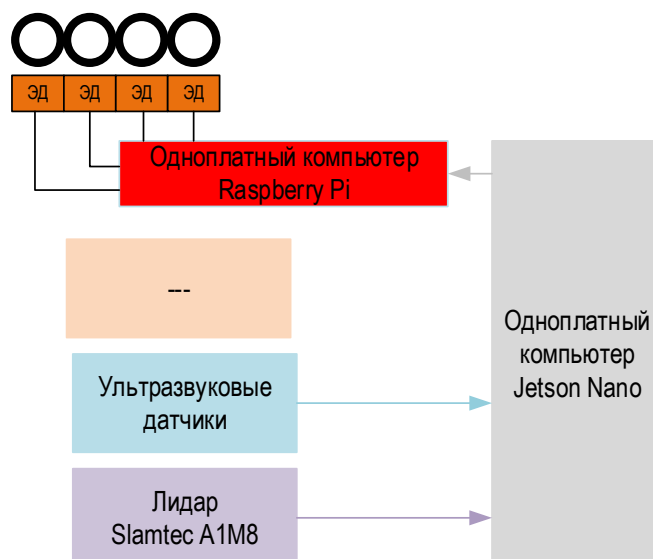


Рис.4. Схема функциональных связей датчиков в макете сервисного средства

На схеме аналогичными цветом выделены схожие классы оборудования, представленные на рис. 3. Основным активным элементом платформы является лидар, формирующий ситуации (сцены). Обработкой данных, поступающих с лидара, занимается компактный одноплатный компьютер Jetson Nano [4]. Ультразвуковые датчики представляют собой навигационный комплекс самого транспортного средства. Устройство принятия решений содержит в себе еще один одноплатный компьютер Raspberry Pi, который занимается управлением четырьмя редукторными коллекторными двигателями, приводящими платформу в движение, и также участвующий в обработке данных. На данный момент платформа может осуществлять прямолинейное движение и останавливаться перед препятствием.

Оценка существующих заделов для внедрения. Проведенный анализ вопросов о степени внедрения систем автоматизации движения в смежных транспортных отраслях в России отечественными предприятиями показал следующие результаты. Российский железные дороги ведут разработки по созданию беспилотного локомотива и электропоезда для достижения 4 уровня автономности [5]. Компания Яндекс прорабатывает 5 уровень автономности для своего парка беспилотных автомобилей [6]. Компания КАМАЗ разрабатывает автономный тягач «Континент» для дальнемагистральных грузоперевозок, который на выставке 2021 году показал 3 уровень автономности [7]. Не только в России, но и за рубежом активно ведутся подобные разработки. Ярким примером по тематике исследования может быть проект авиакомпании KLM TractEasy, который обеспечивает беспилотную подачу багажа для загрузки на борт воздушного судна и разгрузки [8]. Готовые решения из области наземного транспорта, позволяют говорить об успешном внедрении подобных технологий в не менее сложной и ответственной сфере – авиации.

Переход к цифровой экономике ведет к высокой степени автоматизации управления, в том числе и в системе авиаперевозок. Предлагаемая структурная схема ассистирующей системы автономной навигации позволяет повысить их безопасность при любых погодных условиях. Разрабатываемая технология имеет перспективы реализации в том числе на большом рынке военной авиации, как потенциально имеющая высокую степень резервирования и безопасности персонала.

Библиографический список

1. Бачкало Б.И., Ирмалиев Р.Э. //Научный вестник МГТУ ГА. 2015. №218. С. 39.
2. В.В. Грачев, В.М. Кейн// Радиотехнические средства управления воздушным движением. – Москва: Транспорт, 1975. - 343с.
3. Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д. // Автоматизация управления воздушным движением/ учебник для вузов гражданской авиации. – Москва: Транспорт, 1992. -279с.
4. Jetson Nano: одноплатник для машинного обучения от Nvidia [Электронный ресурс]// URL: <https://habr.com/ru/post/444442> (дата обращения: 20.02.2022).
5. Развитие беспилотных технологий на железнодорожном транспорте [Электронный ресурс] // URL: <https://habr.com/ru/post/502202/> (дата обращения: 20.01.2022).
6. Беспилотный автомобиль Яндекс [Электронный ресурс]// Беспилот; URL: <https://bespilot.com/news/366-yandex-bespilot> (дата обращения: 27.02.2022).
7. Продажа тягачей нового поколения КАМАЗ [Электронный ресурс]// Автостат; URL: <https://www.autostat.ru/news/44097/> (дата обращения: 27.02.2022).
8. TractEasy [Электронный ресурс]// Smart Airport Systems (SAS); URL: <https://www.smart-airport-systems.com/solutions/tracteasy/> (дата обращения: 28.02.2022).

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ВЫСШИХ ТИПОВ В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ

Ю. Г. Медведева

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

Значительный интерес в радиотехнической практике обретает задача направленной передачи энергии электромагнитных волн от генератора к потребителю. Основные требования, предъявляемые при этом – максимум передаваемой мощности и минимальные потери в самой передаче. Такая задача решается при помощи специальных направляющих устройств, называемых *линиями передач*. Возможность применения определенной линии передачи обусловлено мощностью и частотой сигнала, передаваемого по линии передачи.

Радиоволновод – диэлектрический канал (направляющая система) для распространения радиоволн. Внутри волновода вдоль его оси распространяется электромагнитное поле, являющееся результатом многократного отражения волн от внутренних стенок волновода и интерференции отраженных волн. *Главной особенностью радиоволноводов* является то, что распространение волн в них возможно только в том случае, если поперечные размеры радиоволновода сравнимы с длиной волны λ или больше. Это обуславливает применение радиоволноводов главным образом в области сверхвысоких частот [1]. Чаще всего используются волноводы с прямоугольным и круглым сечением.

Целью работы является анализ особенностей построения линии передачи на основе трубы круглого сечения. Поэтому в качестве объекта исследования выбран радиоволновод, представляющий собой круговой цилиндр. Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи: проанализировать структуру электромагнитного поля в круглом волноводе, способы и особенности его возбуждения, а также рассмотреть методы, применяемые для выделения рабочих электромагнитных колебаний.

Основная задача теории волноводов сводится к нахождению векторов напряженности электрического поля \vec{E} и магнитного поля \vec{H} в любой точке среды с заданными параметрами. Она решается с помощью теории волноводов на основе уравнения Максвелла.

На рисунке 1 изображен металлический волновод, стенки которого представляют круговой цилиндр.

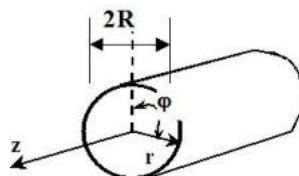


Рисунок 1 - Круглый волновод (R – радиус волновода)

1-ое и 2-ое уравнения Максвелла для диэлектрической среды внутри волновода имеют вид:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = \frac{d\vec{D}}{dt} = \epsilon_a \frac{d\vec{E}}{dt} \\ \text{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} = -\mu_a \frac{d\vec{H}}{dt} \end{cases}$$

Для круглого волновода решение этой системы уравнений удобнее искать в цилиндрической системе координат (r, φ, z) . Показано [1], что решение выражается через цилиндрические функции, которые характеризуются индексами n и m . Индекс n - периодичность поля по полярному углу φ , индекс m - периодичность поля по радиусу r , т. е. число полных и неполных полуволн, укладывающихся от оси до стенки волновода [2]. Каждая пара чисел n и m определяет тип колебаний и ей соответствует своя структура поля волны в круглом волноводе.

В радиоволноводах распространяются два класса волн: поперечные электрические волны (обозначаемые H_{mn}) и поперечные магнитные волны (обозначаемые E_{mn}). Первые волны характеризуются отсутствием продольной составляющей электрического поля (силовые линии электрического поля этих волн лежат в поперечной плоскости). Поперечно магнитные волны (волны E) не имеют продольную составляющую магнитного поля. Из этого следует, что силовые линии магнитного поля этого класса волн представляют собой замкнутые кривые (кольца) в поперечной плоскости.

В круглом волноводе критическая длина волны определяется следующим образом:

а) для волн типа E_{mn}

$$(\lambda_{кр})_{E_{mn}} = \frac{2\pi R}{V_{nm}}$$

где V_{nm} – m -ый корень функции Бесселя n -го порядка,

б) для волн типа H_{mn} :

$$(\lambda_{кр})_{H_{mn}} = \frac{2\pi R}{U_{nm}}$$

где U_{nm} – m -ый корень производной функции Бесселя n -го порядка.

В таблицу 1 сведены результаты расчетов $\lambda_{кр}$ для различных типов волн, на рисунке 2 представлена диаграмма типов волн (расположение по порядку убывания значения критических длин волн $\lambda_{кр}$).

Анализ рисунка 2 показывает:

- волна типа H_{11} является основным типом волны в круглом волноводе, так как она имеет наибольшее значение критической длины волны $\lambda_{кр}$ и не требует для передачи энергии на ней применения дополнительных устройств устранения нежелательных типов волн;
- в радиоволноводе могут распространяться несколько типов волн одновременно (для которых выполняются условия распространения в волноводе);

- для возможности распространения в круглом волноводе того или иного типа волны, необходимо подобрать соответствующие размеры волновода (размер a).

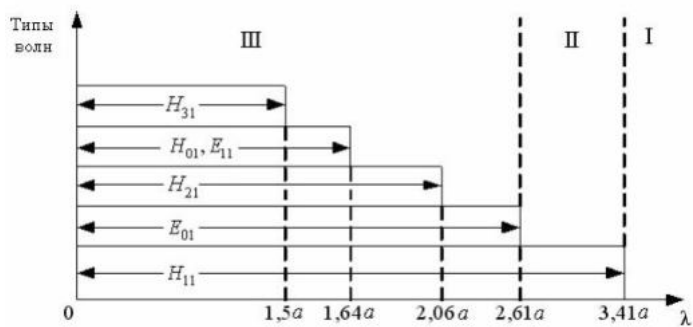


Рисунок 2 – Диаграмма волн различных типов (a – радиус волновода)

Таблица 1 - Критические длины волн $\lambda_{кр}$ в круглом волноводе

E_{mn}	V_{nm}	$\lambda_{кр}/R$	H_{mn}	U_{nm}	$\lambda_{кр}/R$
E_{01}	2,405	2,61	H_{01}	3,832	1,64
E_{02}	5,52	1,14	H_{02}	7,016	0,898
E_{11}	3,832	1,64	H_{11}	1,841	3,41
E_{12}	7,016	0,898	H_{12}	5,332	1,18
E_{21}	5,136	1,22	H_{21}	3,054	2,06
E_{22}	8,417	0,747	H_{22}	6,706	0,94

Структура электромагнитного поля. Обязательным условием высокоэффективного использования волноводов на практике является знание структуры поля волны в них. На рисунке 3 представлены структуры для некоторых типов колебаний круглого волновода.

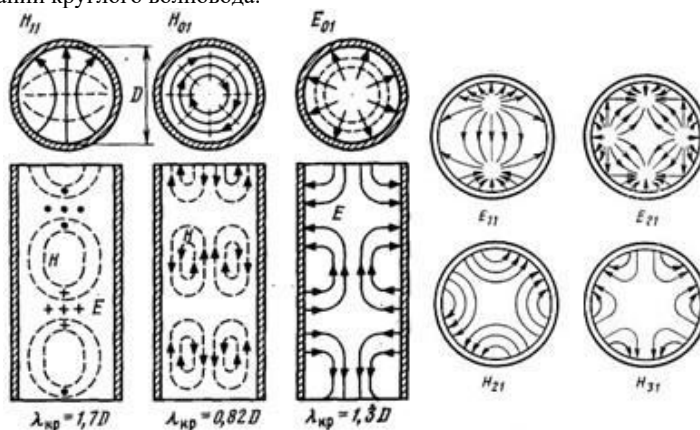


Рисунок 3 - Структура электромагнитного поля в круглом волноводе для некоторых высших типов волн

В круглом волноводе в роли основного типа волн используется один из трех типов колебаний: H_{11} , E_{01} или H_{01} . Ниже рассмотрены особенности данных волн, определяющих их применение на практике.

Волна H_{11}

1. Одномодовый режим работы круглого волновода без использования дополнительных мер возможен только на волне H_{11} , т.к. данный тип колебаний обладает наибольшей $\lambda_{кр}$ (табл. 1).

2. Структура электромагнитного поля данной волны является несимметричной относительно произвольной поперечной оси (см.рис.3). В следствии этого, при движении волны вдоль круглого волновода происходит изменение поляризации волны, как показано на рисунке 4.

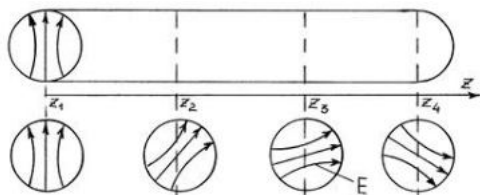


Рисунок 4 - Изменение плоскости поляризации волны H_{11}

Чтобы зафиксировать плоскость поляризации, изменяют поперечное сечения круглого волновода, используя эллипс;

3. Из всех трех типов волн, волна H_{11} обладает наибольшей допустимой рабочей мощностью.

Волна E_{01}

1. Волна является осесимметричной (см.рис.3), поэтому удобна в качестве волны, используемой для передачи электромагнитной энергии в круглом волноводе или для применения в функциональных устройствах на основе круглого волновода (СВЧ фильтры, вращающиеся соединения и т.д.);

2. Для предотвращения потерь электромагнитной энергии требуется принятие специальных мер для подавления волны H_{11} .

Волна H_{01}

1. У данной волны отсутствуют поперечные составляющие поверхностного тока на стенках волновода (имеются только круговые токи), см.рис.5. Это приводит к тому, что при увеличении частоты коэффициент затухания α данной волны стремится к нулю.

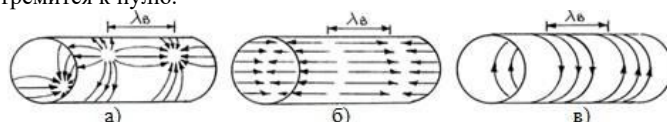


Рисунок 5 - Распределение линий поверхностного тока для волн H_{11} , E_{01} и H_{01} (сверху вниз)

2. Наряду с волной H_{01} существуют еще по крайней мере четыре типа колебаний (см.рис.2). В этой связи весьма сложно обеспечить подавления этих паразитных типов колебаний, чтобы добиться тем самым режима с наименьшим коэффициентом затухания электромагнитной энергии в круглом волноводе с волной H_{01} .

Знание структуры поля позволяет наметить способы эффективного возбуждения и извлечения энергии. В этих целях волновод связывается с источником и приемником энергии.

Способы возбуждения полей в волноводах. В радиоволноводах применяются 3 способа возбуждения поля: штырем (линейным проводником с током), петлей (витком) и через отверстие в торце или боковой стенке волноводов. Петля и штырь обычно выполняются конструктивно продолжением внутреннего проводника кабеля (коаксиальной линии), наружный проводник кабеля крепится к стенке волновода.

Возбуждение поля штырем. Наводимая в штыре э.д.с. вычисляется по формуле [3]:

$$\mathcal{E}_{\text{шт}} = \int_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell}$$

где \vec{E} – вектор напряженности поля вблизи штыря;

$d\vec{\ell}$ – элемент его длины.

Таким образом, эффективное возбуждение заданного поля штырем возможно при расположении его параллельно электрическим силовым линиям ($E d\vec{\ell} \neq 0$), вблизи пучности электрического поля возбуждаемой волны ($\vec{E} \neq 0$), рис.6,а.

Возбуждение поля петель. Э.д.с. наводимая в петле, вычисляется по формуле [3]:

$$\mathcal{E}_{\text{пет}} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mu_a \vec{H} d\vec{S}$$

Анализ формулы показывает, что расположение петли для высокоэффективного возбуждения заданной волны должно быть следующим: виток устанавливается вблизи пучности магнитного поля возбуждаемой волны ($\vec{H} \neq 0$), а его плоскость ориентируется перпендикулярно магнитным силовым линиям ($\vec{H} d\vec{S} \neq 0$), рис.6,б.

Возбуждение поля при помощи щели. Щелью, облучаемая внешним полем, прорезанная в боковой поверхности, возбуждает заданную волну, если она ориентирована перпендикулярно линиям токов и размещена в пучности поверхностных токов (рис.6,в). Тогда внутри щели возникают электрическое (поперек щели) и магнитное (вдоль щели) поля [3].

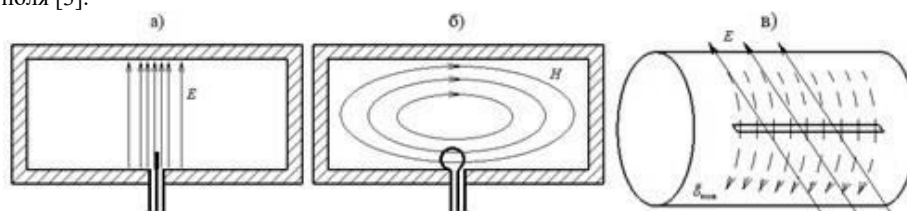


Рисунок 6 – Расположение возбуждающих штыря (а), петли (б) и щели (в) в волноводе

Как правило, передача электромагнитной энергии по волноводу совершается на одном типе колебаний. В дополнение к волне заданного типа возбуждающее устройство может также создавать и нежелательные волны высших типов, поэтому существует необходимость подавления последних. Для этого применяются специальные устройства – фильтры типов волн, принцип действия которых основан на различии структур электромагнитных полей разных типов волн и их поляризационных свойствах.

Фильтры типов волн. По принципу работы фильтры типов волн подразделяются на отражающие и поглощающие.

В *поглощающих фильтрах* подавление осуществляется путем поглощения энергии нежелательных типов волн. Для поглощения энергии в волноводе устанавливаются специальные стержни или пластины с поглощающим слоем, в котором электромагнитная энергия преобразуется в тепловую; форма и ориентация поглощающих поверхностей выбираются так, чтобы не было затухания нужной волны. Подавление можно также получить с помощью щелей, прорезанных так, чтобы они были излучающими для этой волны и неизлучающими для рабочего типа колебаний [3].

Принцип работы *поглощающих фильтров* основан на поглощении энергии нежелательных типов волн. Для этого в радиоволновод устанавливают специальные пластины или стержни с поглощающим слоем: в них происходит преобразование электромагнитной энергии в тепловую; ориентация и форма поверхностей поглощения энергии паразитных волн подбираются так, что затухания рабочей волны не происходит. При помощи щелей также может

быть получено подавление: отверстия вырезаются так, чтобы они были излучающими для нежелательного колебания и неизлучающими для заданного типа волны.

Устройства, пропускающие рабочую волну и отражающие нежелательные типы волн, называются *отражающими фильтрами*. Металлический стержень или пластинка представляет собой простейший фильтр этого типа. Они размещаются в радиоволноводе перпендикулярно электрическим силовым линиям нежелательной волны. Такой фильтр слабо возмущает поле заданной волны (наводит только малые по амплитуде поперечные токи). При параллельной ориентации стержня или пластинки волна интенсивно отражается (наводятся продольные токи большой амплитуды). Расположение (расстояние между ними), а также число проводников возможно подобрать таким образом, чтобы отражение волны происходило как от сплошного металлического экрана [3].

Например, если передача энергии осуществляется на *основной волне* H_{11} , то устранение волн высших типов достигается соответствующим выбором размеров поперечного сечения волновода. Для передачи энергии на *волне* H_{01} (рис.7,а) предназначен волновод, состоящий из отдельных медных колец: для волн других типов зазор разрывает линии продольного тока, и энергия этих волн будет интенсивно излучаться, если диэлектрик без потерь, или поглощаться в диэлектрике с потерями, на саму рабочую волну зазор между кольцами практически не влияет. Для устранения колебания H_{11} при работе с *волной* E_{01} применяется фильтр в виде металлического резонансного кольца. При точной центровке кольца колебание E_{01} наводит на нем только поперечные токи малой амплитуды (кольцо тонкое), поэтому кольцо мало влияет на прохождение волны. Для волны H_{11} возбуждаются токи, показанные на рисунке 7,б пунктирными линиями. Благодаря им происходит отражение волн H_{11} [3].

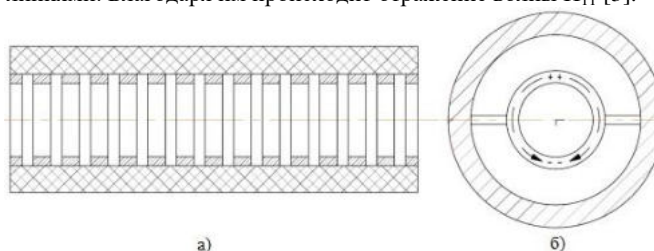


Рисунок 7 – Фильтрующие устройства: а – кольцевой фильтр, б – резонансное кольцо

Выводы. Задача направленной передачи энергии электромагнитных волн от генератора к потребителю является актуальной в радиотехнической практике. В ходе работы проведен анализ особенностей построения линии передачи на основе круглого волновода, а именно рассмотрена структура электромагнитного поля внутри радиоволновода, способы его эффективного возбуждения, а также устройства фильтрации для выделения рабочих волн.

Представленные в данной работе особенности распространения, возбуждения и фильтрации волн высших типов в круглом волноводе могут быть использованы при построении линий передач. При выборе рабочей волны необходимо учитывать её структуру, исходя из которой подбирать устройство для эффективного возбуждения колебаний. При этом также следует выбрать подходящий фильтр типов волн для подавления возникающих нежелательных волн высших типов.

Научный руководитель – доцент, к.т.н. А.И. Митюшов.

Библиографический список

1. Андрусевич Л.К., Бельный В.Г. Основы электродинамики. – Учебное пособие для радиотехнических специальностей вузов. Новосибирск, СибГУТИ, 2000.
2. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов. М., «Связь», 1973. 206 - 211 с.
3. Финкельштейн С.М., Чашикин М.З., Новиньков А.Г., Пуганов В.П. Техника сверхвысоких частот. Учебник для вузов. Киев, 1970. 60 – 64, 207 – 221 с.

УДК 621.396.96

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СМЕЩЕНИЯ ЛУЧА АНТЕННЫ НА РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ В КОСМИЧЕСКОЙ РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ МАРШРУТНОГО РЕЖИМА ОБЗОРА

И. О. Колачев

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

Космические радиолокационные системы с синтезированной апертурой (КРСА) в настоящее время являются одним из основных инструментов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Разрешающая способность КРСА по азимуту в идеальных условиях можно оценить следующим образом [1]:

$$\rho_x = \frac{l_x V_e}{2 V_0} \cos \alpha_c = \rho_{ха} \frac{V_e}{V_0} \cos \alpha_c, \quad (1)$$

где l_x – горизонтальный размер реальной апертуры, V_e – путевая скорость космического аппарата (КА) в рассматриваемой точке, V_0 – собственная скорость КА, α_c – центральный угол между плоскостью орбиты и рассматриваемой точкой, $\rho_{ха} = l_x/2$ – разрешающая способность авиационных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) в маршрутном режиме обзора.

В реальных условиях разрешение (1) не может быть достигнуто в связи с паразитной амплитудной модуляцией (АМ), обусловленной направленными свойствами антенны, а также влиянием дестабилизирующих факторов, нарушающих когерентность траекторного сигнала. Нестабильность траектории движения носителя и упругие колебания его корпуса, вносящие наибольший вклад в нестабильность траекторного сигнала для авиационных РСА [2], для КРСА незначительны в виду практически отсутствующего влияния атмосферы. Влиянием солнечного ветра также можно пренебречь в связи с действием магнитного поля Земли. Поэтому основными источниками возмущений траектории КА в классической механике являются неравномерность гравитационного поля Земли, а

также действия других небесных тел: Луны, Солнца, других КА и т.п. В рамках релятивистской механики к ним добавляется влияние эффектов Лензе-Тирринга и Шиффа [3]. Первый приводит к прецессии орбиты КА, величина которой за один оборот не превышает $0,25^\circ$ [4]. Второй заключается в прецессии момента импульса КА, что вызывает изменение ориентации осей антенны.

Поскольку выявленные воздействия проявляются только на длительных временных промежутках, их влиянием в течение малого времени синтезирования (единицы секунд) также можно пренебречь. Следовательно, можно считать, что параметры движения КА стабильны за время синтезирования, а ошибки их измерения, приводящие к расфокусировке радиолокационного изображения (РЛИ), носят систематический характер, поэтому могут быть компенсированы с помощью алгоритмов автофокусировки [1].

С помощью алгоритмов автофокусировки может быть определена фактическая дальность и скорость движения КА. Однако в связи с дискретностью траекторного сигнала определение средней частоты Доплера по имеющейся радиолокационной голограмме затруднено. Этот параметр определяется направлением максимума диаграммы направленности антенны (ДНА). Её смещение приводит к усилению сигналов целей, смещённых относительно траверза, и ослаблению сигналов объектов, расположенных на нём. При значительных углах смещения луча появляются ложные РЛИ.

Оценим количественно влияние смещения ДНА на качество синтеза РЛИ. Для этого получим аналитическое выражение азимутального сечения функции неопределённости (ФН) КРСА. Поскольку траекторный сигнал является дискретным, будем использовать номера его отсчётов, а не само время. Пусть i – номер принимаемого импульса относительно траверза точки прицеливания, а Δn – текущее смещение центра искусственной апертуры. Поскольку синтезирование апертуры заключается в когерентном суммировании N_c отражённых импульсов в процессе движения радиолокатора [1], в введённых обозначениях сигнал на выходе системы обработки имеет следующий вид:

$$u_{\text{вых}}(\Delta n) = \sum_{i=-\frac{N_c-1}{2}}^{\frac{N_c-1}{2}} u_{\text{вх}}(i + \Delta n) u_0^*(i) = \sum_{i=-\frac{N_c-1}{2}}^{\frac{N_c-1}{2}} A(i + \Delta n) \exp\{-j2\pi f_0 \Delta t(i + \Delta n)\} A_0(i) \exp\{j2\pi f_0 \Delta t(i)\}, \quad (2)$$

где $u_{\text{вх}}(i + \Delta n)$ – траекторный сигнал, принятый в текущих узлах синтезированной апертуры, $u_0^*(i)$ – комплексно-сопряжённый сигнал точки прицеливания, относительно траверза, $A(i)$ – нормированная амплитуда принимаемого сигнала с учётом смещения луча антенны, $\Delta t(i)$ – задержка принимаемого сигнала, f_0 – несущая частота, $A_0(i)$ – нормированная амплитуда принимаемого сигнала без учёта смещения луча антенны.

Положение точки прицеливания А (рис. 1.а) определяется центральным углом α_c , который зависит от угла визирования луча антенны в угломестной плоскости β_v следующим образом:

$$\alpha_c = \arcsin \left(\left(1 + \frac{H}{R_3} \right) \sin \beta_v \right) - \beta_v,$$

где H – высота орбиты, R_3 – радиус Земли.

Считая, что вблизи точки В КА движется по круговой орбите, получили следующую зависимость наклонной дальности R_n от номера принимаемого импульса:

$$R_n(n) = \sqrt{R_3^2 + S^2 - 2SR_3 \cos \alpha_c \cos \omega n T} \approx R_0 + \frac{V_0 V_e}{2R_0} n^2 T^2 + \dots, \quad (3)$$

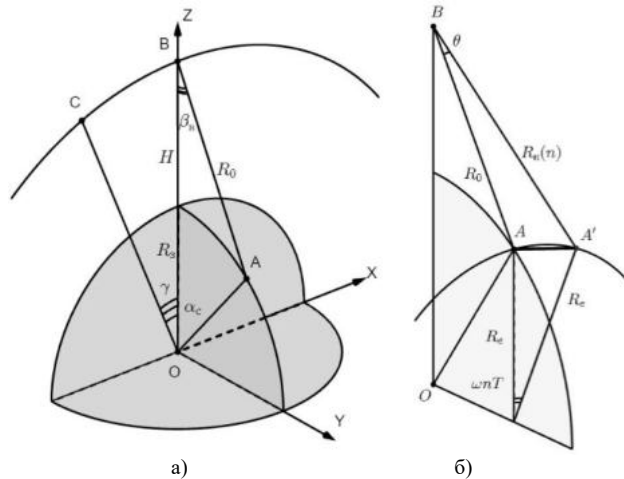


Рис. 1. Используемые геометрические соотношения

где $R_0 = \sqrt{R_3^2 + S^2 - 2SR_3 \cos \alpha_c}$ – минимальная наклонная дальность, $S = H + R_3$ – радиус орбиты, ω – угловая скорость движения КА, T – период следования импульсов, $V_0 = S\omega$ – орбитальная скорость носителя, $V_e = R_3 \cos \alpha_c$ – путевая скорость в точке прицеливания.

Из выражения (3) получили изменение величины задержки сигнала относительно траверза:

$$\Delta t(n) = \frac{2(R_n(nT) - R_0)}{c} = \frac{V_0 V_e}{R_0 c} n^2 T^2. \quad (4)$$

Нормированную амплитуду принимаемого сигнала можно представить следующим образом:

$$A(n) = \left(\frac{R_0}{R_n(nT)} \right)^4 G_\varphi^2(\varphi(nT)) G_\psi^2(\psi(nT)) \approx G_\varphi^2(\theta(nT)),$$

где G_ϕ^2 – нормированная ДНА в азимутальной плоскости, ϕ – азимут, G_ψ^2 – нормированная ДНА в угломестной плоскости, ψ – угол места, θ – угол смещения луча антенны относительно нормали.

Как правило, ДНА по углу места значительно шире, чем по азимуту, а сам угол места за время синтезирования меняется незначительно. Помимо этого, наклонная дальность точки прицеливания на 5–6 порядков больше её приращения в пределах искусственной апертуры. Поэтому можно считать, что амплитуда определяется только ДНА по азимуту, а азимут цели совпадает с углом между нормалью и направлением на цель θ . Из рис. 1.б), используя теорему косинусов, имеем:

$$\begin{aligned} \theta(n) &= \arccos \frac{R_0^2 + (R_n(n))^2 - 2R_e^2(1 - \cos \omega n T)}{2R_0 R_n(n)} = \\ &= \arccos \frac{R_0^2 + R_3^2 + S^2 - 2R_e^2 + (2R_e^2 - 2SR_e) \cos \omega n T}{2R_0 \sqrt{R_3^2 + S^2 - 2SR_e \cos \omega n T}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $R_e = R_3 \cos \alpha_c$.

В связи с чётностью косинуса, функция (5) не имеет производной в точке $n = 0$, следовательно, она не может быть разложена в ряд в окрестностях этой точки. Помимо этого, чётность косинуса приводит к тому, что функция (5) не учитывает тот факт, что для импульсов $n < 0$ угол отрицателен. При моделировании это обстоятельство несущественно, поскольку на практике, как правило, в азимутальной плоскости используются симметричные ДНА, а ассиметричные, например, косекансная [5] – в угломестной.

Указанных недостатков лишена функция вида $\text{sgn}(t)\theta(t)$, имеющая следующее разложение:

$$\text{sgn}(n)\theta(n) \approx \frac{R_e \omega}{R_0} n T + \dots = \frac{V_e}{R_0} n T + \dots,$$

где $\text{sgn}(n)$ – функция знака [6].

Из выражения (5) определим зависимость номера импульса от углового положения точки прицеливания θ :

$$n = \frac{1}{\omega T} \arccos \frac{R_e^3 - (2R_e - S)S^2 \sin^2 \theta - R_3^2(R_e - S \sin^2 \theta) + R_0^2 \sqrt{R_e^2 - S^2 \sin^2 \theta} \cos \theta}{R_e(R_e - S)^2}.$$

Тогда номер импульса, для которого принимаемый сигнал максимален, зависит от угла смещения луча антенны θ_c следующим образом:

$$l = \left\lfloor \frac{1}{T\omega} \arccos \frac{R_e^3 - (2R_e - S)S^2 \sin^2 \theta_c - R_3^2(R_e - S \sin^2 \theta_c) + R_0^2 \sqrt{R_e^2 - S^2 \sin^2 \theta_c} \cos \theta_c}{R_e(R_e - S)^2} \right\rfloor.$$

Число импульсов в искусственной апертуре определяется шириной ДНА по азимуту θ_x :

$$N_c = 2 \left\lfloor \frac{1}{T\omega} \arccos \frac{R_e^3 - (2R_e - S)S^2 \sin^2 \theta_x/2 - R_3^2(R_e - S \sin^2 \theta_x/2) + R_0^2 \sqrt{R_e^2 - S^2 \sin^2 \theta_x/2} \cos \theta_x/2}{R_e(R_e - S)^2} \right\rfloor.$$

Используя колоколообразную аппроксимацию ДНА [7], определим амплитуду сигнала без учёта смещения луча:

$$A_0(n) = \exp \left\{ -2 \cdot 1,39 \left(\frac{V_e}{R_0 \theta_x} \right)^2 n^2 T^2 \right\}. \quad (6)$$

С учётом смещения луча амплитуда имеет вид:

$$A(n) = \exp \left\{ -2,38 \left(\frac{V_e}{R_0 \theta_x} \right)^2 (n-l)^2 T^2 \right\}. \quad (7)$$

Подставив выражения (4)–(7) в (2), получим зависимость выходного сигнала от смещения центра апертуры Δn :

$$\begin{aligned} u_{\text{вых}}(\Delta n) &= \sum_{i=\frac{N_c-1}{2}}^{\frac{N_c-1}{2}} \exp \left\{ -2,38 \left(\frac{V_e}{R_0 \theta_x} \right)^2 ((i + \Delta n - l)^2 + i^2) T^2 \right\} \exp \left\{ jk \frac{V_0 V_e}{R_0} (i^2 - (i + \Delta n)^2) T^2 \right\} = \\ &= \exp \left\{ -jk \frac{V_0 V_e}{R_0 c} \Delta n^2 T^2 \right\} \sum_{i=\frac{N_c-1}{2}}^{\frac{N_c-1}{2}} \exp \left\{ -2,38 \left(\frac{V_e}{R_0 \theta_x} \right)^2 ((i + \Delta n - l)^2 + i^2) T^2 \right\} \exp \left\{ -jk \frac{2V_0 V_e}{R_0} i \Delta n T^2 \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

где $k = 2\pi f_0/c$ – волновое число.

Сумму (8) можно считать интегральной в связи с малой разностью её членов:

$$\begin{aligned} u_{\text{вых}}(\Delta \tau) &= \frac{e^{-jk_f \Delta \tau^2}}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \exp \{ -k_a ((\Delta \tau - t_a + t_x)^2 + t_x^2) - j2k_f \Delta \tau t_x \} dt_x = \\ &= \frac{1}{T_s} \exp \{ -k_a (\Delta \tau - t_a)^2 - jk_f \Delta \tau^2 \} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \exp \{ -2(k_a (\Delta \tau - t_a) + jk_f \Delta \tau) t_x - 2k_a t_x^2 \} dt_x, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta \tau = \Delta n T$ – текущее время, $T_s = N_c T$ – длительность синтезирования, $k_a = 2,38 V_e^2 / R_0^2 \theta_x^2$ – коэффициент паразитной АМ за счёт направленных свойств антенны, $t_a = l T$ – смещение максимума отражённого сигнала относительно траверза, $t_x = i T$ – время относительно центра апертуры, $k_f = k V_0 V_e / R_0$ – коэффициент частотной модуляции за счёт движения КРСА.

Интеграл (9) может быть вычислен с помощью табличных значений интеграла вероятности комплексного аргумента $\Phi(z)$ [8]:

$$u_{\text{вых}}(\Delta\tau) = \frac{\sqrt{\pi}}{4T_s\sqrt{k_a}} \exp\left\{-\frac{k_a}{2}(\Delta\tau - t_a)^2 - \frac{k_f^2}{2k_a}t^2 - jk_f\Delta\tau t_a\right\} \times$$

$$\times \left[\Phi\left(\sqrt{\frac{1}{2k_a}}(k_a(\Delta\tau - t_a + T_s) + jk_f\Delta\tau)\right) - \Phi\left(\sqrt{\frac{1}{2k_a}}(k_a(\Delta\tau - t_a - T_s) + jk_f\Delta\tau)\right) \right].$$

Для решения задач ДЗЗ зачастую комплексное РЛИ избыточно, поэтому для анализа влияния смещения луча антенны на синтезируемое РЛИ достаточно исследовать модуль ФН:

$$|u_o(\Delta\tau)| = \frac{\sqrt{2\pi}}{4T_s\sqrt{k_a}} \exp\left\{-\frac{k_a}{2}(\Delta\tau - t_a)^2 - \frac{k_f^2}{2k_a}\Delta\tau^2\right\} \times$$

$$\times \left| \Phi\left(\sqrt{\frac{1}{2k_a}}(k_a(\Delta\tau - t_a + T_s) + jk_f\Delta\tau)\right) - \Phi\left(\sqrt{\frac{1}{2k_a}}(k_a(\Delta\tau - t_a - T_s) + jk_f\Delta\tau)\right) \right|. \quad (10)$$

Помимо фильтров, согласованных с амплитудным и фазовым спектром сигнала, на практике используются квазиоптимальные фильтры, согласованные только с фазовым спектром. Приняв в выражении (2) $A_0(i) = 1$, получили следующее выражение для ФН:

$$|u_{\text{ко}}(\Delta\tau)| = \frac{\sqrt{\pi}}{2T_s\sqrt{k_a}} \exp\left\{-\frac{k_f^2}{k_a}\Delta\tau^2\right\} \times$$

$$\times \left| \Phi\left(\sqrt{\frac{1}{k_a}}\left(k_a\left(\Delta\tau - t_a + \frac{T_s}{2}\right) + jk_f\Delta\tau\right)\right) - \Phi\left(\sqrt{\frac{1}{k_a}}\left(k_a\left(\Delta\tau - t_a - \frac{T_s}{2}\right) + jk_f\Delta\tau\right)\right) \right|. \quad (11)$$

Для оценки влияния направленных свойств антенны, определим также выходной сигнал при использовании ненаправленной антенны. Примем в выражении (2) амплитудные множители $A_0(i) = 1$ и $A(i) = 1$. В этом случае азимутальное сечение ФН будет иметь следующий вид:

$$|u_{\text{нн}}(\Delta\tau)| = \left| \frac{\sin \Delta\tau k_f T_s}{\Delta\tau k_f} \right|. \quad (12)$$

Анализ выражений (10) и (11) осуществим на примере отечественной КРСА «Кондор-Э», запущенной на орбиту 19 декабря 2014 года. Эта система имеет следующие характеристики [9]:

- высота орбиты в перигее: 501,1 км;
- высота орбиты в апогее: 525,8 км;
- несущая частота: 3200 МГц;
- диаметр рефлектора: 6 м;
- диапазон углов визирования 24° ... 55°.

Используем средние значения высоты орбиты $H = 510$ км и угла визирования $\beta_v = 39,5^\circ$.

Оценим влияние направленных свойств антенны. Для этого примем в выражениях (10) и (11) значение временного сдвига $t_a = 0$. На рис. 2 и 3 приведены графики зависимости откликов системы обработки на точечную цель от линейного смещения проекции центра луча антенны на земную поверхность. Вертикальными прямыми показано значение выражения (1). Рассмотрены 3 случая:

- используется изотропная антенна, система обработки согласована только с фазовым спектром траекторного сигнала – сплошная кривая (выражение (12));
- используется направленная антенна, система обработки согласована только с фазовым спектром траекторного сигнала – пунктирная кривая (выражение (11));
- используется направленная антенна, система обработки согласована как с фазовым, так и с амплитудным спектром траекторного сигнала – штрихпунктирная кривая (выражение (10)).

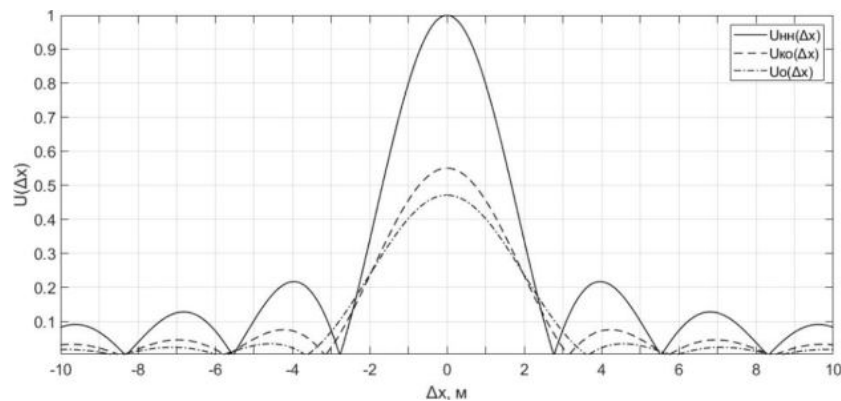


Рис. 2 – Ненормированные отклики КРСА на точечную цель при различных вариантах обработки

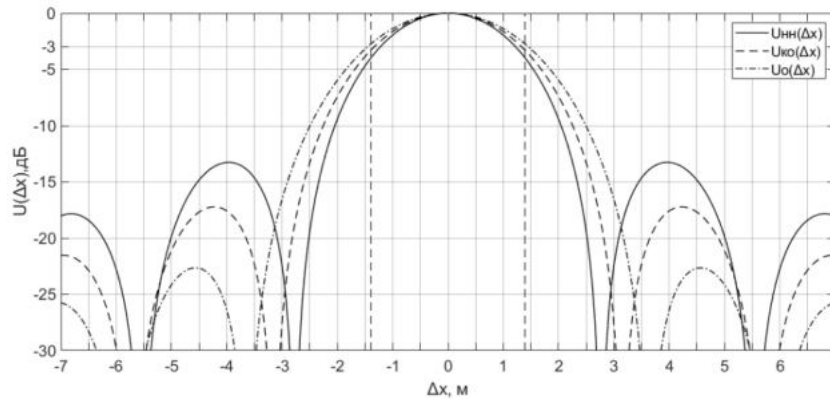


Рис. 3 – Нормированные отклики КРСА на точечную цель при различных вариантах обработки

Из рис. 2 видно, что выходной сигнал системы обработки максимален при использовании ненаправленной антенны. Это обусловлено тем, что при использовании направленной антенны мощность принимаемого сигнала зависит от направления его прихода (выражение (6)). Уровень выходного сигнала при использовании оптимального приёмника ещё меньше, в связи с согласованием его амплитудно-частотной характеристики с амплитудным спектром сигнала.

Из рис. 3 видно, что использование направленной антенны и согласование с амплитудным спектром траекторного сигнала ухудшает разрешающую способность по азимуту при неизменной длительности синтезирования. Ухудшение этой характеристики обусловлено паразитной АМ, что эквивалентно умножению сигнала на оконную функцию. Известно, что подобное преобразование перераспределяет энергию сигнала между главным и боковыми лепестками [10]. Поэтому, согласование с амплитудным спектром сигнала не только улучшает отношение сигнал/шум, но и уменьшает уровень боковых лепестков (таблица 1), что улучшает радиометрическое разрешение.

Таблица 1

Уровни первых боковых лепестков выходного сигнала (дБ) в зависимости от угла смещения луча антенны

№ лепестка	Тип фильтра	θ_c/θ_x					
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	квазиоптимальный	-17,2	-17,0	-16,4	-15,4	-	-
	оптимальный	-22,6	-22,3	-21,4	-	-	-
2	квазиоптимальный	-21,5	-21,3	-20,8	-20,0	-19,0	-17,9
	оптимальный	-25,7	-25,5	-24,9	-24	-22,9	-21,5
3	квазиоптимальный	-24,4	-24,2	-23,7	-22,9	-22,0	-20,9
	оптимальный	-28,5	-28,2	-27,6	-26,8	-25,7	-24,5
4	квазиоптимальный	-26,6	-26,4	-25,9	-25,1	-24,2	-23,1
	оптимальный	-30,5	-30,3	-29,8	-28,9	-27,9	-26,7
5	квазиоптимальный	-28,3	-28,1	-27,6	-26,7	-25,7	-24,6
	оптимальный	-32,2	-32,0	-31,5	-30,7	-29,6	-28,5

На рис. 4 приведены графики зависимости максимума выходного сигнала согласованного фильтра, который достигается в момент $\Delta t = 0$, от относительного смещения луча антенны. Сплошной кривой показан сигнал оптимального фильтра, а пунктирной – квазиоптимального, согласованного только с фазовым спектром траекторного сигнала.

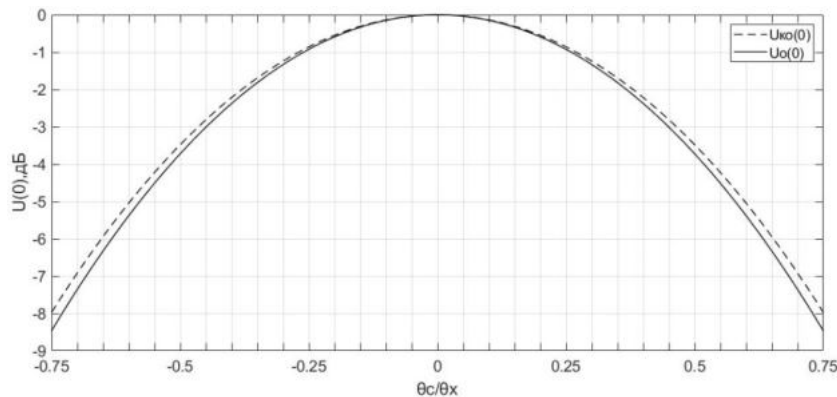


Рис. 4 – Зависимость максимума выходного сигнала от относительного смещения луча антенны

Из рисунка видно, что при смещении луча уменьшается уровень выходного сигнала, поскольку в это случае уменьшается коэффициент усиления антенны. Это приводит к уменьшению интенсивности РЛИ целей, попадающих в полосу захвата по азимуту (рис. 5). Одновременно с этим увеличиваются сигналы целей, не попадающих в полосу, что приводит к возрастанию интенсивности ложного расфокусированного РЛИ (рис. 6). Для оптимального приёмника уменьшение имеет большую крутизну, чем для квазиоптимального.

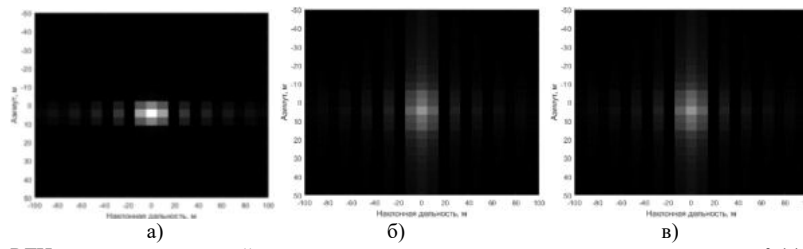


Рисунок 5 – РЛИ цели, расположенной в точке прицеливания при относительных углах скола: 0 (а); 0.4(б); 0.6(в)

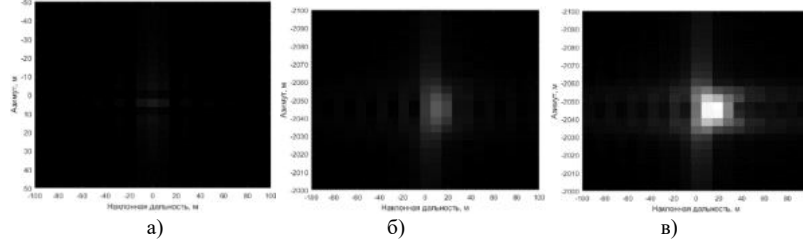


Рисунок 6 – Ложное РЛИ при относительных углах скола: 0(а); 0.4(б); 0.6(в)

Из рис. 5. видно, что одновременно с уменьшением интенсивности РЛИ ухудшается разрешающая способность по азимуту. Это обстоятельство подтверждают графики функций (10) и (11) изображённые на рис. 7 и 8 соответственно. Из рисунков видно, что при малых смещениях луча антенны, ширина основного и уровень боковых лепестков практически не изменяются, что подтверждают данные, приведённые в таблицах 1 и 2. При углах смещения, близких к половине ширины ДНА, наблюдается заметное ухудшение разрешения по азимуту, сопровождающееся заметным ростом уровня боковых лепестков. При дальнейшем увеличении угла смещения выходной сигнал перестаёт иметь многолепестковый характер, что значительно ухудшает радиометрическое разрешение.

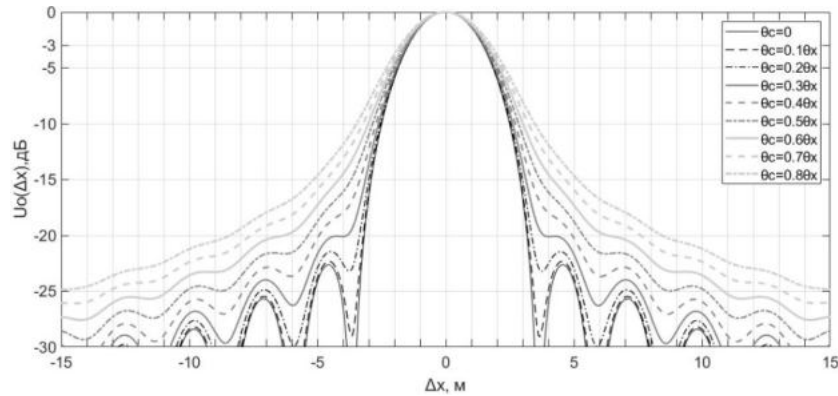


Рис. 7 – Азимутальное сечение ФН оптимальной системы для разных углов смещения луча антенны

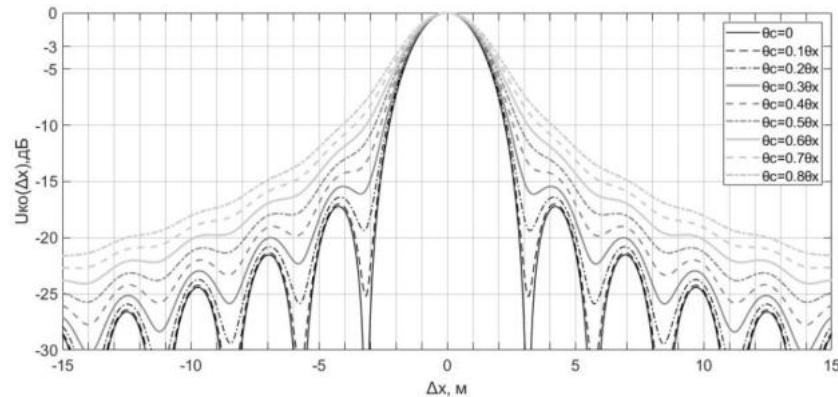


Рис. 8 – Азимутальное сечение ФН квазиоптимальной системы для разных углов смещения ДНА

Таблица 2

Разрешающая способность по азимуту (м) в зависимости от угла смещения луча антенны

Тип фильтра	θ_c/θ_x									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
Квазиоптимальный	2,66	2,68	2,72	2,78	2,88	3	3,14	3,32	3,52	
Оптимальный	2,9	2,92	2,94	3	3,06	3,16	3,26	3,4	3,54	

Для коррекции выявленных эффектов можно использовать два подхода:
 – использование алгоритмов синтеза РЛИ для переднебокового обзора. Для этого в состав КРСА должен входить высокоточный измеритель средней частоты Доплера принимаемого сигнала;
 – использование адаптивных алгоритмов работы систем автоматического управления КА [3]. В этом случае нет необходимости перехода к переднебоковому обзору.

По результатам анализа можно сделать следующие выводы:

1. Наилучшее разрешение по азимуту обеспечивает ненаправленная антенна, однако в связи с неоднозначностью определения азимута, её использование в КРСА не представляется возможным.
2. Разрешающая способность по азимуту при использовании фильтра, согласованного только с фазовым спектром сигнала, лучше, чем при использовании оптимального приёмника.
3. Радиометрическое разрешение при использовании оптимального фильтра лучше, чем у квазиоптимального.
4. Относительное смещение максимума ДНА менее 0,2 приводит к незначительному ухудшению разрешения по азимуту и увеличению уровня боковых лепестков.
5. Относительное смещение около 0,5 вызывает значительное уменьшение интенсивности сфокусированного РЛИ целей и увеличение расфокусированного ложного РЛИ, а также ухудшение разрешающей способности по азимуту и радиометрического разрешения.
6. При смещении максимума ДНА более 0,7–0,8 от её ширины интенсивность РЛИ точки прицеливания меньше, чем у ложного РЛИ. В КРСА, имеющих малый динамический диапазон, синтез РЛИ точки прицеливания не представляется возможным.
7. Для улучшения качества синтеза РЛИ необходимо высокоточное измерение средней частоты Доплера принимаемого сигнала, либо использование адаптивных алгоритмов управления движением КА.

Библиографический список

1. Верба В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Петров Ю. В., Бызов А. Н. и др. Анализ влияния дестабилизирующих факторов на искажения траекторных сигналов в бортовом радиолокаторе высокого разрешения // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2015, № 1, С. 67–75.
3. Рассадин А. Э. Траекторные нестабильности космического носителя РСА, обусловленные эффектами общей теории относительности // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2009. – №. 3. – С. 117-118.
4. Буренин Н. И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. М.: «Советское радио», 1972 – 160 с.
5. Зырянов Ю. Т., Федюнин П. А. и др. Антенны : учебное пособие. СПб.: Лань, 2020. 412 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
7. Раков В. И. Методы аппроксимации диаграмм направленного действия антенн радиолокационных станций Л.: ВМАКВ, 1958. 59 с.
8. Абромовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. М.: Наука, 1979. 831 с.
9. Бабокин М. И., Ефимов А. Ф. и др. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата "Кондор-Э" // Материалы VII Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром: Муромский институт (филиал) ВлГУ имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, 2016. – С. 16–36.
10. Дворкович В. П., Дворкович А. В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М.: Техносфера, 2014. 112 с.

УДК 629.7.058

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ И ПОРОГОВЫЙ АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Е.В. Пушнякава, Ю.В. Петров

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

В процессе эксплуатации техники для обеспечения безопасности проводится контроль работоспособности оборудования. Под контролем работоспособности понимается анализ технического состояния изделия, осуществляемый с целью определения способности изделия выполнять заданные функции в текущий момент времени, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией [1]. Проверка соответствия радиоэлектронного оборудования техническим требованиям проводится, как на стадии изготовления, испытаний, так и во время штатной эксплуатации.

В настоящее время все современные летательные аппараты оборудованы автоматизированными системами контроля [2]. Они решают широкий спектр задач контроля и обеспечения безопасности эксплуатации летательных аппаратов (ЛА) в ходе полета, а также предполетной подготовки и диагностирования. Автоматизированные системы контроля в фоновом режиме осуществляют анализ состояния всех бортовых систем и комплексов, в том числе навигационных.

Одной из задач, решаемых автоматизированными системами контроля, является диагностика источников данных. В ходе их работы могут возникать нештатные ситуации приводящие, как к сбоям и отказам, так и снижению точности измеряемых параметров. По поведению процессов можно судить о техническом состоянии изделия, т.е. осуществлять контроль, который необходим для определения способности изделия выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных их нормативно-технической документацией. Информационный контроль основан на использовании априорных знаниях некоторых закономерностей.

На ЛА устанавливается большое количество навигационных датчиков, что приводит к избыточности навигационной информации. Сегодня каждый датчик, установленный на ЛА, контролируется независимо от других. Такую информационную избыточность можно использовать для повышения эффективности и достоверности систем диагностики. Существующие методы контроля различных датчиков не используют наличие на борту нескольких датчиков, измеряющих идентичные параметры.

Метод информационного контроля [3, 4] является наиболее эффективным для контроля состояния радиоэлектронного оборудования. В группе методов, относящихся к информационному контролю, следует выделить метод последовательного анализа [5], который позволяет за минимальное время обнаружить изменение статистических характеристик контролируемых параметров. Существующие алгоритмы контроля, построенные на основе методов последовательного анализа, позволяют контролировать измерения датчиков по таким статистическим характеристикам, как математическое ожидание, дисперсия, коэффициент автокорреляции. В таблице 1 осуществлен анализ данных методов.

Таблица 1 – Описание методов информационного контроля

Метод	Достоинства	Недостатки
Метод двойного подсчета	Обнаружение сбоев, простота реализации	Увеличение длительности работы алгоритма
Метод контрольных соотношений	Обнаружение сбоев, отказов, не существенно замедляет алгоритм работы	Не выявляет ухудшений точности
Метод усеченного алгоритма	Позволяет выявлять и устранять ошибки вызванные сбоями	Не выявляет ухудшений точности
Логический анализ результатов решения	Простота реализации (оценка попадания параметра в заданный диапазон значений)	Не применим, если заранее не известны законы изменения параметров
Метод подстановки	Применимо для широкого класса вычислительных задач	Решение обратной задачи требует дополнительное время и ресурсы, соизмеримые с требованиями основной задачи
Метод последовательного анализа	Применим для широкого класса задач контроля достоверности параметров.	Время диагностирования отказов сопоставимо, чем у метода контрольных соотношений

Как правило, изменения статистических характеристик приводят изделия к отказам или потере работоспособности.

При информационном контроле важно обнаружить все типы этих ошибок за минимальное время. Кроме того, важной задачей является их идентификация, позволяющая судить о причинах отказа работоспособности изделий.

Информационный контроль предназначен для обнаружения влияния случайных сбоев (искажений и потерь текущей информации, содержащейся в физических сигналах, при ее передаче, хранении или обработке) [2]. Методы этой группы направлены на контроль не устройств, а информации. Они позволяют повысить ее достоверность, обнаруживая ошибки, возникающие в ходе вычислительного процесса. Информационный контроль используется также для проверки информации, получаемой от других систем и датчиков по каналам связи, тем самым контролируется не только исправность сопрягаемых систем, но и выявляются сбои в каналах связи. Как показал обзор методов информационного контроля, на сегодняшний день наибольшее распространение получили разновидности пороговых алгоритмов, которые можно отнести к методам контрольных соотношений.

Результаты анализа большого количества реализаций показали, что наиболее часто встречающимися аномалиями в измерениях навигационных параметров являются:

- сбойные измерения (сбои, измерения, имеющие аномально большие погрешности),
- отказы внезапные (скачкообразное изменение значений измеряемых параметров),
- отказы постепенные (монотонное изменение):
 - o снижение точности по среднему,
 - o снижение точности по дисперсии (по разбросу).

Пороговый алгоритм контроля

Для реализации порогового алгоритма в программной среде Mathcad был сгенерирован псевдослучайный процесс. Были заданы два порога, равные -3σ и 3σ .

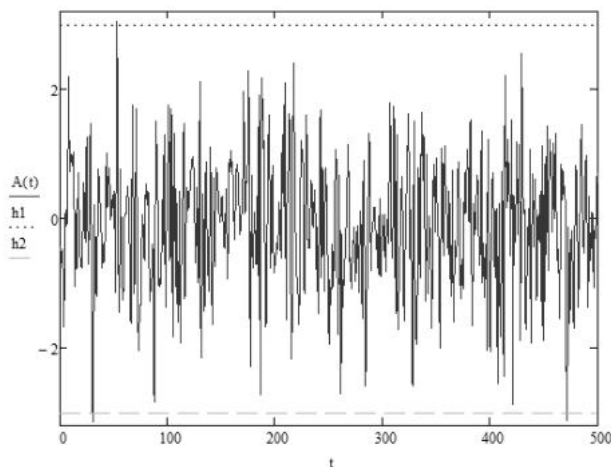


Рисунок 1 – Реализация псевдослучайного процесса

Если значение превышает заданные пороги, то разработанная программа фиксирует порядковый номер значения и присваивает к этому значению единицу для отображения сбоя, отказа.

Programm_1 =	50	51	52	53	54	55	56
	0	0	0	[53, 1]	0	0	...

Рисунок 2 – Результат реализации порогового алгоритма

Таким образом, можно сделать вывод, что пороговый алгоритмы требует минимальные вычислительные ресурсы и позволяет выявить отказы, сбои и расхождения в измерениях достаточно быстро, однако они не способны выявить ухудшения точности или медленно нарастающие ошибки измерений.

Алгоритмы контроля на основе последовательного анализа

Для контроля навигационных параметров используются (или могут использоваться) последовательные алгоритмы:

- контроля среднего значения,
- контроля дисперсии,
- контроля коэффициента корреляции.

Алгоритм контроля среднего значения. В данном алгоритме рассматривается две гипотезы H_0 – отказ датчика и H_1 – исправность датчика. Перед началом эксперимента рассчитываются приемочные и браковочные числа a_i и r_i .

$$a_i = \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \cdot \ln \frac{\beta}{1 - \alpha} + i \cdot \frac{\theta_1 + \theta_0}{2} \quad (1)$$

$$r_i = \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \cdot \ln \frac{1 - \beta}{\alpha} + i \cdot \frac{\theta_1 + \theta_0}{2} \quad (2)$$

где θ_1 – среднее значение, соответствующее приему гипотезы об исправности, θ_0 – среднее значение, соответствующее приему гипотезы об отказе, α – вероятность ошибки первого рода, β – вероятность ошибки второго рода, σ – среднеквадратическое отклонение оцениваемого параметра, i – номер шага эксперимента.

В ходе эксперимента на каждом шаге рассчитывается сумма значений оцениваемого параметра:

$$S_i = S_{i-1} + x_i \quad (3)$$

где x_i – значение параметра на i -м шаге.

После расчета суммы проверяется выполнение неравенства:

$$a_i < S_i < r_i \quad (4)$$

При выполнении неравенства наблюдение продолжается. При нарушении левого неравенства принимается гипотеза об отказе датчика, а при нарушении правого неравенства принимается гипотеза об исправности датчика. В случае принятия одной из гипотез эксперимент начинается сначала, а сумма и номер шага эксперимента обнуляются.

При проведении моделирования был сгенерирован псевдослучайный процесс, как и для порогового алгоритма (Рисунок 1). Для эффективного оценивания работы алгоритма необходимо рассчитать частоты принятия решения об исправности (первое значение в результате работы программы) и отказе (второе значение в результате работы программы). Также третьим значением в результате работы программы выводится значение счетчика принятия решений (Рисунок 3).

$$\text{Programm2} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1.001 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3 – Результат реализации последовательного алгоритма контроля среднего значения

Алгоритм контроля дисперсии. В данном алгоритме рассчитываются приемочное и браковочное числа в соответствии со следующими выражениями:

$$a_i = \frac{2 \cdot \ln \frac{\beta}{1 - \alpha}}{\frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_1^2}} + i \cdot \frac{\ln \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0^2}}{\frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_1^2}} \quad (5)$$

$$r_i = \frac{2 \cdot \ln \frac{1 - \beta}{\alpha}}{\frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_1^2}} + i \cdot \frac{\ln \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0^2}}{\frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_1^2}} \quad (6)$$

где σ_0^2 – значение СКО, соответствующее приему гипотезы об исправности, σ_1^2 – значение СКО, соответствующее приему гипотезы об отказе.

В ходе эксперимента на каждом шаге проверяется выполнение неравенства:

$$a_i < S_i < r_i \quad (7)$$

где S_i вычисляется рекуррентно в соответствии с выражением:

$$S_i = S_{i-1} + (x_i - \theta_i)^2; S_0 = 0 \quad (8)$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{x_i - \theta_{i-1}}{i}; \theta_0 = 0 \quad (9)$$

где θ_i – среднее значение оцениваемого параметра на i шаге эксперимента.

При выполнении неравенства наблюдение продолжается. При нарушении левого неравенства принимается гипотеза об исправности датчика, а при нарушении правого неравенства принимается гипотеза об отказе датчика. В случае принятия одной из гипотез эксперимент начинается сначала, а сумма и номер шага эксперимента обнуляются.

Алгоритм контроля коэффициента автокорреляции. В ходе эксперимента выполняется проверка неравенства:

$$\ln B < S_i < \ln A \quad (10)$$

Решающая статистика для коэффициента автокорреляции имеет вид:

$$S_i = \frac{(\rho_1 - \rho_0) \cdot (\rho_i - \frac{\rho_1 + \rho_0}{2})}{D(\rho_i)} \quad (11)$$

где ρ_1 – коэффициент автокорреляции, при котором принимается гипотеза об исправности, ρ_0 – коэффициент автокорреляции, при котором принимается гипотеза об отказе.

При нарушении левого неравенства принимается гипотеза об отказе, при нарушении правого принимается гипотеза об исправности. В случае принятия одной из гипотез эксперимент начинается сначала, иначе наблюдение продолжается. Где:

$$A = \frac{1-\beta}{\alpha} \quad (12)$$

$$B = \frac{\beta}{1-\alpha} \quad (13)$$

Оценка коэффициента автокорреляции рассчитывается по выражению [7]:

$$\rho_i = \rho_{i-1} + D(\rho_{i-1}) \cdot \bar{x}_{i-1} \cdot (\bar{x}_i - \rho_{i-1} \cdot \bar{x}_{i-1}); \rho_0 = 0 \quad (14)$$

где $D(\rho_{i-1})$ – дисперсия оценки коэффициента автокорреляции, \bar{x}_i – центрированное значение оцениваемого параметра.

$$\bar{x}_i = x_i - \theta_i \quad (15)$$

$$D(\rho_i) = \frac{D(\rho_{i-1})}{(1+D(\rho_{i-1}) \cdot \bar{x}_i^2)}; D(\rho_0) = 10^{10} \quad (16)$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{x_i - \theta_{i-1}}{i}; \theta_0 = 0 \quad (17)$$

При вычислении этих параметров, используя рекуррентные выражения, начальное значение коэффициента автокорреляции принимается равным нулю, а дисперсии коэффициента автокорреляции принимается наибольшему возможному числу.

После проведения моделирования был сделан вывод, что алгоритмы, основанные на методе последовательного анализа, перспективные, они учитывают статистику изменения оцениваемого параметра с течением времени, это способствует повышению достоверности результатов, а также возможности отслеживания незначительных ухудшений статистических характеристик.

Теоретический анализ статистических характеристик измерений навигационных параметров при сбоях, отказах и ухудшениях точности в работе измерителей позволил получить аналитические зависимости изменений характеристик [8].

При проведении сравнительного анализа алгоритмов контроля на разных аномалиях критерием их эффективности являлось минимальное время обнаружения аномалия, в том числе изменение статистических характеристик контролируемых параметров. На рисунке 4 качественно показаны результаты проведенного анализа. На нем условно изображены моменты времени, в которые анализируемые алгоритмы обнаруживают различные аномалии. Как видно из этого рисунка, каждую из представленных аномалий выявляет разный «набор» алгоритмов, одного универсального нет, и не может быть.

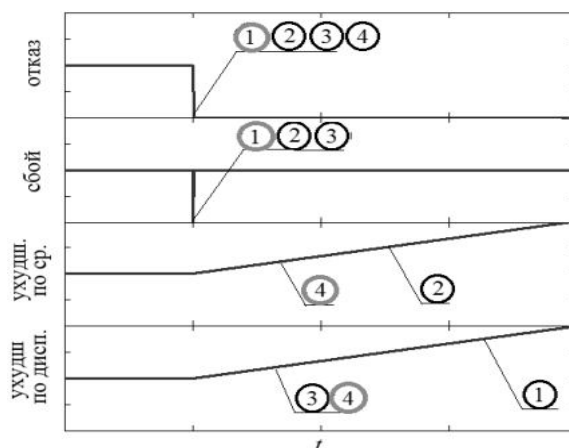


Рисунок 4 – Моменты времени обнаружения аномалий в измерениях различными алгоритмами: 1 – пороговый алгоритм, 2 – последовательный алгоритм контроля среднего значения, 3 – последовательный алгоритм контроля дисперсии, 4 – последовательный алгоритм контроля коэффициента корреляции

При этом пороговый алгоритм быстро выявляет отказы и сбои, снижение точности по среднему не обнаруживает и снижение точности по дисперсии выявляет только спустя достаточно большое время.

Последовательный алгоритм контроля среднего также достаточно быстро выявляет отказы и сбои, снижение точности по дисперсии не обнаруживает и снижение точности по среднему выявляет только спустя относительно большое время.

Последовательный алгоритм контроля дисперсии быстро выявляет отказы и сбои, а также снижение точности по дисперсии (более чем в 3 раз быстрее, чем пороговый алгоритм). Но снижение точности по среднему не обнаруживает.

Последовательный алгоритм контроля коэффициента корреляции быстро обнаруживает только отказы, при этом снижение точности по среднему обнаруживает более чем в 2 раз быстрее, чем пороговый алгоритм. Снижение точности по дисперсии обнаруживает примерно так же, как и последовательный алгоритм контроля дисперсии (т.е., более чем в 3 раз быстрее, чем пороговый алгоритм). Но снижение точности по среднему не обнаруживает. Сбои не обнаруживает.

Для контроля параметров предлагается дополнить используемые в настоящее время пороговые алгоритмы последовательными алгоритмами контроля. Такой подход позволит за счет порогового алгоритма быстрее выявлять отказы и сбои, а за счет последовательных алгоритмов выявлять ухудшения точности измерений.

Библиографический список

1. ОСТ 1 00698-88 Средства контроля изделий авиационной техники встроенные [Текст]: Общие технические требования. – Взамен ОСТ 1 00698-81; Введ. с 01.07.89. – М.: Изд-во стандартов, 1988. 9 с.
2. Ипполитов С.В. Методы и средства объективного контроля [Текст]: Учебное пособие / С.В. Ипполитов, В.Л. Кучевский, В.Т. Юдин – Воронеж: ВАИУ, 2011. 238 с.

3. Кучерявый А. А. Бортовые информационные системы [Текст]: Курс лекций / А. А. Кучерявый; под ред. В.А. Мишина и Г.И. Клюева – 2-е изд., перераб. и доп. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. 504 с.
4. ОСТ 1 02553-85 Комплексы пилотажно-навигационные цифровые самолетов и вертолетов [Текст]: Общие требования и принципы организации эксплуатационного контроля. – Взамен РТМ 1613-79; Введ. с 01.07.86. – М.: Изд-во стандартов, 1985. 39 с.
5. Вальд А. Последовательный анализ. [Текст] / А. Вальд; пер. с англ. под ред. Б.А. Севастьянова. – М.: Государственной издательство физико-математической литературы, 1960. 329 с.
6. Быстров С.Ю. Разработка и анализ алгоритмов контроля измерений параметров движения летательного аппарата [Текст] / С.Ю. Быстров, О.Ю. Кузьмичев // «Информационные технологии в области науки и техники»: матер. 12-ой открытой науч.-практической. конф.— Санкт-Петербург, 2014. – С. 12.
7. Гроп Д. Методы идентификации систем [Текст] / Д. Гроп; пер. с англ. В.А. Васильева, В.И. Лопатина; под ред. Е.И. Кринецкого. – М.: Мир, 1979. 306 с.
8. Быстров С.Ю. Синтез алгоритма контроля коэффициента взаимной корреляции измерений навигационных параметров с целью обнаружения отказов в многократно резервируемых бортовых системах [Текст] / С.Ю. Быстров, Ю.В. Петров. // Вестник РГРТУ №1 (выпуск 51). – Рязань, 2015. С. 14-19.

УДК 004.032.26

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ, РЕКОНСТРУИРУЮЩЕЙ ТРЕХМЕРНУЮ ФОРМУ ОБЪЕКТОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Д.А. Масыгина, П.Е. Кошелев, А.С. Толмачев, Захаров С.А.

Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова

1. Введение. В современном мире стремительно развиваются и внедряются в производственный процесс робототехнические системы и системы технического зрения. Активно продолжают автоматизироваться такие области производства, как проведение сварочных, машиностроительных, режущих, комплекточных, сборочных, упаковочных и складских работ. Например, замена человека на конвейерных линиях способна достичь увеличения производительности до 15% [1]. Однако наряду с этим существуют такие проблемы, как функциональная ограниченность робототехнических манипуляторов, заранее определяемая при разработке алгоритмами перемещения и манипуляций над объектами, а также отсутствие робастности к изменениям условий эксплуатации [2]. Подобные проблемы налагают ограничения на массовое распространение манипуляторов на производствах, и, в особенности, на малых и средних предприятиях.

В связи с этим, возникает необходимость в разработке нового подхода для идентификации объектов на конвейерной линии и дальнейшего взаимодействия схвата робота манипулятора с ними. Одним из наиболее актуальных и перспективных вариантов решения обозначенной проблемы является применение систем технического зрения, основанных на комбинированной работе искусственной нейронной сети и стереокамеры [3]. Такой подход предполагает обработку входящего видеопотока с последующим обнаружением и реконструкцией трехмерной формы искомого объекта, получением информации о положении их в пространстве относительно манипулятора, а также определением опорных точек на моделях объектов, для дальнейшего просчета алгоритма перемещения исполнительного органа и захвата объекта манипулятором.

2.1. Применяемые подходы и методы. В настоящее время для реконструкции трехмерной карты окружающего пространства существуют несколько способов. Изучая перспективные методы и проводя их анализ, можно заметить, что большинство из них основывается на уже устоявшихся подходах, которые совершенствуются с помощью использования новых технологий. Такой способ решения задачи реконструкции трехмерной карты объекта хоть и позволяет добиться лучших показателей качества, но задачу глобально не решает.

К примеру, предлагаемый в статье метод позволяет определить трехмерную модель сцены по стереоснимкам [4]. Для построения трехмерной модели сцены предлагается искать пространственные координаты точек, принадлежащие поверхностям объектов видимой сцены. В некоторых случаях также определяются и опорные точки, что позволяет однозначно определить конструкцию. Авторами статьи был разработан метод, который хорошо подходит для анализа объектов, имеющих простую геометрическую форму. Недостатком описанного в статье метода является ограниченность по количеству точек, для которых производится восстановление. Если же реконструируемый объект имеет достаточно сложное строение, метод не даёт достаточного уровня детализации для получения достоверной информации о нём.

2.2. Предлагаемый подход. В данной статье представляется усовершенствованный подход к решению задачи. Предложенный метод разбивает сцену на несколько независимых геометрических поверхностей, с последующей поэтапной обработкой нейросетевыми алгоритмами, для извлечения требуемых параметров целевых объектов (положение, ориентация, масштаб) из видеопотока. В свою очередь, задача определения пространственных характеристик объекта решается с помощью применения стереокамеры. Полученные телеметрические данные используются для последующей реконструкции трехмерной формы объектов.

2.3. Получение пространственных характеристик сцены. Стереокамера представляет собой сочетание двух камер. Внутриосевое расстояние стереокамеры равно внутриглазному расстоянию, что позволяет достичь максимального эффекта повторения бинокулярного зрения человека и возможности захвата трехмерного изображения [4]. На основе получаемых изображений с двух камер, с помощью математического аппарата триангуляции можно получить облако трехмерных точек. Полученное облако представляет собой массив значений и содержит расстояние для каждого пикселя от камеры до видимых объектов. Однако рассматриваемый метод демонстрирует проблемы, связанные с неравномерным распределением и структурной неоднозначностью между целевыми объектами и фоном. Поэтому, для того, чтобы решить подобную проблему, используется дополнительный метод определения целевых объектов с помощью сверточных нейронных сетей.

2.4. Распознавание объектов. Одним из эффективных методов решения задачи является использование сверточных нейронных сетей. Подобные нейросети получили массовое распространение благодаря их нацеленности на решение сложной задачи распознавания объектов. Существует достаточно большое количество архитектур нейронных сетей. Однако при подборе необходимо учитывать их функциональные возможности, из-за чего выбор

становиться весьма ограниченным. Так как в производственных условиях требуется высокая скорость обработки видеопотока, с сохранением достаточного уровня точности, и, возможность классификации и сегментации объектов. Наибольшего прогресса в области скорости обработки добились в архитектуре YOLACT [5]. В ней разделяют сегментацию экземпляра на две параллельные задачи. В первой задаче используются сверточные сети для генерации набора масок-прототипов одинакового размера для каждого изображения, а в выходных данных используется функция ReLU для нелинеаризации. Вторая задача — обнаружение объектов на основе якоря. Он содержит три ветви: первая ветвь используется для прогнозирования коэффициентов маски для каждого прототипа, вторая для прогнозирования достоверности категорий экземпляров, а третья для прогнозирования координат ограничивающей рамки.

В освещаемой в статье СТЗ, сверточная нейронная сеть выполняет три этапа обработки входящего видеопотока: 1) классификация объектов; 2) сегментация объектов; 3) определение опорных точек объектов. Задачи 1-2 проиллюстрированы на рис.1.

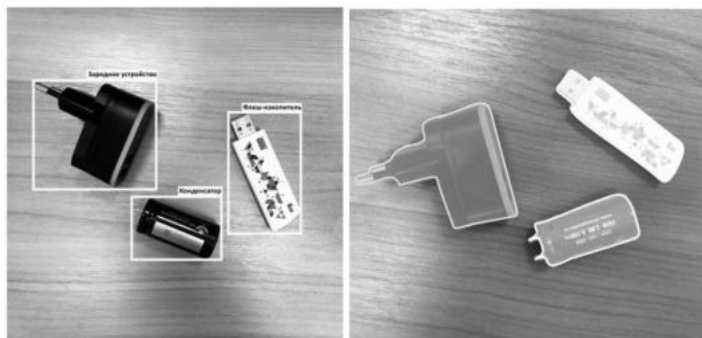


Рис.1. Пример множественной классификации и сегментации объектов на изображениях

2.5. Обнаружение опорных точек объекта. Нейронные сети классифицируют объект как единое целое, не различая его поверхности, соответственно, возникает проблема определения метода, который бы однозначно определял пространственные характеристики целевого объекта. Описанную проблему можно решить методом определения опорных точек. В качестве таких точек могут выступать различные области геометрического изменения поверхности объекта (границы, углы), а также визуально выраженные места.

Модели глубокого обучения могут быть обучены прогнозировать местоположение опорных точек, в этом случае речь идёт о решении задачи регрессионного анализа. В качестве независимых входных параметров выступают пиксели изображения целевого объекта, а зависимыми входными параметрами являются координаты опорных точек объекта.



Рис. 2. Опорные точки объекта

2.6. Определение характеристик объектов. Как отмечалось ранее, на основе полученных телеметрических данных производится реконструкция трехмерной формы объектов. В рамках задачи реконструкции предлагается, вместо попытки прямой реконструкции формы объекта, использовать замещающую трёхмерную модель, формируемую из геометрических примитивов по заданному шаблону, подобранную в соответствии с классифицированным объектом. Предлагаемый подход позволит не только упростить реконструкцию сцены и объектов на ней, но и повысить гибкость алгоритма захвата объекта.

Описанный подход предполагает решение двух задач – сопоставление положения и габаритов замещающей модели и целевого объекта. Первая задача сопоставления пространственного положения решается использованием опорных точек. Алгоритм заключается в определении с помощью нейронной сети положения опорных точек объекта на сегментированной части изображения, с последующим сопоставлением найденных точек с аналогичными на замещающей трехмерной модели. Второй задачей является определение габаритов объекта. Алгоритм решения заключается в следующем: на основе сегментированного контура целевого объекта определяется искомая область проведения расчетов на массиве облака трехмерных точек. Рассматриваемая область сопоставляется с расположением ключевых точек, что позволяет определить длину граней объекта, на основе которых вычисляется коэффициент масштабирования замещающей трехмерной модели. Схема алгоритма определения габаритов замещающей модели представлена на рис. 3.

2.7. Объект-препятствие. Также, на конвейерной линии возможна ситуация возникновения неизвестного объекта-препятствия, требующего учета при просчете траектории движения манипулятора. Так как нейронные сети не ориентированы на распознавание подобных объектов, возникает задача обнаружения и определения их геометрической формы. Необходимость в определении объекта-препятствия может возникнуть, например, при

частичном перекрытии реконструируемого объекта. В этом случае возникает косвенный признак: распознавание объекта с меньшим процентом идентификации нейронной сети. Как отмечалось выше, подобные случаи не предусмотрены системой распознавания и их обнаружение возможно только по подобным косвенным признакам. Непосредственно реконструкция объекта-препятствия происходит на основе остаточного слоя, то есть слоя без целевых объектов. Представленный слой получается после применения операции симметрической разности между картой глубины и слоем сегментации объектов. Область возникновения косвенного признака сопоставляется с остаточным слоем, в результате чего рассчитывается приблизительный контур объекта-препятствия, который дополнительно обрабатывается алгоритмом Min-Cut [6].



Рис.3.Схема алгоритма определения габаритов замещающей модели

2.8. Используемые аппаратные модули. Систему стереозрения предлагается реализовывать на базе камеры глубины Intel Realsense D435 и одноплатного компьютера Nvidia Jetson Nano. Благодаря компактности представленного решения, достигается возможность интеграции системы машинного зрения без построения сложного комплекса из нескольких устройств. (см. рис.4).

Nvidia Jetson Nano - одноплатный компьютер. Предназначен для встраивания в конечные устройства вроде камер, видеорегистраторов, роботов, интерактивных терминалов и потребительской электроники. Выполнен в формфакторе SO-DIMM. Модуль имеет графический процессор 128 ядер Maxwell, вычислительная мощность 0,5 терафлопс (FP16), центральный процессор 4 ядра ARM Cortex-A57 (1,5 Гц), ОЗУ 4 Гбайт 64- бит LPDDR4 25,6 Гбайт/с.

Стереокамера Intel Realsense D435 представляет собой готовое аппаратное решение в области стереозрения. Особенностью продукта является его позиционирование как комплексного решения в области СТЗ, гарантированного за счет наличия встроенной RGB-камеры, обеспечивающей входными данными нейросеть, ИК-подсветки, повышающей четкость видеопотока и результирующей карты глубины, а также наличия специализированного микропроцессора RealSense Vision D4, выполняющего все необходимые сложные алгоритмы обработки изображений и получения облака трехмерных точек. Также, еще одним преимуществом использования данной камеры на конвейерном производстве является сочетание в ней широкого поля зрения и датчика глобального затвора, которые обеспечивают чувствительность к слабому освещению рабочего помещения. Стереокамера имеет точность измерения глубины с погрешностью < 2% на расстоянии 2 м, диапазон рабочей области от 0,3 м до 3 м, частоту до 90 кадров в секунду по глубине и 30 кадров RGB в секунду.

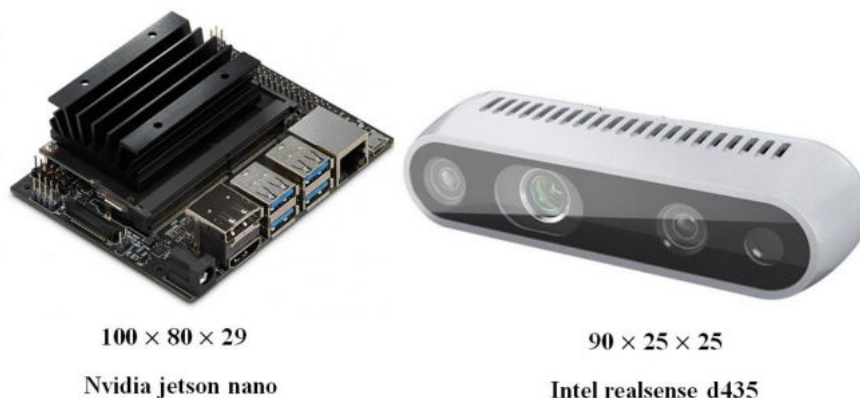


Рис.4. Nvidia Jetson Nano и камера глубины Intel Realsense D435

3. Применение на производстве. Представленный алгоритм позволяет проводить реконструкцию объекта, определять его пространственные характеристики, реализовывать сложные сценарии по захвату объекта схватом автономного манипулятора. Конкретная реализация данного метода предполагает интеграцию представленной СТЗ в

систему управления промышленным манипулятором. Благодаря высокой степени адаптивности и гибкости полученной системы, возникает возможность выполнения более сложных и составных операций на промышленном производстве. Например, предлагаемая ко вниманию система при работе на конвейерной линии способна выполнять задачи сортировки, перемещения, упаковки объектов в нестатичных условиях, то есть при неизвестных параметрах, таких как положение, ориентация, порядок объектов на конвейерной линии, а также положение производственного стеллажа, коробки и т.д. Как было отмечено ранее, представленный способ способствует, в особенности малым и средним предприятиям, в автоматизации производства. Выгода использования системы на основе технического зрения так же заключается и в возможности увеличения производственного оборота за счет 24-часового режима работы и повышенной точности повторяемых операций. Еще одним немаловажным преимуществом внедрения на производство является относительно небольшая стоимость системы, а также возможность использовать более бюджетный манипулятор, так как не требуется высокая степень повторяемости движений, благодаря просчёту траектории в режиме реального времени. Для оснащения производственного конвейера предложенной системой предприятию потребуется затратить сумму только на установку системы, дальнейшие дополнительные расходы могут возникнуть лишь при необходимости дообучить нейросети, при изменении конечного списка целевых объектов.

4. Заключение. В представленной статье предложен подход к реализации метода оптимизации на производственной конвейерной линии. Посредством применения системы технического зрения и методов на основе сверхточных нейронных сетей и камеры стереозрения система способна в реальном времени однозначно и корректно идентифицировать объект, при этом реконструируя его трехмерную форму. Кроме того, на основе полученной телеметрической информации возможен просчет алгоритмов управления и взаимодействия исполнительного органа с объектами.

Полученная система позволяет расширить спектр возможного применения в производственной области робототехнических систем за счет высокого уровня функциональной адаптивности и робастности к изменениям условий эксплуатации, благодаря чему может использоваться в составе мехатронного манипулятора при выполнении задач сортировки на конвейерном производстве.

Библиографические ссылки

1. Компьютерное зрение в промышленности [Электронный ресурс] // Хабр; URL: <http://habr.com/ru/company/yandex/blog/422087/> (дата обращения 18.04.2022).
2. Алгоритмы управления движением схвата манипулятора / Н.Д.Беклемишев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 47. 36 С.
3. Буянов А. А., Власов А. И. Макеев С.С. Исследование нейросетевых алгоритмов, применяемых для распознавания образов // Молодые ученые - науке, технологиям и профобразованию для устойчивого развития проблемы и новые решения 2-я Междунар. конф. СН. 2000. С. 22–25.
4. Тулицын И.В. Реконструкция трехмерной модели объекта на основе стереопары при решении задач эконструкция трехмерной модели объекта на основе стереопары при решении задач 3D-моделирования // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2011. № 15. С. 88-89.
5. Bolya D. et al. YOLACT: Real-time instance segmentation // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2019. P. 9157–9166.
6. Golovinskiy A., Funkhouser T. Min-cut based segmentation of point clouds // 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops. 2009. P. 39–46.

УДК 678.01:53

ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Марков А.В., Орешина О.А., Лихачев И.В.

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

Современная практика применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) предъявляет все более высокие требования к их физико-механическим характеристикам. Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев эти требования противоречивы, то есть улучшение одних характеристик, как правило, достигается в ущерб другим. Например, улучшение радиопоглощающих свойств ПКМ (за счет использования в качестве наполнителя оксида железа трехвалентного, карбонильного железа, оксидов алюминия, никеля и др.) сопровождается ухудшением механических характеристик. Поэтому разработчикам новых функциональных материалов требуется инструмент, позволяющий прогнозировать свойства ПКМ, с последующей оптимизацией характеристик ПКМ, поскольку синтез новых ПКМ сопровождается постоянным поиском компромисса между реализуемыми физико-механическими свойствами.

Неоднородность строения ПКМ, в том числе дисперсно-наполненных, определяет отличительные особенности их исследования. Разработка методов моделирования механического поведения ПКМ имеет практическую значимость.

Актуальность исследования механического поведения неоднородных по своей структуре материалов подтверждается опубликованными результатами исследования ученых. Впервые в работах В.Фойгта и А.Рейсса приведено осреднение упругих характеристик кристалла. Так, Фойгтом применено предположение о постоянстве в теле деформаций, Рейссом сделано аналогичное предположение о постоянстве в теле напряжений [1-2].

В дальнейшем Хилл доказал [3], что метод Фойгта позволяет сделать оценку сверху, метод Рейсса – оценку снизу при оценке упругих свойств ПКМ. Усовершенствование данных границ получили Хашин и Штрикман [4].

В работах исследователей отмечено, что в первичных моделях прогнозирования свойств материалов не учитывались особенности армирующих элементов. К одной из первых моделей, устраняющих данный недостаток, относится модель упругой среды с упругими сферическими включениями. Дьюи было найдено решение задачи при использовании условия несущественного значения объемной доли включений [5]. Рассматривая среды с произвольной объемной долей включений, можно выделить полидисперсную модель. Хашин рассмотрел разработку

модели, с помощью которой можно исследовать среду определенным распределением размеров армирующих частиц, а также оценить величину объемного модуля упругости.

Исследования в области механики композиционных материалов установили, что существенное влияние на механические свойства материалов оказывает межфазный слой. Его образование происходит в области границы раздела компонентов композита. Под межфазным слоем понимается реальная физическая структура, которая может являться результатом химической реакции в зоне контакта составляющих компонентов материала. Представление о данном слое может быть получено также с помощью компьютерного моделирования с учетом разнообразных особенностей такой зоны. Под особенностью подразумевается взаимная диффузия составляющих композиционного материала, морфология поверхностей раздела компонентов. Из-за различной физической природы слоя отличию подвергаются также и механические характеристики. Этим вызвана актуальность получения оценок влияния свойств такого слоя, меняющихся в широком интервале возможных значений, на результирующие свойства материала.

При применении рассмотренных подходов к прогнозированию свойств ПКМ не учитываются риски и ограничения по составу, что может привести к существенным ошибкам при выборе оптимального соотношения компонентов.

Одним из путей развития исследований ПКМ является разработка автоматизированной системы поддержки принятия решения о составе ПКМ в зависимости от его заданных физико-механических свойств. Данные системы могут базироваться на математических моделях, разработанных с применением симплекс-решетчатого планирования для смеси с ограничениями с учетом риск-ориентированного мышления при многокритериальной оптимизации [6-9].

Нейронная сеть является одним из способов реализации автоматизированной системы поддержки принятия решений. Благодаря гибкой структуре нейронов и их взаимодействия, нейронную сеть можно использовать как средство прогнозирования конечных свойств ПКМ в зависимости от состава текущего материала.

Отличительной особенностью нейронной сети от обычной программы является возможность самообучения. Эта особенность позволит сократить время прогнозирования свойств ПКМ при использовании новых данных по материалам и их свойствам. От процесса обучения зависит скорость работы нейронной сети и количество ошибок, которое сеть может допустить в первых и последующих циклах обучения. Поэтому разработке структуры обучения сети необходимо уделить особое внимание. Обучение нейронной сети должно начинаться с общих понятий о материалах и их свойствах. Необходимо предоставить нейронной сети экспериментальные данные о свойствах ПКМ в зависимости от процентного содержания ключевого наполнителя, значительно влияющего на конечные свойства ПКМ. Используя данные основан физико-химического взаимодействия материалов, нейронная сеть сможет прогнозировать конечные свойства ПКМ в зависимости от того является ли этот материал новым или этот материал уже существует в ее базе знаний. Подобное решение позволит сократить время исследования ПКМ, а также процесс подбора материалов, которые необходимо совместить для достижения конкретных свойств ПКМ.

Библиографический список

1. Voigt W. Lehrbuch der Kristallphysik – Berlin: Teubner, 1928. – 962 P.
2. Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung // Z. Angew. Math und Mech. – 1929. – 9, 1. – P. 49-58.
3. Hill R. Theory of mechanical properties of fibrestrengthened materials // J. Mech. Phys. Solids. – 1964. – V. 12. – №4. – P. 199-218.
4. Hashin Z., Shtrikman S. A variational approach to the theory of the elastic behavior of multiphase materials. // J. Mech. and Phys. Solids. – 1963. – 11, №2. – P. 127-135.
5. Dewey J.M. The elastic constants of materials loaded with non-rigid fillers // J. Appl. Phys. – 1947. – V. 18. – P. 578.
6. Орешина, О.А. Учет рисков при автоматизации процесса создания нового полимерного композиционного материала/ О.А. Орешина // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2020. – №2. – С. 120-124.
7. Орешина, О.А. Концепция математического моделирования свойств физико-механических характеристик композиционных материалов/ А.В. Марков, О.А. Орешина // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2020. – № 12. – С. 3-6.
8. Орешина, О.А., Автоматизация процесса принятия решения о составе полимерных композиционных материалов/ А.В. Марков, О.А. Орешина // Автоматизация. Современные технологии. – 2020. – Т.74. – №10. – С.440-443.
9. Орешина, О.А. Проблемы и подходы к моделированию характеристик радиопоглощающих дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов/ А.В. Марков, О.А. Орешина, И.В. Лихачев// Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. – 2021. – № 2. – С.79-83.

УДК 004.032.26+004.832.22

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ АБИТУРИЕНТА НА БЮДЖЕТНУЮ ФОРМУ ОБУЧЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ БАКАЛАВРИАТА И СПЕЦИАЛИТЕТА ПРИ ПОМОЩИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИЁМНЫХ КАМПАНИЙ ЗА ПРОШЕДШИЕ ГОДА

А. А. Шibaев, В. А. Михайлов, В. С. Добровольский

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

Предлагается в качестве метода прогнозирования поступления абитуриента на бюджетную форму обучения образовательных программ бакалавриата и специалитета использовать методы машинного обучения, в частности метод нейронных сетей. Применимость предлагаемого способа прогнозирования демонстрируется на примерах реализации искусственного интеллекта [1] и решения задач классификации данных и объектов. Производится анализ данных, подающихся абитуриентами при составлении заявления на поступление в высшее учебное заведение Балтийского Государственного Технического Университета «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, построение модели и метода вычисления вероятности поступления, рассмотрение методов работы нейронных сетей для прогнозирования и их применимости, в качестве данных для обучения оной, предлагается использовать статистические данные приёмов прошедших годов. Рассматриваемая в работе модель нейронной сети, демонстрирует применимость машинного обучения и нейронных сетей в частности, для прогнозирования

вероятности поступления абитуриентов в высшие учебные заведения на бюджетные формы обучения по программам бакалавриата и специалитета.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, прогнозирование, машинное обучение, нейронные сети.

Введение

В набирающих популярность методах машинного обучения, предлагается использование модели, представленной в виде взвешенного ориентированного графа с специальными, так называемыми, активационными функциями в вершинах, данная модель называется нейронной сетью. В качестве примеров использования данного подхода часто приводятся задачи распознавания образов с изображений и прогнозирования, зачастую направленные на предсказывание количества продаж товаров или услуг. При рассмотрении задачи, можно обнаружить схожесть конечного результата с уже используемыми моделями для предсказания решений людей, к примеру, в банковской сфере [2], где модель, основана на схожих принципах, помогает принимать решение организации о том, выдать ли денежные средства рассматриваемому клиенту в долг или нет. В настоящей работе рассматривается возможность использования нейронных сетей для прогнозирования поступления абитуриентов в высшее учебное заведение.

Составление модели прогнозирования

Рассмотрим порядок поступления и составим модель для прогнозирования. Необходимо сразу определиться с результатом вычисления системы, результатом работы модели должен быть ответ поступит ли абитуриент или нет и с какой вероятностью данное случится. При поступлении, абитуриент подаёт заявление, в котором указаны: персональные данные, результаты экзаменов, достижения и список специальностей, куда бы он хотел поступить. Затем, образовательное учреждение формирует ранжированные по баллам списки людей, проходящих конкурс, он составляется на основе контрольных цифр приёма, данные цифры указывают, какое количество мест выделено на каждую специальность, в рассматриваемой задаче учитываются только контрольные цифры приёма бюджетной формы обучения программ подготовки бакалавриата и специалитета. После публикации, у абитуриента есть время, чтобы подать согласие на зачисление, если такого от него не поступает, то конкурсный список пересобирается и на освободившиеся места могут уже претендовать люди, не входящие в начальную формацию списка. Таким образом, сказать поступит ли абитуриент или нет, очень просто, если сумма баллов за его экзамены и за индивидуальные достижения больше чем у человека, находящегося на последней позиции списка, то человек сможет поступить при подаче заявления и при условии, что его не вытеснит из списка n-ое количество человек с суммой баллов больше. Но далеко не всегда все люди из первой итерации списка, подают согласие на зачисление, они могут сделать выбор в пользу другого учебного заведения, смежной специальности или по личным причинам.

Для решения поставленной задачи, предлагается следующая модель. Необходимо составить отсортированные списки абитуриентов, подавших заявление, на каждую специальность. Затем необходимо из данных списков убрать всех людей, попадающих в интервал контрольных цифр приёма, которые вероятнее всего не подадут согласие на рассматриваемую специальность. Таким образом, задачей модели является составление списков претендентов, из которых впоследствии будут убраны люди, не планирующие подачу согласия. После всех преобразований, прогноз поступления сводится к проверке, попадает ли абитуриент по сумме баллов в итоговый список. Вероятность вычисленного результата можно определить, как произведение вероятностей событий всех идущих пред абитуриентом людей. Данное решение позволяет не только спрогнозировать поступление человека, но и самостоятельно сформирует списки претендентов наиболее заинтересованных, которые с наибольшей вероятностью подадут согласие и облегчат работу члена приёмной комиссии. Для прогнозирования выбора абитуриента предлагается использовать методы машинного обучения, а именно нейронные сети. То есть в общем случае решается задача предсказания дискретных меток классов подаст/ не подаст согласие, которые могут быть кодированы любым удобным способом.

Описание нейронной сети

Существует множество методов машинного обучения, для решения данной задачи предлагается использовать метод нейронных сетей. Как писалось ранее, нейронная сеть представляет собой взвешенный ориентированный граф с функциями в вершинах. В структуре данного графа выделяют элементы характерные для всех нейронных сетей. Для упрощения представления нейронных сетей, граф делят на слои, которые представляют собой обычную совокупность вершин или же нейронов. Выделяют три вида слоёв: входной слой, выходной слой, скрытый слой. Входной слой — данный слой является обязательным, поскольку является стартовой точкой сети, он инициализирует нейронную сеть, принимая стартовые значения и, если это необходимо нормирует их. Выходной слой — также обязателен, поскольку выдаёт окончательный результат работы нейронной сети, который может быть также нормирован посредством активационных функций. Третьим слоем является так называемый скрытый слой, он выполняет роль чёрного ящика, который преобразует входные значения в желаемый результат, число скрытых слоёв в сети не ограничено. Как писалось ранее, вершинами в сети выступают нейроны, они содержат активационные функции для преобразования, хранящегося в себе значения в необходимый результат. Между нейронами находятся рёбра, они имеют вес и связывают нейроны одного слоя с другим, принято, что в одном слое не может быть связанных между собой нейронов. Также, для упрощения вычислений и представлений, принято считать, что каждый нейрон текущего слоя связан с каждым нейроном следующего. Процедуру вычисления скрытых слоёв и выходного слоя можно представить, как вектор значений активационной функции с аргументами скалярных произведений выходных значений предыдущего слоя с вектором весов, лежащих между, или же в виде следующего уравнения:

$$\alpha^n = \sigma^n \left(\begin{pmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_i \end{pmatrix}^{n-1} * \begin{pmatrix} W_{1,1} & \dots & W_{1,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{j,1} & \dots & W_{j,i} \end{pmatrix} \right), \quad (1)$$

где α — вектор выходных значений слоя, W — матрица весов, i — число нейронов в слое, j — количество исходящих ребер из нейрона, σ — активационная функция слоя. На вход подаётся какое-то количество значений,

они проходят через весь граф, умножаясь на веса рёбер и преобразовываясь в вершинах по заданным функциям в необходимый выходной сигнал, на выходе можно получить сколь угодно количество значений. Чтобы нейронная сеть могла рассчитывать необходимые результаты, она должна обучиться на какой-либо достоверной выборке. Обучение нейронной сети — это поиск наилучшего набора весов для максимизации точности предсказания, то есть задача оптимизации [3]. На вход подаются различные наборы стартовых значений, а после вычислений, сеть корректируя веса рёбер или же насыщая зависимые от достоверного результата нейроны обучается, становясь ближе в вычислениях к желаемому результату.

При таком методе образуется вопрос: какое количество слоёв и нейронов в них является достаточным, чтобы сеть работала как можно эффективнее? Чёткого ответа на этот вопрос нету, количество слоёв и нейронов ограничено только лишь мощностями вычислительной машины и временем, достаточным для обучения и вычислений. В разрез с выше сказанным существует гипотеза, утверждающая, что каждую готовую сеть можно представить с одним скрытым слоем, при этом сохранив ту же эффективность вычислений. Активационная функция — это такая функция, которая определяет выходной сигнал нейрона, определяясь набором входных сигналов и весов [4]. Не каждую функцию можно считать активационной, есть набор рекомендательных правил:

- функция должна быть непрерывной и бесконечной на всей области определения;
- функция активации монотонна и никогда не меняет направления;
- функция активации нелинейна или же имеет точки перегиба;
- функция активации и её производная должны иметь низкую вычислительную сложность.

Выделяют набор наиболее эффективно себя показывающих функций: сигмоида, гиперболический тангенс, ReLU. Формулы 2, 3 и 4 соответственно.

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}. \quad (2)$$

$$f(x) = th(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}. \quad (3)$$

$$f(x) = \max(0, x). \quad (4)$$

Из данного списка функций можно выделить две, которые могут показать себя с наилучшей стороны при решении данной задачи. Наиболее часто используемой функцией активации является ReLU, её популярность объясняется самым наименьшим временем, затраченным на обучение сети [4], о котором будет упомянуто далее. Также внимания достойна и первая функция — сигмоида, поскольку вероятность не может быть больше 1 и меньше 0, то сигмоида является хорошим решением для накладывания ограничения. Ещё одним плюсом можно считать, что функция сигмоида принимает значение при очень больших значениях аргумента и преуменьшает его, что так же не позволит выдавать абитуриентам ответ с вероятностью равным 1. Необходимо отметить, что принято на каждый нейрон одного слоя отводить одну и ту же функцию активации, хотя опять же ограничения не накладываются. Последним фактором в определении нейронной сети, также необходимо отметить веса рёбер, они выбираются зачастую случайным образом, что позволяет сети самостоятельно находить закономерность и тем самым насыщать необходимые нейроны в достаточной мере. На данный момент важно понять, что решающими элементами в вычислениях сети являются веса рёбер и активационные функции нейронов.

После рассмотрения структуры сети необходимо выбрать метод обучения. Ставя задачу обучения нейронной сети как задачу оптимизации, в которой в качестве оптимизируемых параметров выступают веса ребер графа, уместным будет ввести понятие функции правдоподобия, пояснив его на примере логистической регрессии, которая по сути своей представляет собой нейронную сеть без скрытых слоев. Логистическая регрессия как алгоритм классификации предназначена для того, чтобы найти линейную границу между двумя классами. Нейронная же сеть, являясь многомерным обобщением логистической регрессией позволяет находить нелинейные разделяющие правила. Обозначим вероятность принадлежности объекта выборки x_i к классу $y = 1$:

$$P(y = 1 | x_i) = f(z), \quad (5)$$

где $z = \theta^T x_i = \theta_0 + \theta_1 x_{i1} + \dots + \theta_n x_{in}$, x -компоненты вектора независимых переменных (предикторов); θ -вектор параметров (коэффициентов регрессии); $f(z) = \frac{e^z}{e^z + 1} = \frac{1}{1+e^{-z}}$ — логистическая функция.

Далее вводится функция правдоподобия [4], которая представляет собой вероятность наблюдать данный вектор \vec{y} у выборки X :

$$P(\vec{y}|X, \vec{\theta}) = \prod_{i=1}^l P(y = y_i | \vec{x}_i, \vec{\theta}). \quad (6)$$

Поскольку искать экстремум суммы гораздо легче, чем произведения, то от выражения (6) берется логарифм:

$$\log P(\vec{y}|X, \vec{\theta}) = \log \prod_{i=1}^l P(y = y_i | \vec{x}_i, \vec{\theta}) = \sum_{i=1}^l \log\left(\frac{1}{1+e^{-y_i \vec{\theta}^T x_i}}\right) = -\sum_{i=1}^l \log(1 + e^{-y_i \vec{\theta}^T x_i}). \quad (7)$$

Максимизация выражения (7) приводит к минимизации функции:

$$\mathcal{L}_{\log}(X, \vec{y}, \vec{\theta}) = \sum_{i=1}^l \log(1 + e^{-y_i \vec{\theta}^T x_i}). \quad (8)$$

На основании этой идеи в нейронных сетях вводится понятие функции потерь или же ошибок, которая характеризует критерий качества в задаче оптимизации весов нейронной сети. Для задач бинарной классификации наибольшее распространение получила бинарная кросс-энтропия [4]:

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \log_2(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log_2(1 - \hat{y}_i), \quad (9)$$

где N — число наблюдений в обучающей выборке, y_i — реальное значение метки класса объекта, \hat{y}_i — предсказанная сетью вероятность объекта принадлежать к классу 1.

Также широко в нейронных сетях как в задачах классификации, так и в задачах регрессии, используется среднеквадратичная функция ошибок квадратов ошибок [4]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2. \quad (10)$$

В настоящее время наиболее часто используемым методом обучения нейронных сетей является градиентный спуск с обратным распространением ошибки [3]. Для того, чтобы добраться до минимума функции ошибок,

необходимо двигаться в направлении, противоположном градиенту, который характеризует направление наискорейшего возрастания функции. Таким образом, обозначая функцию ошибок E , будем на каждой подгруппе правильных ответов, добавлять к каждому весу $W_{i,j}$:

$$\Delta W_{i,j} = -\eta \partial E / (\partial W_{i,j}), \quad (11)$$

где η – скорость обучения. Смысл обратного распространения ошибки заключается в том, чтобы вычислять поправки к весам находящихся ближе ко входу сети по поправкам весов, находящихся ближе к выходу сети. Тогда поправка для всех весов выражается как

$$\Delta W_{i,j} = -\eta \delta_j, \quad (12)$$

где δ_j — поправка к весу от поправок следующих за этим узлов сети, конкретный вид которой зависит от функции потерь сети и активационных функций предыдущих узлов сети [3, 4]. Таким образом наибольшее значение имеет нахождение выражения для поправки в веса ребер, идущих от предпоследнего к последнему слою сети. Также в формулу (12) может в качестве множителя входить коэффициент инерциальности α , позволяющий избегать оврагов в поверхности целевой функции.

На фоне вышесказанного, учитывая, что алгоритм обучения сети предполагает многократное вычисление производных активационных функций нейронов, логично в качестве функции активации выбирать наиболее простой вычислительно вид активационной функции. Наиболее простой с этой точки зрения является активационная функция ReLU, производная которой имеет ступенчатый вид:

$$f'(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0 \\ 1 & \text{при } x \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

При этом данная активационная функция достаточно универсальной, так как комбинацией ReLU функций может быть аппроксимирована практически любая нелинейная функция.

Повторяя данный алгоритм множество раз можно с высокой долей вероятности быть уверенным, что подобранные веса обращают функцию потерь в минимум. Проблемы, с которыми также можно встретится при обучении — переобучение, недостаточное обучение, плохая выборка. Поскольку предлагается создать несколько сетей, для каждой специальности, то и выборка становится в разы меньше, из этого можно сделать вывод, что переобучение сети не грозит, к тому же диапазон определяющих данных не велик, если взять в пример один из экзаменов, то его границы определены от 0 до 100, беря в учёт минимальный балл за экзамен и минимальный порог экзамена учебного заведения, то границы определения экзамена сокращается на треть. Необходимо устранить проблему недостаточности обучения, для этого предлагается взять за отправную точку 100 тысяч эпох, эпохой называется одна итерация обучения сети на всей выборке, если результат не будет удовлетворительным, то предлагается увеличение числа на порядок. Считается, что оптимальным делением выборки на обучающую и тестирующую является соотношение два к одному, при этом данные обеих множеств всячески тасуются между собой. Большое количество эпох позволит сети пройти как можно большее количество разновидностей множеств.

Обобщим всё выше сказанное. Для реализации нейронной сети по предсказанию решения абитуриента: “Подать ли согласие на поступление?”, предлагается использовать следующую схему. Нейронная сеть должна содержать 10 скрытых слоёв по 1000 нейронов в каждом с активационных функций ReLU, в качестве выходного слоя предлагается использовать один нейрон с активационной функцией сигмоиды, данный выход обеспечит результат, попадающий в диапазон от 0 до 1, где 0 — “Не подаст заявление” и 1 — “Подает заявление”. Для обучения предлагается использовать метод градиентного спуска, причём не рекомендуется использования метода dropout [5], что не даёт модели переобучится, но в тоже время замедляет обучение одной из-за блокировки значимых для выходов нейронов. Предлагается использовать 100 тысяч эпох для обучения сети, также рекомендуется увеличение на порядок, в неудовлетворительном случае. Количество нейронов в входящем слое, можно определить после анализа данных.

Выбор входных значений данных

Для корректной работы нейронной сети необходимо подобрать набор входных данных, как можно большей размерности, которые могли бы повлиять на выбор абитуриента. Количество баллов, именно по этому параметру и принимается решение как со стороны приёмной комиссии, так и со стороны абитуриента, не редок случай, когда абитуриенты с максимальными баллами по экзаменам подают заявления в множество высших учебных заведений, а после выбирают наиболее выгодное предложение. Важно отметить, что необходимо использовать именно результаты по каждому экзамену, а не средний балл или сумму, поскольку это даст большее количество опорных точек для вычислений нейронной сети. Также важно заметить, что набор экзаменов при поступлении делится на профильный и обязательные экзамены, а именно русский язык и математика, разбиение на отдельные дисциплины может показать общую заинтересованность и подготовку к основополагающим дисциплинам специальности. Также необходимо использовать сумму баллов за индивидуальные достижения, в данной ситуации, не известно сколько различных достижений учитывается, поскольку количество достижений в отличии от экзаменов не нормировано, нормирована лишь их сумма, которая не может превышать 10, также при кодировании всех оцениваемых достижений, может произойти ситуация, когда нейронная сеть не сможет предсказать выбор человека, поскольку участников подающих заявления и при этом участвующих в мероприятии настолько мало или совсем нет, что нейронная сеть не сможет правильно рассчитать. Из общего заявления на поступление, которое составляется непосредственно в самом учебном заведении, можно выделить следующие параметры: количество заявлений на специальности и формы оплаты. Количество заявлений может показать заинтересованность в высшем учебном заведении в целом, не интерес к специальности, а к месту, что может подкрепляется формами оплаты, если человек подаёт на бюджетную форму и на платную, то он вероятнее всего готов заплатить и остаться учиться на выбранной специальности. Если абитуриент подал не только на смежные специальности, но и на специальности, требующие другой набор экзаменов, то для решения такой ситуации предлагается использовать количество оных. Не меньшим показателем заинтересованности является и общая заполняемость контактных данных, таких как дополнительный телефон, электронная почта и социальные сети. Данный параметр показывает общую заинтересованность абитуриента в получении актуальной информации. Заполняемость предлагается подавать сети как количество заполненных полей контактных данных. Так же как предложение для улучшения алгоритмов является добавление в заявление вопроса: “Откуда вы о нас узнали?” и “Какова причина неподачи согласия на зачисление?”, если с абитуриентом всё возможно связаться.

Предлагается использовать данные документа об образовании, а именно: тип, место образования, дата выдачи. Тип и дата могут сказать о своевременности поступления абитуриента, поскольку люди, подающие заявление спустя несколько лет после окончания среднего учебного заведения с меньшей вероятностью его, забурт, так как относятся к выбору места обучения с большей ответственностью. Место обучения может сказать об общем подходе к сдаче экзаменов и их контролю, также скажет приезжий ли человек, ведь приезжий подающий на место проживания в общежитии ограничен возможностями и временем, поэтому он также с наименьшей вероятностью не подаст согласие. Просматривая персональные данные также можно найти закономерности, например, пол абитуриента. В Российской Федерации юноши от 18 до 27 лет обязаны проходить военную службу, но есть люди, стремящиеся вначале закончить обучение, а после отдать долг родине, поэтому можно сказать, что абитуриенты мужского пола также менее расположены к не подаче согласие, чем женского. Из персональных данных так же можно использовать дату рождения, для определения возраста, что коррелирует с датой получения документа об образовании, так как встречаются люди оканчивающие учебные заведения экстерном, а также возраст помогает определить попадает ли абитуриент мужского пола интервал призывного возраста. Последним фактором из личных данных можно было бы отметить фамилию и отчество, поскольку мнение родителя имеет большой вес при выборе, родитель может посоветовать место где сам учился или же посоветовать специальность, в пример можно привести целые поколения врачей, или же по совпадению двух фамилий и отчеств можно сказать о родственных связях, а именно брат, сестра, которые также подвержены родственной близости и с большей вероятностью останутся учиться в одном и том же месте или вместе перейдут в другое. Но данный факт может граничить с обычным совпадением, а если и действительно такое происходит, то шанс данного явления настолько мал, что им можно пренебречь. Так же необходимо упомянуть о гражданстве и месте рождения, данные факторы могли бы сказать о том, что приезжий студент или нет, но роль данного критерия выполняет место образование, ведь зачастую люди переезжают и меняют школы или регионы, а для решения данной задачи важно лишь место и условия последнего учебного заведения.

Подводя итоги, можно выделить следующий набор параметров множества, входящего в нейронную сеть: балл за экзамен 1, балл за экзамен 2, балл за экзамен 3, сумма баллов за индивидуальные достижения, тип документа об образовании, возраст абитуриента на момент получения документа об образовании, место обучения, пол, возраст на момент подачи заявления, количество поданных заявлений на смежные специальности, количество поданных заявлений на специальности с другим набором экзаменов, подавал ли абитуриент заявления на платную форму обучения.

Также немаловажно отметить, что нейронную сеть необходимо обучать не на всех записях прошлых годов. Предлагается отсортировать списки абитуриентов по специальностям за прошедшие приёмные кампании по сумме баллов за экзамены и индивидуальные достижения, затем основываясь на контрольных цифрах прошедших приёмов выделить выборку абитуриентов, начинающуюся от человека с самым высоким баллом до последнего человека из контрольных цифр приёма подавшего согласие на поступление, причём необходимо учитывать людей, не только подавших согласие, но и не подавших. Данное решение несёт в себе следующий смысл: нейронная сеть учится предсказывать выбор человека, попавшего в конкурсные списки и имеющего право на поступление, если человек отказывался, то его место занимал следующий по списку абитуриент, таким образом мы обучаем нейронную сеть на основе выборки абитуриентов, принимающих решение. Или же, человек не попавший хотя бы единожды в конкурсные списки специальность занимает позицию меньшую последнего давшего согласие на поступление человека, поскольку их никто не опрашивал, то и выбора у них не было, следовательно, такие абитуриенты в выборке участвовать не должны.

Заключение

Рассмотренная в данной работе модель нейронной сети для предсказания выбора абитуриента, демонстрирует применимость данного подхода к решению задачи по прогнозированию поступления абитуриента на бюджетную форму обучения по программам бакалавриата и специалитета, что поможет в составлении окончательных списков проходящих конкурс абитуриентов. А, непосредственно, модель вычисления прогнозирования поступления помогает не только заинтересовавшемуся абитуриенту в осведомлённости и его шансах на поступление, но и самим членам приёмной комиссии, чтобы те могли принимать решения, на основе списка вероятнее всего заинтересованных в поступлении абитуриентов.

Библиографический список

1. Риа Новости [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20220418/meditsina-1783559123.html> (дата обращения 19.04.2022).
2. КиберЛенинка [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-neyronnyh-setey-v-reshenii-zadachi-kreditnogo-skoringa/viewer> (дата обращения 19.04.2022).
3. Хайкин Саймон Нейронные сети: полный курс. М: Изд-во «Вильямс», 2006. 89, 241, 304, 316,с.
4. Бенджио И. Гудфеллоу Я. Курвилль А. Глубокое обучение. М: Изд-во «ДМК», 2016. 123, 158, 170, 180 с.
5. Николенко С., Кадурич А., Архангельская Е. Глубокое обучение погружение в мир нейронных сетей. СПб: Изд-во «Питер», 2018. 132 с.

УДК 004.032.26

ПРОГРАММНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ПО РАСПОЗНАНИЮ И КОНВЕРТАЦИИ МУЗЫКАЛЬНЫХ ФРАГМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А. Р. Глухов

Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого

Нейронная сеть представляет собой особую математическую модель, построенную по принципам работы мозга живых существ. Применение нейронных сетей безгранично, как и их возможности, но чаще всего нейросети применяются для прогнозирования, распознавания образов, оптимизации и анализа данных. Конкретизация задач данных областей определяет применение нейронных сетей в распознавании изображений, звуков, в обработке фото и видео, синтезе речи, при создании систем беспилотного управления в автомобилях или самолетах и др. Такой огромный охват различных сфер и категорий связан с тем, что нейросеть не привязана к конкретным значениям или

условиям; все, что влияет на ее качественную работу, помимо таких очевидных вещей как архитектура и типы слоев и функций активации самой сети, – это ее модель обучения. Одна и та же нейронная сеть может выполнять совершенно различные задачи в зависимости от состава своей модели обучения. Данное обстоятельство имеет и существенный недостаток – необходимость в качественном и массивном наборе данных для заявленного процесса. Например, при обучении нейросети для распознавания голоса важно, чтобы в наборе данных присутствовали образцы речи множества людей с различным произношением и даже дефектами речи, т.к. в случае недостаточной вариативности в обучающем наборе данных, высока вероятность того, что нейросеть будет корректно работать только с людьми, которые непосредственно принимали участие в ее обучении, и выдавать абсолютно некорректные результаты при работе со всеми остальными.

Интерес представляет и внутренний состав нейронной сети. Множество различных видов нейронных сетей определяет множество их различных структур, перечисление которых занимает достаточно много времени и не имеет смысла. Поэтому рассмотрим самый простой и понятный случай – сеть прямого распространения. В своей общей структуре нейросеть, как единый организм, принимает на вход набор числовых значений, а на выходе дает вероятность или массив вероятностей соответствия входного значения одному из вариантов. Данное положение является истиной вне зависимости от того, с чем работает нейросеть: изображением, звуком или текстом. Любые входные данные, так или иначе, перед попаданием на вход нейронной сети преобразуются в числовые значения. Далее можно выделить слои нейронной сети, среди которых имеются: один входной слой, один выходной слой, а также скрытые слои, количество которых нельзя определить однозначно даже при наличии множества формул, имеющих свои недостатки и не способных в полной мере гарантировать правильную работу сети в случае полного следования им. Слои между собой взаимодействуют последовательно. Сначала данные поступают на входной слой, далее проходят через все скрытые слои, а затем попадают на выходной слой, после прохождения через который и преобразуются в выходной массив вероятностей. Каждый слой состоит из нейронов, которые в рамках своего слоя никак не связаны друг с другом, но связаны с нейронами других слоев синапсами – особыми весами, которые настраиваются во время обучения нейронной сети. Количество синапсов, передающих значения в нейрон, равно количеству нейронов предыдущего слоя или числу параметров в массиве входных данных (в случае входного слоя). Число принимающих значения из нейрона синапсов равно или количеству нейронов следующего слоя, или числу возможных вариантов в массиве выходных данных (в случае выходного слоя). Самый нижним уровнем нейросети является непосредственно нейрон, который представляет собой одну из трех функций: сигмоид $F(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$, в тех случаях когда выходные вероятности могут быть только положительными; гиперболический тангенс $F(x) = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1}$, когда выходные вероятности могут быть также и отрицательными; линейная, не имеющая особого практического применения. Аргумент x для данных функций получается как результат сложения выходных значений нейронов предыдущего слоя, умноженных на веса, соединяющие каждый нейрон предыдущего слоя с текущим нейроном. Например, если на предыдущем слое было два нейрона, выходные значения которых были 1 и 0.9, а веса соответственно 0.5 и 0.3, то значение на выходе текущего нейрона будет $x = 1 * 0.5 + 0.9 * 0.3 = 0.77$, а значение сигмоида $F(x) = \frac{1}{1+e^{0.77}} = 0.3165$.

Рассмотренная структура и принцип работы нейросети позволяют понять, почему она универсальна и эффективна для решения многих задач. Рассмотрим решение проблемы распознавания содержания музыкальных фрагментов посредством нейросети. По данному направлению имеется множество классических алгоритмов, которые решают требуемую задачу весьма эффективно, однако большинство из них основывается на использовании оконных функций, в следствие чего имеют один очень существенный недостаток, не позволяющий использовать их для классификации всех музыкальных фрагментов – для каждого фрагмента они выделяют наиболее часто встречающуюся частоту, соответствующую различным нотам, но не позволяют определять аккорды и различные приемы игры на всевозможных инструментах, т.к. в случае присутствия последних во фрагменте алгоритм не поймет этого и распознает аккорд не как аккорд, а как наиболее близкую к его частоте ноту, что неприемлемо для практического применения.

Обоснование необходимости применения нейросети для решения поставленной задачи определяет выделение отдельных подзадач, совокупность которых определяет исходную задачу. Для получения из входного записанного трека итогового файла с нотами, необходимо:

1. Разбить исходный файл на фрагменты;
2. Пропустить фрагменты через нейросеть;
3. Записать результат работы нейросети в файл.

Алгоритм решения поставленной задачи может быть представлен последовательностью пяти взаимосвязанных шагов:

1. Записать данные из входного файла в массив в виде цифр, отображающих отклонение звуковой волны от нуля в текущий момент времени.
2. Разбить исходный массив входных данных на подмассивы фрагментов.
3. Для каждого подмассива фрагментов:
 - 3.1. Пропустить массив фрагмента через нейронную сеть;
 - 3.2. Определить индекс элемента с наибольшим значением в массиве выходных вероятностей нейронной сети;
 - 3.3. Записать полученный индекс в результирующий массив.
4. Конвертировать результирующий массив в требуемый тип.
5. Сохранить конвертированный массив в файле.

Опишем логику построения нейронной сети. Входной слой нейронной сети должен содержать 60 нейронов, число которых обусловлено тем, что фрагменты, поступающие на вход, могут быть в худшем случае записаны в темпе 200 и размере, включающем шестнадцатые доли, тогда как темп задается для четвертых долей, следовательно в минуту будет 800 отдельных ударов-фрагментов, что при записи в 48 кГц соответствует разбиению одной секунды записи на части по 60 миллисекунд, т.е. 60 фрагментов, так как $48000/800 = 60$. Выходной слой должен содержать 60 нейронов, т.к. разрабатываемая нейросеть не преследует цели охватить все возможные ноты, аккорды и приемы

игры в силу отсутствия ресурсов для реализации таковой, а разрабатывается лишь для демонстрации возможности создания подобной. Реализуемая сеть сможет различать лишь 6 различных типов фрагментов: аккорд E7#9, нота E4, слайд с ноты G3 на ноту A3, вибрато ноты B4, подтяжка ноты D5 до ноты E5, пул офф ноты D4# на ноту C4#. Для определения количества скрытых слоев необходимо обратиться к природе звуковых волн, а также теории, связанной с выбором количества слоев для функции в зависимости от ее природы. Теория определяет следующие положения: 1) одного скрытого слоя достаточно, если исследуемая функция непрерывна и определена на компактной области; 2) одного скрытого слоя достаточно, если функция имеет ограниченное количество принимаемых значений; 3) двух скрытых слоев достаточно во всех остальных случаях. Для амплитуды звука звуковая волна имеет ограниченное число значений, число которых определяется через ее глубину квантования. Более важным параметром для решаемой задачи выступает частота звуковой волны, которая может принимать значения в диапазоне от 16 Гц до 20 кГц для большинства физических инструментов. Число возможных частот в этом промежутке является бесконечным, а звуковая волна не является непрерывной (исключая случаи, когда она генерируется тонгенератором), что определяет наличие двух скрытых слоев для правильной работы нейросети. Для определения количества нейронов в скрытых слоях используется правило геометрической пирамиды, согласно которому : $r = \sqrt[3]{\frac{n}{m}}$, $k1 = mr^2$, $k2 = mr$, где n – число нейронов на входном слое, m – число нейронов на выходном слое, $k1$ – число нейронов на первом скрытом слое, $k2$ – число нейронов на втором скрытом слое. Таким образом для разрабатываемой нейронной сети необходимо 28 нейронов для первого скрытого слоя и 13 нейронов для второго скрытого слоя. Работать каждый нейрон будет на основе сигмоидной функции.

Для реализации данного алгоритма и нейронной сети был выбран язык Swift версии 5.5.3. В работе применялись сложные структуры языка, такие как классы – типы данных задающие реализацию некоторой абстрактной сущности, состоящие из методов и свойств; структуры – особые виды значения, создающие переменные для хранения различных данных; перечисления – группы ассоциативных значений, для работы в тип-безопасном режиме. Для реализации нейросети потребовалось 7 структур, 3 класса и 6 перечислений:

- 1) структура для хранения информации о размере данных: размерность, количество элементов, количество слоев элементов;
- 2) структура на основе описанной выше структуры (см. п.1) для хранения и получения информации о размере данных, а также массива с самими данными;
- 3) структура на основе описанной выше структуры (см. п.2), для хранения информации о данных и ожидаемом результате на выходе нейросети. Данная структура необходима для ее обучения;
- 4) структура на основе описанной выше структуры (см. п.3) для хранения массива – набора данных для обучения;
- 5) структура для кодирования обученной нейросети перед ее сохранением в файл для последующего использования. Данная структура содержит перечисления из пунктов 6 и 7, а также функцию для кодирования;
- 6) перечисление, содержащее все возможные типы слоев, используемых в нейросети;
- 7) перечисление, содержащее ключи для кодирования, среди которых: ключ для кодирования типа слоя и ключ для кодирования нейронного состава слоя;
- 8) структура для хранения информации о нейроне: номер слоя предыдущего нейрона; номер слоя следующего нейрона; массив весов, соединяющих данный нейрон с нейронами предыдущего слоя; массив весов, соединяющих данный нейрон с нейронами следующего слоя;
- 9) структура, описывающая сигмоидную функцию, а именно ее номер для классификации среди других функций, функции для прямого и обратного хода;
- 10) класс, описывающий слой нейросети в общих чертах для дальнейшей возможности наследования его свойств дочерними классами, описывающими работу слоев различных типов. Данный класс содержит в себе шаблоны методов для прямого и обратного распространения, настройки весов, а также их обновления, массив нейронов типа, описанного структурой из пункта 8, переменную типа, описанного структурой из пункта 2, а также переменную для хранения функции для вычисления значений в нейроне и перечисление из пункта 15;
- 11) класс, являющийся дочерним к классу из пункта 10 и описывающий свойства и методы слоя типа Dense, содержащего реализацию всех его методов;
- 12) класс, описывающий нейросеть целиком, содержащий в себе массив слоев, переменную типа число с плавающей точкой для установки скорости обучения, переменную типа целое число для хранения количества эпох обучения, переменную типа целое число для хранения количества примеров в каждой эпохе для обучения, метод для сохранения модели в файл, метод для загрузки модели из файла, метод для обучения модели, метод для прямого хода и обратного хода, метод для получения результата для примера на основе текущих весов модели, метод для настройки весов модели, а также перечисление из пункта 13;
- 13) перечисление, содержащее ключи для кодирования, среди которых: ключ для кодирования слоев, ключ для кодирования скорости обучения, ключ для кодирования числа эпох, ключ для кодирования числа примеров в каждой эпохе;
- 14) перечисление, содержащее возможные типы данных для структуры из пункта 1;
- 15) перечисление, содержащее ключи для кодирования, среди которых: ключ для кодирования нейронов, ключ для кодирования функции, используемой в нейронах, ключ для кодирования выходных данных слоя;
- 16) перечисление, содержащее возможные типы функций для многочисленных методов, используемых в классах.

Для реализации описанного ранее алгоритма потребуется реализовать один класс и одно перечисление:

- 1) главный класс приложения, содержащий массив для хранения данных из входного файла, строку для хранения конвертированных в формат записи в ноты данных, а также следующие методы: метод для считывания данных в массив, предназначенный для хранения данных из файла по его имени; метод для разбиения массива на подмассивы и получения данных о содержимом фрагментов через их прогонку через нейросеть с последующим сохранением результатов в массив, используемый ранее для хранения входных данных, с его перезаписью; метод для конвертации полученного массива выходных данных нейронной сети в формат записи в ноты с последующим

сохранением результатов в строку для хранения конвертированных в формат записи в ноты данных; метод сохранения строки для хранения конвертированных в формат записи в ноты данных в файл с соответствующим расширением;

2) перечисление, содержащее возможные типы данных файла для конвертированных результатов

Для отображения начальных данных и итоговых результатов работы программы не предусматривается каких-либо дополнительных функций и элементов интерфейса, т.к. начальные данные представляют собой записанный пользователем файл, содержимое которого в аудио формате изначально известно пользователю, а содержимое в виде, используемом программой для работы, для пользователя абсолютно бесполезно. Текстовое представление входных данных не имеет для пользователя никакой ценности, а их непосредственное открытие и использование подразумевает обращение к сторонним программам, т.к. интеграция подобного функционала в данное приложение означало бы решение еще одной задачи не меньшего масштаба.

Для облегчения восприятия и понимания пользователем процесса конвертации звука в ноты были реализованы следующие элементы интерфейса:

А. Список, содержащий в себе ячейки, соответствующие лейблам с именами, датами создания, а также длительностями файлов, доступными для конвертации;

В. Кнопку для начала процесса конвертации выбранного в списке из пункта А требуемого файла, вызывающую после своего нажатия всплывающую форму из пункта С;

С. Всплывающую форму для выбора места сохранения результата конвертации с кнопками начала и отмены конвертации;

Д. Элемент управления, позволяющий выбрать темп и музыкальный размер композиции для конвертации.

Описанные компоненты реализации приложения по распознаванию и конвертации музыкальных фрагментов позволяют сформировать программное приложение на языке Swift (приложение UIKit) с удобным интерфейсом. Интерфейс и результаты работы приложения показаны на рисунках 1 и 2:

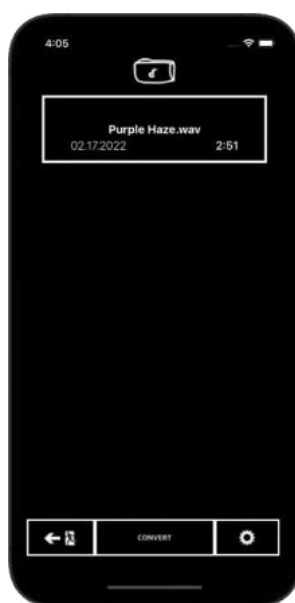


Рис.1 Интерфейс приложения



Рис.2 Результат работы приложения

УДК 621.398

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПОСТУПАЮЩЕЙ С КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. В. Юмаков

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

В 1895 году изобретая радио, А.С. Попов навряд ли мог представить себе, насколько огромным будет его вклад в развитие отрасли обмена информацией. Благодаря радиосвязи люди научились своевременно информировать друг друга о важных событиях, изучение радиоволн позволило дистанционно управлять различными устройствами, а также передавать телеметрическую информацию на огромные расстояния [1].

"Телеметрия" с греческого языка переводится как "далеко измеряю". Термин относят к устройствам и механизмам, которые передают информацию. В настоящее время, чаще всего эта информация передаётся беспроводным путем, хотя встречается и проводная передача данных. В быту телеметрия встречается пользователям в виде Wi-Fi и радио, фермеры следят за состоянием почвы, врачи наблюдают за изменением состояния пациента, ежедневно люди смотрят в мобильные телефоны или телевизор, чтобы узнать какая температура на улице [2]. Всё это проявление нашего взаимодействия с телеметрией.

Телеметрия для космической отрасли незаменимый компонент каждого запускаемого космического аппарата (КА). Лучший способ определить состояние бортовой системы КА — это установить на него датчики и в режиме реального времени отсылать информацию на Землю. На каждом КА установлены сотни датчиков, следящих за его состоянием, устройств, обрабатывающих информацию, формируемую датчиками, и антенн, посылающих пакеты данных на Землю [3]. На Земле располагаются комплексы приёма и обработки этих пакетов. Схема приёма телеметрической информации (ТМИ) КА на наземную станцию (НС) и передачи в центр управления полётами (ЦУП) изображена на рисунке 1.

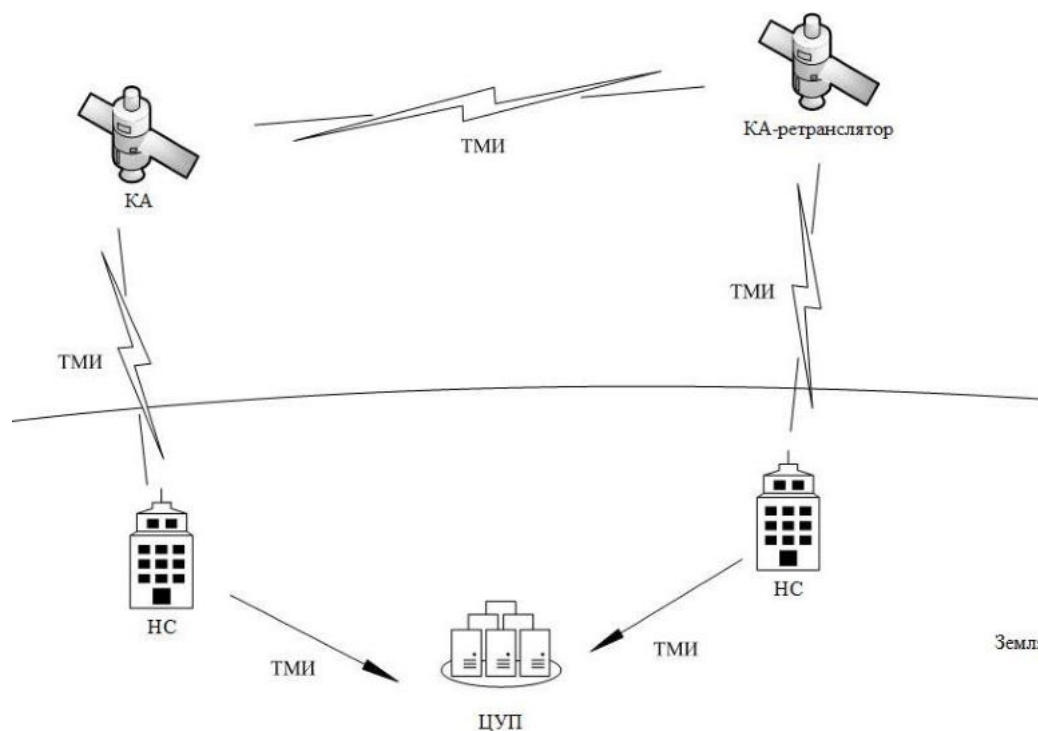


Рис. 1. Схема приёма-передачи ТМИ

Количество принимаемой информации с КА отличается большим объёмом. За короткое время человек не успеет обработать самостоятельно такой объём информации. В таких системах существует критическая необходимость в скорейшем исправлении неисправностей, от простого перегорания предохранителя до выявления предостерегающих состояний бортовой аппаратуры, посредством анализа телеметрической информации [4]. Для того, чтобы эффективно справляться с таким большим объёмом информации, разумнее разработать многофункциональную автоматизированную систему. Такая система позволит сократить время обработки данных и сделать выводы о корректности работы КА и его бортовых систем.

Анализ некоторых программных решений, разработанных в области анализа телеметрической информации, показывает, что во многих из них упор сделан на обработку и анализ информации только за один сеанс связи (принятая с КА информация сохраняется в виде отдельных файлов и запускается в обработку оперативно в темпе приёма или оператором по мере необходимости). Такое решение было целесообразно в определенный исторический период, когда рабочие машины операторов строились на базе электронно-вычислительных машин, не позволяющих обрабатывать большие объёмы информации. И на тот момент обеспечивало решение оперативных задач информационно-телеметрического обеспечения управления КА. Однако, за сутки может проводиться значительное количество таких сеансов, и, при необходимости анализа состояния КА за длительный период, оператор вынужден открывать несколько не связанных между собой окон, а также использовать для работы с полученными данными сторонние, не специализированные программные средства.

У операторов много претензий к технически-устаревшему интерфейсу рассмотренных программных продуктов, а именно:

- результаты обработки данных хранятся только в оперативной памяти персонального компьютера и пропадают при закрытии программы;
- при каждом обращении к сеансу связи происходит обработка данных, так как обработанные данные не сохраняются;
- программное обеспечение не позволяет полноценно оценить изменения телеметрических параметров за период более одного съема информации;
- нет специализированной формы для создания технологических исходных данных, необходимых для обработки поступающей ТМИ.

Также, существенным недостатком является то, что вышеупомянутое программное обеспечение функционирует только в операционной системе MS Windows.

При текущей сложной геополитической обстановке назначен курс на полное импортозамещение в военно-космической отрасли. В связи с этим, происходит переход на программные продукты отечественного производства и свободно-распространяемые средства.

Разрабатываемый программный продукт будет функционировать в среде отечественной операционной системе специального назначения с использованием свободно распространяемой объектно-реляционной системы управления базами данных. Средствами разработки выбраны свободно-распространяемая платформа QT. QT обладает набором инструментов для создания графических пользовательских интерфейсов. Данная среда разработки комплектуется интегрируемой средой разработки QT Creator, в который входит визуальная среда разработки Qt Designer, редактор кода и возможность отладки приложений.

Благодаря использованию современной системой управления базами данных, значительно снизится время доступа к обработанным данным. Это позволит создать инструменты анализа данных на значительных интервалах времени функционирования КА. При проектировании интерфейса программного комплекса был проведен анализ работы операторов с существующими программными средствами и учтены пожелания операторов.

Разрабатываемый программный комплекс включает в себя следующие компоненты:

- комплекс обработки ТМИ;
- комплекс представления результатов обработки ТМИ;
- комплекс формирования технологических исходных данных (ТИД);
- база данных, хранящая обработанные телеметрические параметры.

Процесс работы с ТМИ происходит по следующему сценарию: комплекс обработки ТМИ опрашивает приемный буфер о наличии новых ТМИ. Далее из базы данных извлекаются необходимые ТИД для обработки ТМИ. После чего, результаты обработки записываются в базу данных. Комплекс представления результатов обработки ТМИ позволяет оператору проводить анализ состояния КА в удобной для него форме.

Схема взаимодействия компонентов специального программного обеспечения обработки ТМИ представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Схема взаимодействия компонентов

Разрабатываемый программный комплекс предназначен для контролирования работы КА и его бортовых систем, что обеспечит высокую надежность, быстрдействие и ресурсоемкость.

Библиографический список

1. Курангышев, А. В. Особенности распространения радиоволн на космических линиях связи / А. В. Курангышев, А. В. Дедушкин, А. В. Казначеев. — Молодой ученый. — 2016. — № 3 (107). — С. 133-135.
2. Телеметрия – что это такое? [Электронный ресурс] URL: <https://science-pop.ru/140655> (дата обращения: 28.03.2022).
3. Системы слежения за полётом ракеты [Электронный ресурс] URL: <https://lozga.livejournal.com/101788.html> (дата обращения: 28.03.2022).
4. Некрасов, М. В. Методы унификации современных средств обработки телеметрической информации в центрах управления полётами космических аппаратов / М. В. Некрасов, Пакман Д. Н., Антамошкин А. Н. – Вестник Сибирского Государственного Аэрокосмического Университета им. Академика М.Ф. Решетнева. – 2014. — № 1 (53). — С. 48-53.

УДК 621.3.019.34

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА ЭТАПЕ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ

Э. Е. Хяникяйнен

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

Целью моей работы является упрощение расчета надёжных характеристик сложных систем. Поэтому первостепенной и главной задачей моей работы является разработать программу и алгоритм ее работы для оценки надежности радиоэлектронных систем. Прогнозирующие расчеты надежности производятся на стадии проектирования технических систем для выбора оптимальных технических решений, связанных с необходимостью сохранения основных технических характеристик изделий и их элементов в течение требуемого промежутка времени. Ошибки при проектировании технических систем неизбежны и задача состоит в том, чтобы как можно

больше ошибок устранить на ранних стадиях создания системы. При пропуске ошибок на этапах проектирования, отработки, серийного производства и эксплуатации приходится дорабатывать проект или технику.

Надёжность – это свойство объекта в заранее установленных пределах и времени сохранять значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в данных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Выбор и обоснование показателей надёжности радиоэлектронных систем

Правильный выбор номенклатуры нормируемых показателей надёжности это важнейшая задача на этапе проектирования. Необоснованный выбор показателей надёжности из широкой номенклатуры имеющихся показателей может привести к неправильным решениям при проектировании системы. Необходимыми критериями, которые нужно учитывать при выборе показателей надёжности являются назначение системы, условия и режимы её работы, а также её ремонтпригодность.

Информация о назначении системы даёт возможность определить область и интенсивность применения системы по назначению. Сведения об условиях и режимах работы системы используют для оценки влияния факторов окружающей среды на работоспособность проектируемой системы, а также влияния действующих внешних и внутренних нагрузок на несущую способность элементов системы. Количественные значения этих оценок являются исходными данными для расчёта прочности и устойчивости элементов и узлов металлоконструкций. Если по условиям применения систему предполагается ремонтировать в условиях эксплуатации, то в качестве одного из основных показателей надёжности следует выбирать коэффициент готовности K_g или коэффициент технического использования K_t и т.д.

В случае если отказ системы или отдельных её элементов, приводит к невыполнению важнейшей задачи или нарушает безопасность работы обслуживающего персонала, а также вызывает угрозу для здоровья и жизни людей, находящихся в зоне действия системы то для таких систем основным показателем надёжности будет являться безотказность, выражающаяся в виде вероятности безотказной работы или наработки на отказ.

Если в результате простоя системы после отказа возникают большие материальные затраты, то такая система должна иметь высокие показатели безотказности и хорошую ремонтпригодность.

Если система по условиям эксплуатации подлежит длительному хранению (ожиданию работы) или она должна транспортироваться на специальных транспортных средствах, то такая система должна обладать высокими показателями сохраняемости в соответствующих условиях хранения и транспортирования.

Постановка задачи прогнозного расчёта надёжности технической системы на примере блока согласования каналов

Исходные допущения и предпосылки

Блок согласования каналов (БСКЛ) предназначен для работы на пунктах с усилением и объединения выходов нескольких индивидуальных усилителей каналов технической системы.

Структурная схема расчёта надёжности (ССРН) - это графическое представление условий, при которых объект находится в работоспособном или неработоспособном состоянии. Элементы, из которых состоит ССРН, означают события, которые могут произойти (с точки зрения надёжности) с элементами исследуемого объекта.

Например, элемент электрической схемы - резистор может быть в работоспособном состоянии (событие А) или неработоспособном состоянии (событие В). В неработоспособном состоянии он может перейти в результате обрыва (событие 1) или короткого замыкания (событие 2) резистора. Элементы ССРН могут включаться последовательно или параллельно. Последовательно они соединяются, если каждое событие (например, 1 или 2) ведет к отказу объекта. Параллельно элементы ССРН соединяются в случаи, когда к отказу объекта ведет совместное наступление всех событий, учитываемых при расчёте надёжности.

Составление моделей расчёта прогнозируемой интенсивности отказов

Модели расчёта прогнозируемой интенсивности отказов распространяются на период постоянства интенсивности отказов во время эксплуатации аппаратуры. Коэффициенты моделей условно разделены на две группы:

- первая группа коэффициентов является общей для всех или большинства типов изделий и характеризует режимы и условия их применения, уровень качества производства;
- вторая группа коэффициентов включается в модели конкретных типов ЭРИ и характеризует конструкционные, функциональные и технологические особенности.

К первой группе относятся следующие коэффициенты:

- **K_p** - коэффициент режима, учитывающий величину электрической нагрузки и температуру окружающей среды (или корпуса изделия);
- **$K_{пр}$** - коэффициент приёмки, учитывающий степень жёсткости требований к контролю качества и правила приёмки РЭА;
- **$K_э$** - коэффициент эксплуатации, учитывающий степень жёсткости условий эксплуатации;
- **$K_{ам}$** - коэффициент амортизации, учитывающий наличие амортизации РЭА;
- **$K_р$** - коэффициент роста надёжности, учитывающий предполагаемое снижение интенсивности отказов за счёт проведения мероприятий по повышению надёжности.

Коэффициенты второй группы - это коэффициенты моделей конкретных классов ЭРИ (то есть для полупроводниковых приборов, конденсаторов, резисторов, коммутационных изделий и соединителей).

Выбор метода повышения прогнозируемой надёжности

Общие рекомендации по повышению прогнозируемой надёжности блока согласования каналов сводятся к следующему:

- Для выявления ранних отказов необходимо использовать специальные методы отбраковки и выжигания дефектов. Используемые компоненты схемы должны иметь должное качество и высокую надёжность.
- В наиболее критические точки схемы необходимо вводить ограничители напряжения и тока или иные защитные устройства.

- При выявлении непредвиденных воздействий схему БСКЛ необходимо к ним адаптировать. Реальные условия эксплуатации оборудования на местах могут значительно отличаться от лабораторных. На компоненты могут воздействовать электромагнитные помехи, электростатические разряды, высокая температура, агрессивная химическая среда и вибрация. Рабочие точки компонентов по току и напряжению, температуры переходов и рассеиваемая мощность выбираются оптимально для стойкости к перегрузкам.
- Избыточность системы должна определяться требованиями надёжности и стоимостью оборудования.
- Требуемый уровень надёжности необходимо обеспечивать на уровне проектирования схемы. Дополнительные меры, применяемые во время производства, хранения, тестирования, системной интеграции и эксплуатации, позволят улучшить суммарную надёжность оборудования.
- В схеме блока БСКЛ нужно использовать широкодоступные стандартные компоненты с целью минимизировать количество типов компонентов. Это позволяет значительно сократить затраты на производство и повысить надёжность.
- Необходимо применять методы контроля качества к изделию в целом. Это позволит гарантировать высокую надёжность устройства во время эксплуатации.

Рассмотрим характеристики, которые будут участвовать в программе

Наработка до отказа — это наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа. Срок службы — календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние. Нарботка до отказа - это всегда случайные величины. Параметры их распределений служат показателями безотказности и долговечности. Нарботка до отказа характеризует безотказность как неремонтируемых (невосстанавливаемых), так и ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов.

Долговечность — это свойство объектов сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Предельное состояние объекта характеризуется таким состоянием, при котором дальнейшее его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление исправного или работоспособного состояний невозможно или нецелесообразно. Критерием предельного состояния служит признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленных в нормативно-технической и конструкторской документации. Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности или эффективности.

Безотказность — одно из самых важных свойств надёжности элементов и систем. Безотказность — это свойство объектов сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Обычно безотказность рассматривается применительно к режиму эксплуатации объекта. При оценке безотказности объекта перерывы в его работе (плановые и внеплановые) не учитываются. Безотказность характеризуется техническим состоянием объекта: исправностью, неисправностью, работоспособностью, неработоспособностью, дефектом, повреждением и отказом. Каждое из этих состояний характеризуется совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, и качественных признаков. Номенклатура этих параметров и признаков, а также пределы допустимых их изменений устанавливаются нормативной документацией на объект.

Вероятность безотказной работы (ВБР) объекта – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. ВБР является основной количественной характеристикой безотказности объекта на заданном временном интервале. Если обозначить через T время непрерывной исправной работы объекта от начала работы до первого отказа, а через t — время, за которое необходимо определить ВБР, то ВБР записывается в виде:

$$P(t) = Pr\{T \geq t\}, \quad t \geq 0$$

Назначение программы

Программа оценки надёжности сложных систем предназначена для анализа и оценки надёжных характеристик невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем и устройств методом состояний.

Составление графа состояний

Перед началом работы с программой составьте граф состояний для рассматриваемой системы. Обозначьте на графе интенсивности переходов между состояниями (интенсивности отказов и восстановлений).

Граф состояний технической системы (**граф переходов**) - одна из графических форм математической модели надёжности технической системы, в которой возможные **состояния** системы изображаются в виде точек (вершин **графа**), а возможные направления переходов из одного **состояния** в другое - в виде стрелок, соединяющих вершины (ребер **графа**).

Сравнение программы с аналогами

Таблица 1

	Простота использования	База данных внутри программы	Оценка надёжных характеристик
ASRN 2006	+	+	- (расчет только интенсивности отказов)
Наша программа	+	-	+

Библиографический список

1. Сорокин А. А., Сотникова Н. В., Хромихин Д. А. Оценка показателей надежности электронных устройств и систем. Учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2016. Стр 3
2. Расчет надежности технических систем на стадии проектирования [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00735354_0.html
3. ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» 1. Общие понятия. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://gostexpert.ru/gost/gost-27.002-89>
4. Автоматизированный справочник «Надежность электрорадиоизделий».- РНИИ «Электростандарт», 2009
5. ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ Конспект лекций для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 220400 «Управление в технических системах» Составитель Ефремов А.А. 2015 год (стр13)
6. Жаднов, В.В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем / В.В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. - 2013. - №2. - С. 65-73.

УДК 004.42

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ СКРИНИНГОВ

Ю.А. Соломатова

Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого

В настоящее время учреждения здравоохранения генерируют и накапливают большие объемы данных. Медицинским работникам необходимо компетентно использовать «собранный материал», чтобы повысить качество оказываемой помощи и уровень жизни населения. При решении медицинских задач возникла необходимость использовать большие объемы информации, что определяет потребность в создании медицинских информационных систем и реализации их в лечебных учреждениях [2].

В ходе исследования были изучены и проанализированы аналоги существующих скрининговых информационных систем, которые разработаны в настоящее время, выявлены их положительные и отрицательные стороны. Ниже представлены некоторые из них с официального сайта Федерального института промышленной собственности (<https://www1.fips.ru/>).

1. Система скрининговой диагностики стоматологических заболеваний «Стоматология без стресса».

Программа предназначена для автоматизации сбора и обработки информации в интересах скрининговой диагностики основных стоматологических заболеваний. Область применения программы: интернет-ресурсы стоматологических клиник и центров здоровья. Функциональные возможности программы: сбор показателей состояния показателей стоматологического статуса с помощью компьютерного опросника, расчет риска развития основных стоматологических заболеваний, определяющего частоту стоматологического обследования [3].

Язык программирования: ActionScript

Дата публикации: 20.02.2014.

2. Информационная система мониторинга и управления процессом многопрофильного скрининга «ВИТАСКРИН»(ИС «ВИТАСКРИН»).

Программа предназначена для автоматизации документооборота медицинской организации, проводящей скрининговые обследования пациентов. Программа обладает модульной архитектурой и реализована с использованием веб-технологий. В программе реализованы следующие модули: электронная медицинская карта пациента, блок финансовой и административной информации, система поддержки принятия медицинских решений, а также сервис «Личный кабинет пациента». Программа обладает широким спектром функциональных и технологических возможностей, позволяет создавать и настраивать алгоритмы проведения скрининговых обследований пациентов, настраивать протоколы приема врачей и проведения диагностических манипуляций, а также имеет возможность интеграции с медицинским оборудованием. Программа позволяет организовать проведение скрининга на базе нескольких медицинских организаций, повышает качество проведения исследований и уровень обслуживания пациентов [3].

Язык программирования: JAVA

Дата публикации: 19.02.2019.

3. Скрининг заболеваний органов дыхания.

Программа предназначена для определения группы риска развития заболеваний бронхо-легочной системы. В алгоритм расчета заложены тестовые вопросы, определяющие антропометрические и физиологические особенности пациента. В зависимости от выявленной группы риска выдаются рекомендации. Программа предназначена для использования всеми социальными группами населения РФ, а также специалистами-медиками: педиатрами, терапевтами, врачами общей практики, студентами медицинских вузов [3].

Язык программирования: PHP, JavaScript, HTML

Дата публикации: 30.08.2018.

Ниже в Таблице 1 приведен анализ функциональности имеющихся аналогов.

Таблица 1 – Аналоги ИС

	Стоматология без стресса	Витаскрин	Скрининг заболеваний органов дыхания
Разграничение прав доступа	+	+	-
Регистрация пациентов	-	+	-
Электронная медицинская карта пациентов	-	+	-
Добавление и удаление новых сотрудников	+	+	-
Выявление факторов риска пациентов	-	-	+

На основании обзора имеющихся аналогов и проведенного анализа можно сделать вывод, что при разработке информационной системы для анализа результатов скринингов необходимо учитывать разграничение прав доступа, регистрацию пациентов, наличие электронных медицинских карт пациентов, возможность добавления и удаления новых сотрудников в систему, анализ медицинских обследований и представлять их графически.

Рассмотрим подробнее разработку информационной системы для анализа результатов скринингов. Начнем с определения скрининга. По определению экспертов ВОЗ, **скрининг** - целенаправленное выявление болезни до проявления клинических симптомов посредством тестов, осмотров или других быстро выполняемых процедур [2]. Скрининг – сложная и дорогостоящая задача, успешное решение которой зависит от достаточного количества участвующих в программе, способных выполнить скрининговые тесты, а также от их способности подвергнуться последующей диагностике, лечению и наблюдению.

Первым этапом разработки информационной системы является выбор средств программной реализации. В качестве основного языка использовался язык PHP, для визуализации данных – HTML и CSS. СУБД была выбрана - MySQL.

Вторым этапом является построение функциональной модели в нотации IDEF0. Для разрабатываемой информационной системы она представлена ниже (см.рис.1).

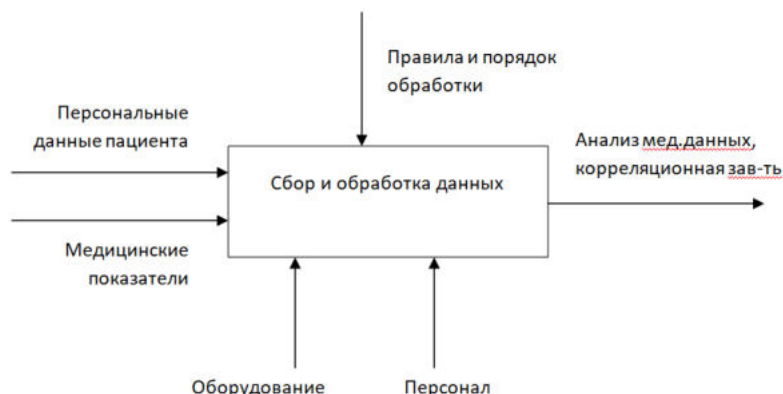


Рис. 1 Функциональная модель информационной системы в нотации IDEF0

Следующим шагом в разработке информационной системы для анализа результатов скринингов является создание базы данных. Она является реляционной и состоит из 5 таблиц: персональные данные пациентов, медицинские данные пациентов, медицинские обследования пациентов, рекомендации и авторизация пользователей.

Важным шагом является определение функций разрабатываемой информационной системы. Пользователи имеют доступ к персональным данным пациентов, их результатов анализов и обследований, консультациям врачей, комментариям по лечению, представленной аналитике и графикам зависимостей. Они могут осуществлять поиск по системе, добавлять новых пациентов и их результаты анализов, назначать новые медицинские обследования, просматривать и обрабатывать собранную информацию, проводить анализ медицинских данных. За соблюдением порядка в системе отвечает системный администратор и главный врач.

Основные функции, реализуемые в приложении:

1. Аутентификация и авторизация пользователя.
2. Добавление, изменение, удаление и хранение данных.
3. Поиск данных пациента.
4. Расчет зависимостей между определенными данными пациентов.
5. Экспорт данных в Excel.
6. Получение анализа требуемых показателей.

Исходя из этих функций можно представить алгоритм функционирования информационной системы (см. рис.2).

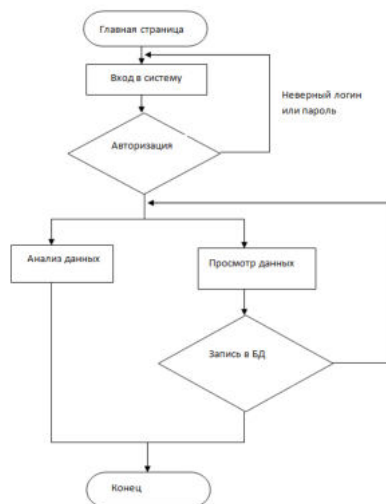


Рис.2 Схема данных информационной системы

Главная страница информационной системы для анализа результатов скринингов представляет собой меню, где пользователи могут выбрать одну из трёх предложенных вкладок (см. рис.3).

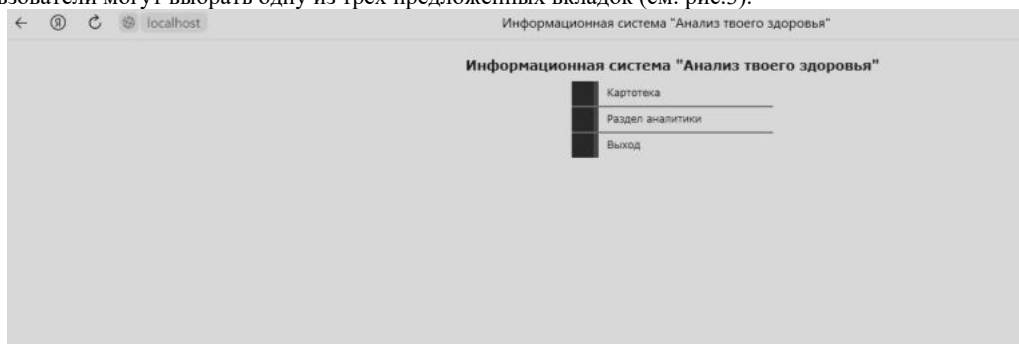


Рис. 3 Вкладка меню

При выборе вкладки «картотека» перед пользователем откроется таблица, где представлены все пациенты, у которых заведена электронная медицинская карта (см. рис.4).

Информационная система "Анализ твоего здоровья"							
Пациенты							
Фамилия	Имя	Отчество	Дата рождения	Пол	Медицинская организация	Адрес проживания	Номер страхового полиса
Абдикова	Ангелина	Викторовна	01.11.1990	женский	городская больница №1	г.Тула, ул.Ленина д.18	71060000125489
Борисов	Андрей	Александрович	05.04.1987	мужской	городская больница №1	г.Тула, ул.Каули д.18/1	71546289713254
Винон	Маргарита	Григорьевна	12.01.1975	женский	городская больница №3	г.Тула, ул.К.Маркса д.1	71325413012521
Иванов	Иван	Иванович	31.03.1959	мужской	городская больница №1	г.Тула, ул.Оборонная д.1	71005632856256
Осипов	Олег	Сергеевич	06.07.1980	мужской	городская больница №1	г.Тула, ул.Октябрьская д.123	71302128745555
Тестов	Анатолий	Евгеньевич	20.09.1990	мужской	городская больница №11	г.Тула, ул.Оборонная д.101а	71000023154896
Яшина	Антонина	Матвеевна	02.05.2017	женский	городская больница №3	г.Тула, ул.Локвава д.12	71325641287900

Рис. 4 Таблица пациентов

В таблице можно выбрать любую запись и двойным нажатием по нужной строке с данными откроется индивидуальная электронная карта пациента. В ней указаны персональные данные каждого пациента, социальный анамнез, витальные параметры, патологические реакции, результаты инструментальных и лабораторных исследований, консультации врачей специалистов, вакцинация и иммунизация, рекомендации.

Рис. 5 Пример карты пациента

ПАТОЛОГИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ					
Дата выявления	Тип агента	Действующее вещество	Тип реакции	Комментарий	
03.10.2020	лекарство	Антибиотики	Крапивница (Лекарственная аллергия)		

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И КОНСУЛЬТАЦИИ					
Результаты инструментальных исследований					
Дата	Исследование	Выявлен пристеночный дефект, изменена сосудистая сеть новообразованной	Результаты	Комментарий	
01.10.2020	Компьютерная томография ЖКТ				
01.10.2020	Гастроэзофаги	выявлено состояние сосудов, качество складки и слизистых оболочек, обнаружено новообразование			

Результаты лабораторных исследований					
Показатель	Значение	Единицы измерения	Референтный диапазон	Дата	
Анализ крови на анализаторе					
Гемоглобин	166	г/л	120 - 150	01.10.2020 11:11	
Эритроциты	4	12/л	3,9-5,3	01.10.2020 11:11	
Цветовой показатель	80	фл	81-101	01.10.2020 11:11	
Лейкоциты	55	%	47-72	01.10.2020 11:11	
Заключение: картина крови не выявлена.					

Консультация врачей специалистов					
Дата	Исследование	Предварительный диагноз: опухолевый процесс	Результаты	Исполнитель	
01.10.2020 16:14	врач гастроэнтеролог			врач гастроэнтеролог Рубина И.В.	

ВАКЦИНАЦИЯ И ИМУНИЗАЦИЯ			
Дата	Препарат	Комментарий	
20.05.2017	Вакцина коллоидно-дифтерийно-столбнячная адсорбированная жидкая с уменьшенным содержанием антигенов (АКДС-И-вакцина)		

Рис. 6 Пример карты пациента

При выборе в меню вкладки «Раздел аналитики» откроется страница, где можно выбрать необходимые данные и на их основании построить круговые диаграммы для анализа результатов скринингов пациентов. Ниже представлен пример диаграммы, которая показывает процентное соотношение частоты сердечных сокращений пациентов (см. рис 7).

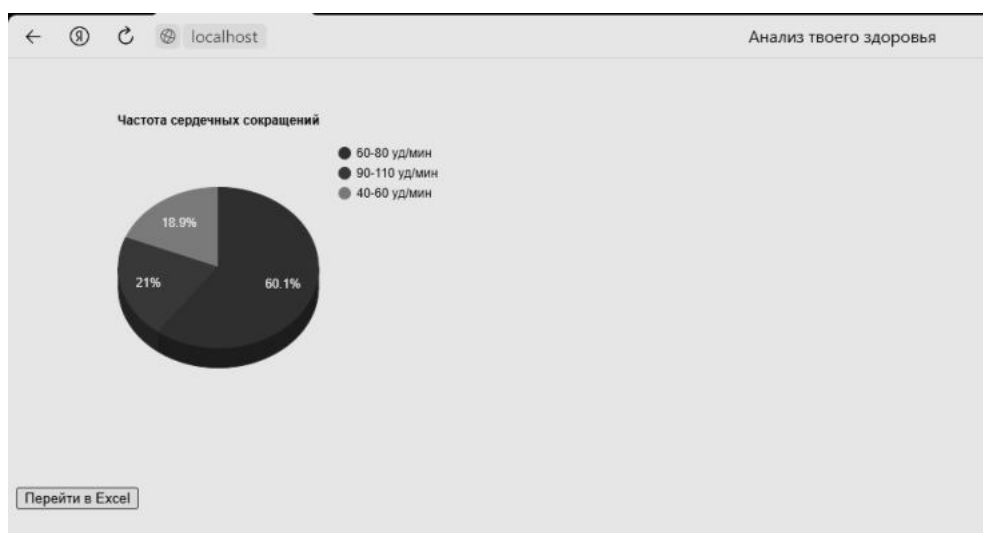


Рис. 7 Круговая диаграмма «Частота сердечных сокращений»

Под каждой диаграммой есть кнопка «Перейти в Excel», при нажатии на которую пользователь попадет в программу Excel. Там будут представлены экспортированные данные, на основании которых строится диаграмма. При необходимости в Excel можно также проводить анализ результатов скринингов пациентов.

Если пользователь в меню выбрал вкладку «Выход», то при нажатии на нее осуществиться выход из информационной системы.

Разработанная информационная система для анализа результатов скринингов позволяет собирать, обрабатывать и анализировать медицинские данные пациентов, результатов проведенных обследований с целью статистического учета для медицинского учреждения.

Библиографический список

1. Атьков О.Ю., Кудряшов Ю. Ю., Прохоров А. А., Касимов О. В. Система поддержки принятия врачебных решений. // Врач и информационные технологии, № 6 2013 г., стр. 67–75.
2. Статья о медицинском скрининге. [Электронный ресурс] // medcentr-sochi.ru: [сайт]. URL: <https://medcentr-sochi.ru/article/statya-o-medicinskom-skrininge.html>.
3. ФИПС. [Электронный ресурс] // www1.fips.ru/: [сайт]. URL: <https://www1.fips.ru/>.

УДК 004.414.22

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ АНТРОПОЛОГОВ

Е.П. Матвеева

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

В рамках своей работы антропология занимается обработкой и документированием антропологических материалов, то есть скелетов людей, обычно найденных на археологических раскопках. Далее, при разговоре об антропологии, будет подразумеваться ее раздел – физическая антропология, которая характеризуется изучением происхождения и эволюции физической организации человека и его рас [1]. В качестве антропологических материалов обычно выступают погребения людей, где могут находиться части скелета, целый или даже несколько скелетов. Все костяки анализируются учеными, которые просматривают каждую кость и делают выводы о погребенном человеке: его поле, возрасте, болезнях и перенесенных травмах и прочем. Ученые делают выводы на основе размера костей, их сохранности, отметок на них и других визуальных характеристик. Метод измерения костей и перевод материала в числовой формат называется методом антропометрии, а данные полученные с его помощью – антропометрическими характеристиками. Также, если скелеты были найдены в специфических условиях, можно производить их химический анализ, однако, этим занимается отдельная группа ученых. Помимо определения характеристик конкретного человека, анализ костей скелетов позволяет делать выводы о всей группе людей прошлого, относящейся к захоронению, например, о том, как они жили, каким болезням были подвержены, на кого были похожи и в целом, какая у них была культура [2].

В результате анализа материалов антрополог пишет отчет, составляя так называемые описания, которые уже хранятся в каталогах экспедиции, в бумажном или электронном виде. Описания составляются на каждый скелет, найденный в погребении, а впоследствии объединяются в описание всего погребения и дополняют отчеты археологов. Таким образом, описания – это текстовые документы, иногда в бумажном, иногда в цифровом формате, в которых содержится вся информация, полученная антропологом из скелета. Описания имеют одинаковую структуру и различаются, в основном, содержанием и отдельными фрагментами.

Работать антропологи могут в двух видах условий: полевых и комнатных. При работе в полевых условиях антропологи рассматривают и описывают кости сразу в процессе их нахождения или в короткий промежуток времени с него, записывая всю информацию либо на бумажные, либо на цифровые носители, стараясь за весь промежуток работы экспедиции в поле описать максимально возможное количество костей. Помимо работы в полевых условиях, антропологи могут работать в музеях и лабораториях, что относится ко второму виду условий. Помимо работы с самим материалом, физические антропологи занимаются его анализом и построением демографических закономерностей. Демографические закономерности – количественные характеристики

численности населения, рассматриваемые в контексте демографической истории, с учётом взаимодействия демографических процессов с социально-политическими, экономическими, психологическими и иными факторами. Например, закономерности рождаемости, старения, смертности, миграций и другие [3].

Однако, работа антропологов сопряжена с определенными трудностями. Обработка скелетов в любом случае должна происходить с максимально возможной скоростью, чтобы избежать разрушение и ухудшение качества материала. Также, в процессе рутинного написания множества похожих отчетов, ученым необходимо иметь повышенную концентрацию и внимательность для избегания ошибок. При работе в полевых условиях также возможно наличие непредвиденных обстоятельств в виде стихийных бедствий, способных сильно затруднить, а то и вовсе остановить работу ученых. Кроме того, большинство научных сотрудников, по данным отдела антропологии Кунсткамеры Санкт-Петербурга, старше 50 лет, что может осложнять работу с большим количеством электронной документации. Таким образом, при работе в любых условиях все антропологи сталкиваются с проблемами скорости и точности создания документов. Для создания самих документов возможно использование шаблонов, но распределение их по каталогам, формирование реестра всех отчетов и реализация аналитики по результатам материалов происходит вручную научными сотрудниками, что также повышает шансы на совершение ошибки и увеличивает время обработки. Помимо написания отчетов с описаниями, ученые также анализируют все полученные данные для построения демографических зависимостей и графиков, отражающих жизнедеятельность людей прошлого. При работе над этим используются табличные редакторы, потому что работа над большими массивами данных вручную занимает больше сил и времени.

У антропологов нет специализированного программного обеспечения, поэтому обычно они создают описание, содержащее наблюдения и выводы антрополога, в текстовом редакторе, либо с помощью средств генерирования отчетных документов на основе массива данных. Для обработки полученных данных, например, для вычисления демографических характеристик и составления графиков, используются табличные процессоры, что упрощает создание графиков, работу с формулами и поиск зависимостей, но необходимость ручного ввода снижает скорость внесения и обработки.

Вследствие всех вышеперечисленных проблем заметно, что набор текста в текстовом редакторе на компьютере имеет минусы, влияющие на результат работы антрополога. Для исправления этих проблем необходимо создать программное обеспечение, с помощью которого будет возможна автоматическая генерация отчетов по результатам находок и сведение данных в систему, позволяющую строить демографические зависимости. Генерация отчетов должна быть реализована наиболее быстрым и понятным образом для ускорения процесса работы пользователей. Ученый вводит всю полученную им информацию: наличие костей, их замеры, если требуется, особые характеристики или отметки, например, цвет, состояние, присутствие наростов, показывающих бывшее воспаление или сросшуюся кость. По результатам полученных данных система сгенерирует отчет, который пользователь сможет использовать в удобном ему виде: .txt, .doc или .pdf. В силу специфики работы, некоторые ученые не будут иметь возможности использовать версию для работы за компьютером. Такая ситуация возможна в суровых полевых условиях, где не всегда присутствует электроэнергия, возможность проведения работы за компьютером в силу природных обстоятельств или отсутствия должного оснащения. Для решения этой проблемы было решено создать версии приложения для десктопа и для смартфона, что позволит обрабатывать данные в любых ситуациях.

Поскольку антропологи работают с большими массивами данных, при создании приложения необходимо реализовать средство их хранения. В данном случае рассматривается работа физических антропологов на примере археологических экспедиций, где данные имеют четкую структуру: в проекте есть раскопы, в раскопах – погребения, в погребениях – один или несколько скелетов, а каждый скелет имеет кости, по каждой из которых происходит определение общих характеристик скелета. Для реализации подобной вложенной структуры хранения было решено использовать базу данных в силу простоты работы с ней, наличия обширной документации и инструментов, позволяющих систематизировать информацию. Помимо хранения данных, необходимо реализовать их внесение, обработку и вывод для работы пользователя, что реализуется с помощью пользовательского приложения. В качестве пользователей в данном случае рассматриваются антропологи и другие ученые, которые взаимодействуют с их отчетами и результатами работы.

Внесение данных таким образом, чтобы пользователь смог это сделать наиболее быстрым, простым способом, который позволит концентрироваться на вводе, является одной из задач, для решения которой используется опросная система. Ученый сможет отмечать имеющиеся антропологические материалы с помощью системы флажков, а вводить информацию об их свойствах вручную. Система в виде опроса позволит отмечать наличие материала наиболее быстрым способом, а при наличии большого количества материала заметить возможные ошибки в вводе. Дополнительную информацию о костях, которая известна только самому антропологу, удобно вносить вручную в силу непредсказуемости ее характера и наличия.

По результатам ввода происходит генерация отчета в систему, что позволит сразу каталогизировать не только сами данные, но и документацию, которая к ним относится, и использовать ее в других целях, например, для объединения отчетов археологов и антропологов или использовать в научных публикациях, в готовом виде. Приложение имеет внутреннюю систему хранения не только данных, но и отчетов, в систематизированном виде, что позволит работать с ним людям из смежных наук. Впоследствии возможно расширение приложения обработки и хранения не только антропологических материалов, но и археологических объектов древности.

Благодаря реализации такой системы возможна оцифровка многочисленных антропологических материалов, сведение их в единую систему и упрощение работы с ними. Оцифровка данных позволит более гибко обрабатывать их и получать более разнообразную информацию после их формализации. Однако, сама обработка данных реализуется только при наличии какой-либо выборки что в демографических, что в антропологических исследованиях. Без оцифровки такая обработка материала, включающая в себя построение зависимостей и их оценку, является трудоемким процессом. Основными задачами антропологов в такой обработке являются задачи классификации объектов по различным признакам или их набору. Полученные данные уже используются для выделения общих черт и взаимосвязей между классами объектов или их характеристиками, что позволяет строить дальнейшие выводы о популяциях, родах или более обширных группах населения. Подобные исследования реализуются в любой науке, оперирующей статистическими наборами данных.

Поскольку базовой задачей антропологов является именно задача классификации объектов по набору признаков, необходимо решить сначала ее. Решение невозможно без использования статистических методов. Основными используемыми показателями являются среднее значение, дисперсия, стандартное отклонение и коэффициент изменчивости. Среднеквадратическое, или стандартное, отклонение считается по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

, где x_i – это каждый элемент выборки, \bar{x} – это среднее арифметическое значение выборки, n – объем выборки.

Из него можно получить дисперсию выборки, а само отклонение позволяет определить, насколько конкретная выборка отличается по типичной, что позволяет выделять группы, имеющие одинаковые отклонения у определенных признаков. Чем больше отклонение, тем больше величина внутригрупповой изменчивости, и наоборот. Коэффициент изменчивости, или коэффициент вариации, сглаживающий вклад размера серии, предназначен для облегчения сравнения между критериями, в которых метрические значения средних очень разнятся [4]. Он рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100\%$$

, где σ – среднеквадратическое отклонение, \bar{x} – среднее арифметическое значение выборки.

Все они позволяют оценить меру внутригрупповой изменчивости конкретного признака. Кроме того, благодаря им возможно рассчитать и достоверность – меру статистической реальности сходства или различия объектов относительно других объектов. Из этого следует, что все выводы, получаемые в ходе исследований, имеют ту или иную степень надежности.

Однако, классификация объектов корректным образом возможна только при учете дополнительных особенностей. При наличии признаков, влияющих друг на друга, это вероятность этого влияния и его объем необходимо учитывать. В немалой степени именно на понимании вероятностного характера антропологических явлений основан подход к корреляции признаков. Суть его заключается в поиске взаимосвязей между признаками таких, что при изменении величины или качества одного из них произойдет изменение большинства остальных [5]. Выборочный коэффициент корреляции Пирсона, который используется антропологами, рассчитывается по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma_x \sigma_y}$$

, где \overline{xy} – среднее значение произведения признаков, \bar{x} и \bar{y} – средние значения признаков, σ_x и σ_y – стандартные отклонения признаков. Коэффициент корреляции может изменяться в пределах от -1 до 1, и чем ближе полученный коэффициент по модулю к единице, тем выше линейная зависимость между признаками. Однако, в случае отсутствия линейной зависимости, могут присутствовать и другие. Как раз скоррелированность самых разнообразных свойств организма позволяет палеонтологам и антропологам реконструировать - достраивать целое, имея в руках лишь отдельные части. Так, имея в своем распоряжении одну только кость ноги или руки (например, бедренную или локтевую), антрополог может рассчитать длину тела человека или другие его параметры [4]. Подобные расчеты возможны только при наличии большого объема данных о множестве различных групп людей. При этом использование этих данных возможно только при их оцифровке, которую реализует разрабатываемое приложение. Впоследствии возможно добавление подобных исследований в приложение для исключения ошибок ручных расчетов и получения зависимостей, которые могли не заметить или не учесть ученые.

После получения информации о большинстве жителей прошлого изучаемой области возможно выявление факторов, влияющих на их жизнь. Также при наличии большого объема данных возможно построение закономерностей на уровне регионов, а впоследствии и континентов, что позволит строить более серьезные зависимости. С использованием данных по проживанию людей в определенном месте в определенных регионах возможно построение зависимостей их передвижений в течение времени. При построении движения сообществ в рамках определенной территории, определения направления и учета перспективности переселения возможно предсказание передвижения групп древних людей в течение всего времени их существования. Таким образом, при использовании большого массива данных о сообществах различных временных отрезков, возможно построение цельной картины переселения народов с детализацией по результатам археологических раскопок. При определении мест переселения древних людей, возможно упрощение работы археологов и историков в поисках объектов культурного наследия. Для определения наиболее вероятных для проживания мест желателен также учет других особенностей: близости к населенным пунктам, наличие плодородной почвы и источников воды и прочих, важных для продолжительного поселения, факторов. Помимо определения ареалов жизнедеятельности людей древности, возможна расовая сегрегация, выявление родственных особенностей у жителей различных областей и другие исследования, которые помогут изучать нашу историю.

Благодаря оцифровке данных и решению задач классификации возможно проведение и упрощение исследований не только в области антропологии, но и в любой другой науке, оперирующей большими объемами данных.

Научный руководитель – ст. преподаватель кафедры О7 Васюков В.М.

Библиографический список

1. Гостева Л.З. Антропология. Учебное пособие. – Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2011. – 96 с.
2. Веселкова Д.В., Добровольская М.В., Клещенко Е.А. и др. Методика работы с палеоантропологическими материалами в полевых условиях. – М.: ИА РАН, 2020. – 112 с.
3. Киселева Н.И. Демография: в схемах и таблицах. Учебное пособие / Н.И. Киселева. – М.: Финансовый университет, 2017. – 141 с.
4. Кун К. С. Расы Европы. – М: Астрель, 2011. – 97 с.
5. Алексеева Т.И. (ред.), Богатенков Д.В., Дробышевский С.В. Антропология: Учебно-методический комплекс [Электронный учебник]. – ИДО РУДН, 2004.

РАЗРАБОТКА МАКЕТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ФРАГМЕНТА КРУПНОГАБАРИТНОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ АНТЕННЫ

Захаров С.А., Масыгина Д.А., Кошелев П.Е., Коноплев Ю.В.

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

Современное развитие космической отрасли демонстрирует тенденции как поиска новых, так и совершенствования существующих решений в области обеспечения высокоскоростной спутниковой связи. Одним из относительно новых и в настоящее время совершенствуемых подобного рода решений является применение крупногабаритных трансформируемых антенных конструкций с подстраиваемой геометрией отражающей поверхности [1], под которой чаще всего подразумевается специальный радиоотражающий материал сетчатой структуры – сетеполотно.

Так как при формировании геометрии сетеполотна возможны погрешности и ошибки, способные значительно ухудшить качество спутниковой прием-передачи, с целью их устранения, прорабатываются различные варианты систем с использованием электромеханических исполнительных устройств, оказывающих воздействия на подтягивающие ванты, которые, в свою очередь, выстраивают корректную форму сетеполотна. Однако, каждое электромеханическое исполнительное устройство требует энерго-информационных управляющих воздействий. Одним из способов организации энерго-информационного обмена является традиционный метод, реализованный за счет применения проводных соединений. Существенными недостатками этого метода являются нецелесообразное и дорогое увеличение массогабаритных (в основном массовых) характеристик системы, а также уменьшение надежности системы, объясняемое риском потенциально возможного спутывания проводников при развертке каркаса и подстройке формы рефлектора. При этом становится очевидным тот факт, что, по мере увеличения апертуры антенного комплекса, названные недостатки проявляются все более явно. Альтернативный подход при организации энерго-информационного обмена предполагает передачу энергии и информации беспроводным способом, а именно посредством применения направленного лазерного излучения по открытому оптическому каналу [2].

В предлагаемой ко вниманию статье описывается разработка макета системы управления формой фрагмента крупногабаритной трансформируемой антенны ферменного типа с использованием электромеханических исполнительных устройств и систем беспроводной передачи информации по оптическому каналу.

Рефлекторы ферменного типа (рисунок 1) состоят из фронтальной (радиоотражающей, управляемой формы) и тыловой сетей симметричного плетения, выполненного в виде смежных треугольных секторов, раскрывающегося силового каркаса с телескопическими выдвижными штангами, расположенного между сетями, и системы формообразующих подтягивающих вант [3].

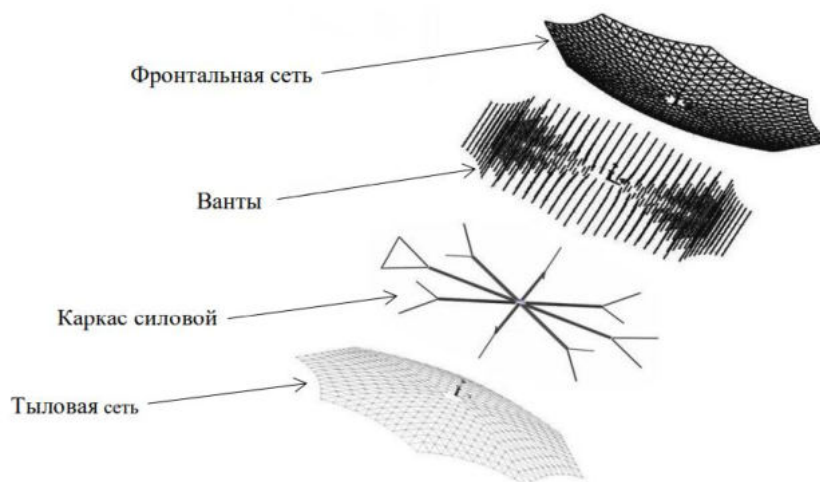


Рисунок 1 – Структура крупногабаритного рефлектора ферменного типа

Макет фрагмента крупногабаритной антенны (рисунок 2) состоит из близкого по форме с правильной треугольной призмой каркаса, выполненного на основе металлических труб и креплений, фронтального (имитирующего отражающую поверхность) сетчатого плетения и подтягивающих формообразующих вантовых стяжек.

Обобщенная структурная схема макета системы управления формой фрагмента крупногабаритной антенны представлена на рисунке 3.

Принцип действия макета системы управления формой фрагмента крупногабаритной антенны основан на приеме информации с камеры и на передаче данных с ЭВМ на центральную плату управления через систему наведения/фокусировки лазерного излучения (состоящей из модулятора и двух поворотных платформ, обеспечивающих возможность кругового поворота, объединенных в двухкоординатную систему) и устройства точечной регулировки. Посредством модуляции лазерного излучения зашифрованная в двоичном коде информация передается на устройства точечной регулировки формы [4].

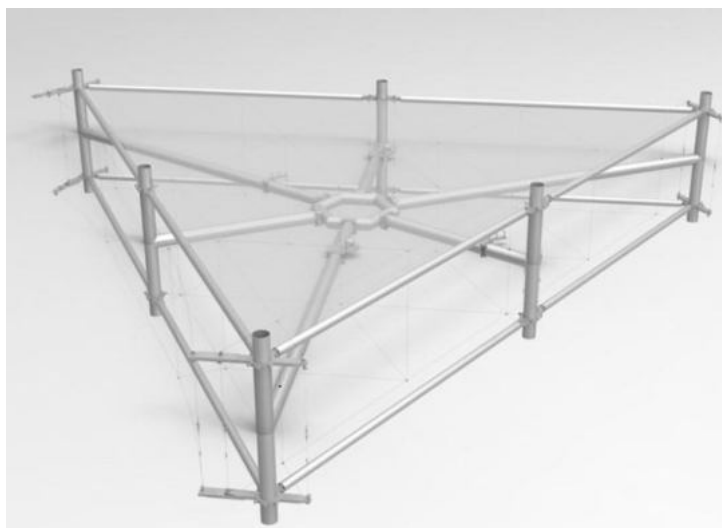


Рисунок 2 – Трехмерная модель фрагмента крупногабаритной антенны ферменного типа

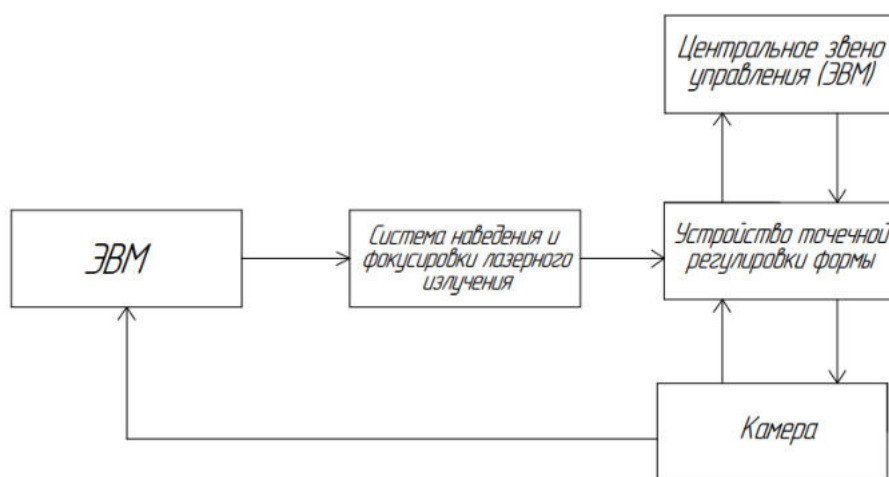


Рисунок 3 - Общая структурная схема макета системы управления формой фрагмента крупногабаритной антенны

Устройство точечной регулировки формы представляет собой систему из электромеханического исполнительного устройства, светодиода и группы фотодиодов. На выводах фотодиодов, засвеченных модулированным лазерным пучком, формируется напряжение, соответствующее логической единице. Соответственно, при отсутствии засветки принимается логический ноль. С целью недопущения некорректного засвечивания фотодиодов и ненадежной передачи информации, в начале зашифрованного двоичного сообщения содержится кодовая последовательность. Переданный байт данных соответствует необходимой длине стягивания вант. Таким образом от лазерного излучателя через фотодиоды передается информация на центральное звено управления (от фотодиодов к звену проводным способом).

Центральное звено управления выполнено в виде печатного узла с микроконтроллером и драйверами для управления исполнительными устройствами. Трехмерная модель печатного узла представлена на рисунке 4.

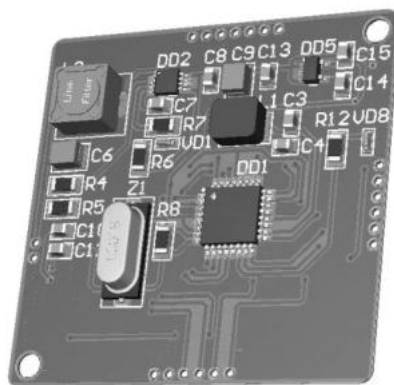


Рисунок 4 – Трехмерная модель печатного узла

Микроконтроллер обрабатывает полученную двоичную информацию и передает электромеханическим исполнительным устройствам команды, соответствующие необходимой величине подтягивания вант [5].

Светодиод, установленный на устройстве точечной регулировки, выступает в качестве индикатора корректного наведения лазерного луча. Визуальное состояние светодиодов отслеживается сверточной нейронной сетью с помощью камеры, происходит прием ответных сигналов от устройства точечной регулировки формы, с последующей передачей информации на ЭВМ.

Библиографические ссылки

1. Крупногабаритная прецизионная трансформируемая антенна на основе твердотельных отражательных панелей Литовка Д.А., Тайгин В.Б. Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2016. Т. 17. № 2. С. 408-417.
2. РАЗРАБОТКА БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ Кочин Л.Б., Матвеев С.А., Тишков А.И., Ширшов А.Д., Яковенко Н.Г. В сборнике: Решетневские чтения. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Под редакцией Ю.Ю. Логинова. 2019. С. 117-118.
3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДРАЗУМЕВАЮЩЕЙ ПРЕИМУЩЕСТВЕННО БЕСПРОВОДНОЙ ЭНЕРГО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОБМЕН, С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРИВОДОВ Яковенко Н.Г., Рудыка С.А., Ширшов А.Д., Коноплев Ю.В., Юев А.А. ВОЕНМЕХ. Вестник Балтийского государственного технического университета. 2020. № 2. С. 16.
4. СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ ПО ОТКРЫТОМУ ОПТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ Кошелев П.Е., Ширшов А.Д., Толмачев А.С., Евстигнеева Е.И., Коноплев Ю.В. В сборнике: Решетневские чтения. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Под редакцией Ю.Ю. Логинова. 2019. С. 119-120.
5. РАЗРАБОТКА БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ Юев А.А., Ширшов А.Д., Евстигнеева Е.И., Кошелев П.Е., Коноплев Ю.В. В сборнике: Решетневские чтения. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Под редакцией Ю.Ю. Логинова. 2019. С. 157-159.

УДК 004.67+004.627

РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ ЭКСПЕРИМЕНТОМ «ПЫЛЬ-УФ»

А.В. Витов, Т.М. Сухов

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

Введение. Работа с видеоданными, а конкретно их получение обработка и передача, является очень важной, а во многих случаях неотъемлемой, задачей в сфере проведения космических экспериментов. При проведении большинства космических экспериментов необходимо вести видеозапись для дальнейшего изучения. Данный вопрос включает в себя как аппаратную составляющую (камеры, датчики и пр.), так и программную (методы захвата и обработки, протоколы управления и получения потоков видеoinформации, а также подходы для ретрансляции и сохранения видеoinформации).

Постановка задачи. Требуется разработать модули обработки потоков видеoinформации для управляющего программного обеспечения аппаратуры изучения поведения пылевой плазмы в условиях микрогравитации.

1. Проект «Пыль-УФ»

Суть космического эксперимента «Пыль-УФ» (КЭ «Пыль-УФ») заключается в изучении поведения облака мелкодисперсных частиц в условиях микрогравитации [1]. Для проведения эксперимента необходимо разработать и создать соответствующую аппаратуру. КЭ «Пыль-УФ» можно разделить на две составляющие: аппаратную и программную.

Аппаратная составляющая

С точки зрения аппаратной части КЭ «Пыль-УФ» состоит из двух частей: «Пыль-УФ ТГК» и «Пыль-УФ МКС». Как можно понять из названия «Пыль-УФ ТГК» – аппаратный блок, который будет расположен на транспортном грузовом корабле (ТГК) «Прогресс», тогда как «Пыль-УФ МКС» будет находиться на Международной Космической Станции (МКС). Упрощённая схема взаимодействия программного обеспечения в КЭ «Пыль-УФ» представлена на рисунке 1.

В состав «Пыль-УФ-МКС» входят модули взаимодействия с антенно-фидерным устройством (АФУ-МКС), Модуль внешний, Модуль внутренний, Консоль оператора (КО).

В состав «Пыль-УФ-ТГК» входит три идентичных модуля управления РСМ-3365EW-S9A1E (РСМ3365), к которым подключаются периферийные платы через интерфейс RS-485. Между собой и с внешним каналом связи РСМ3365 взаимодействуют по интерфейсу проводной сети (Ethernet) через коммутатор MOXA EDS-G308-T (рисунок 2).

Программная составляющая

Программное обеспечение «Пыль-УФ-ТГК» реализовано в виде модулей, каждый из которых запускается в виде отдельного процесса. Модули обмениваются информацией с использованием протокола транспорта телеметрии очереди сообщений (Message Queuing Telemetry Transport, сокр. MQTT), через сервер, называемый брокером. На каждом из трёх компьютеров (РСМ3365-1, РСМ3365-2, РСМ3365-3) запущен брокер. Каждый брокер дублирует работу двух других брокеров.

Структура модулей «Пыль-УФ-ТГК» для каждого из РСМ3365-Х приведена на рисунке 3.

Назначение модулей следующее.

Управляющий модуль (ControlMain) – модуль, реализующий циклограмму работы изделия.

Модуль взаимодействия с камерой (Camera) – модуль, осуществляющий управление камерой и получение потока данных с неё.

Модуль получения статусов АФУ-ТГК (ModuleAFU_TGK) – модуль, с помощью которого производится контроль состояния физического канала связи и получение температуры аппаратного модуля АФУ-ТГК.

Модуль управления цифровыми контактами (ControlGPIO) – модуль, осуществляющий управление портами цифровых вводов-выводов (GPIO) через MQTT.

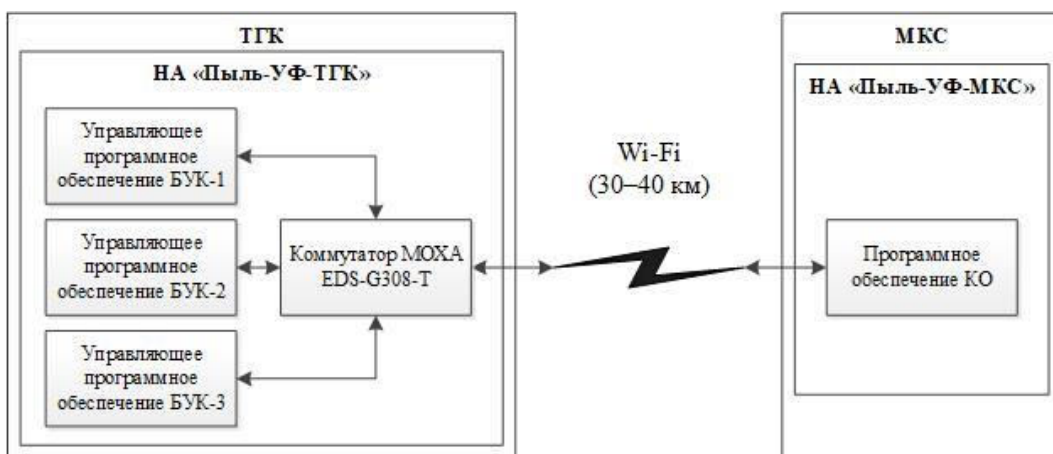


Рисунок 1 - Схема взаимодействия программного обеспечения в НА «Пыль-УФ»

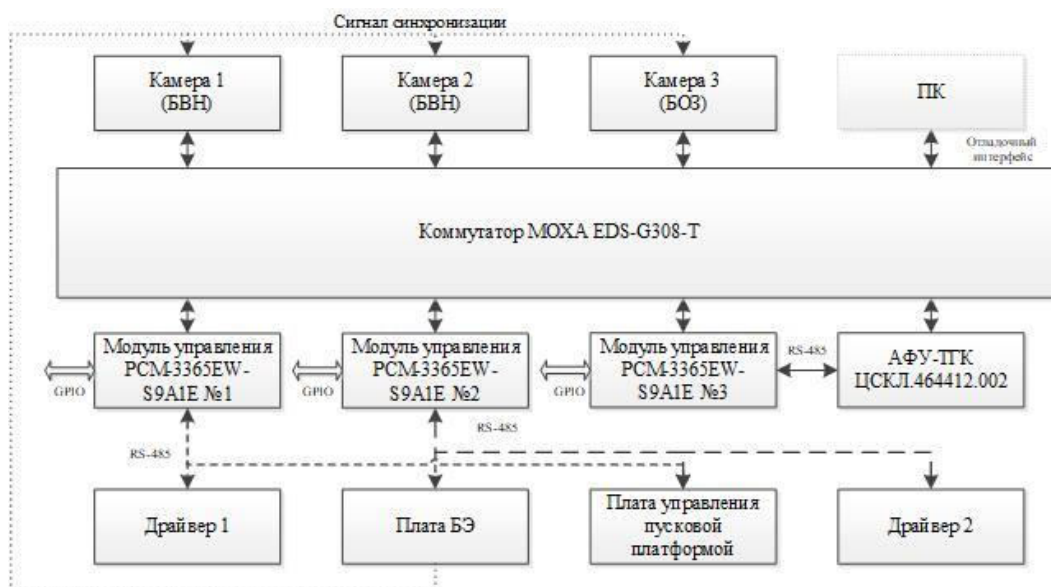


Рисунок 2 – Локальная сеть «Пыль-УФ-ТГК»

Модуль управления аппаратными блоками (ControlHardware) включает функции для управления двигателями, управления пусковой платформой, управления блоком экспериментальным. Модуль, по сути, является ретранслятором команд Modbus в MQTT.

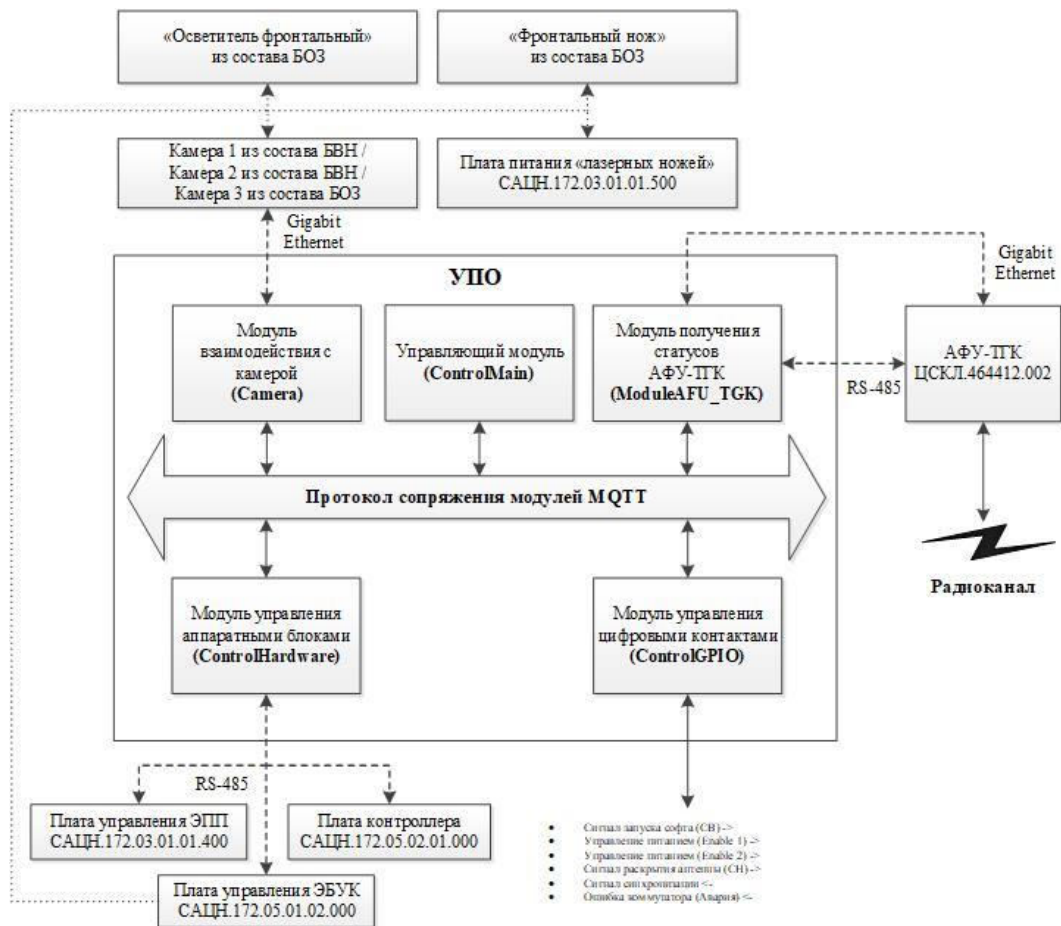


Рисунок 3 – Структура модулей ПО на ТТК

Структура модулей ПО НА «Пыль-УФ-МКС» для каждого из РСМ3365-Х приведена на рисунке 4. Модуль графического интерфейса пользователя выполняет функцию связи с пользователем, передачу его команд в ПО «Пыль-УФ ТТК», а также отображение принимаемых потоков видеoinформации.

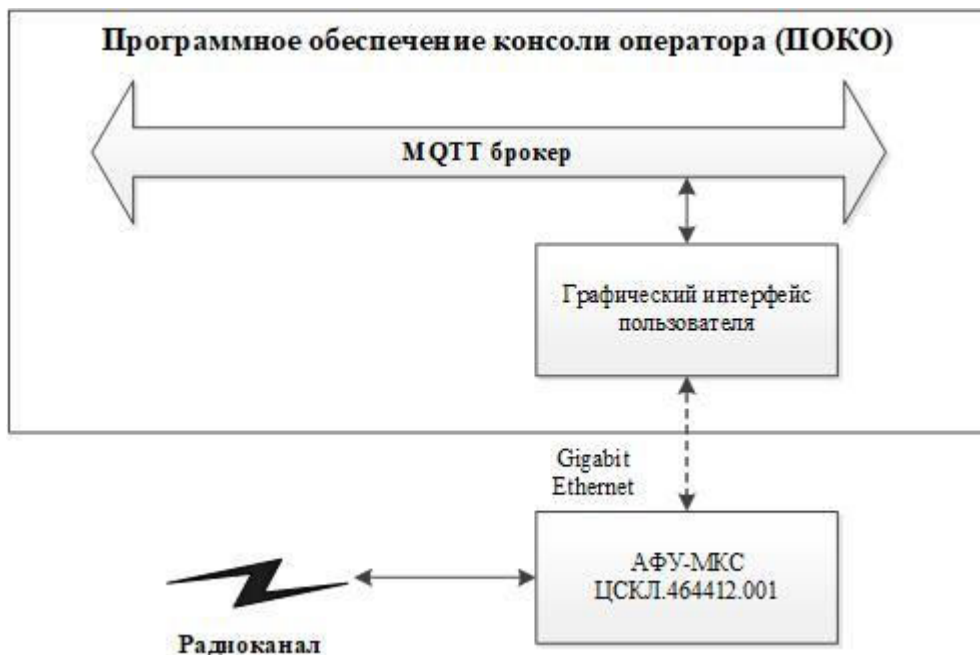


Рисунок 4 – Структура модулей ПО НА «Пыль-УФ-МКС» для КО

2. Камеры и видео. Для записи эксперимента с целью дальнейшей передачи его на землю в рамках данного проекта разрабатывается программный комплекс по работе с видеоданными. Данный программный комплекс состоит из двух частей.

Модуль взаимодействия с камерой, работающий на каждом из РСМ3365, который в свою очередь состоит из части, которая отвечает за работу с видеосообщением и части, отвечающей за управление камерой по протоколу. Основная задача данного модуля – управление камерой, прием видеосообщения, сохранение ее в сыром виде на диск, кодирование и отправка видеосообщения в КО. Данный модуль написан на языке С++ [2] с использованием библиотеки gstreamer с открытым исходным кодом и реализацией протокола MQTT для С++ Eclipse Paho [3]. Данный модуль можно разбить на 2 части. В отдельном потоке работает цепочка (см. рисунки 5, 6).

В основном потоке постоянно проверяются все «топики», на которые подписан модуль и, в зависимости от обновления данных «топиков», запускается/останавливается запись, включается/выключается вещание по протоколу пользовательских дейтаграмм (User Datagram Protocol, сокр. UDP) в графический пользовательский интерфейс и происходит прекращение работы модуля.

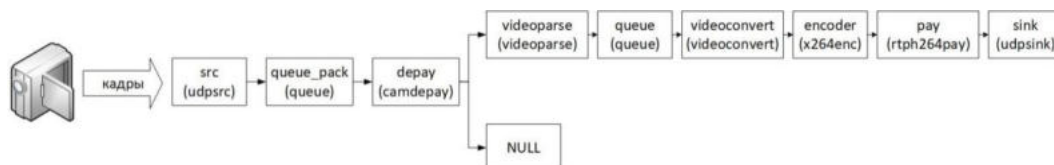
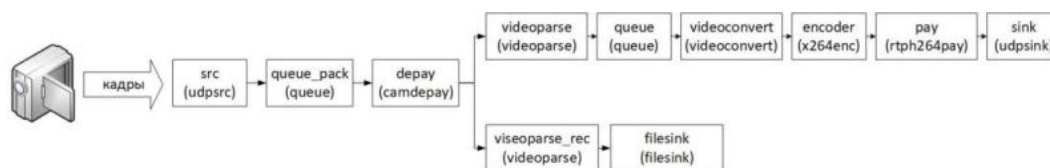


Рисунок 5 – Цепочка с выключенной записью



Цепочка во время записи

Рисунок 6 –

Вторая часть данного программного комплекса – графический пользовательский интерфейс, работающий на КО. С точки зрения данного программного комплекса он должен отвечать за прием видеосообщения, трансляцию видеопотока в режиме реального времени и скачивание «сырых» видеосообщения с дисков на ТК по протоколу передачи файлов (File Transfer Protocol, сокр. FTP).

На рисунке 7 представлен пример работы данной программы с получением видеопотоков. Схематичное представление цепочки для получения потока видеосообщения из модуля управления камерой и отображение в программные модули вывода (виджеты) – на рисунке 8.

Для реализации пользовательского графического интерфейса использовался набор библиотек Qt 5 [4, 5].

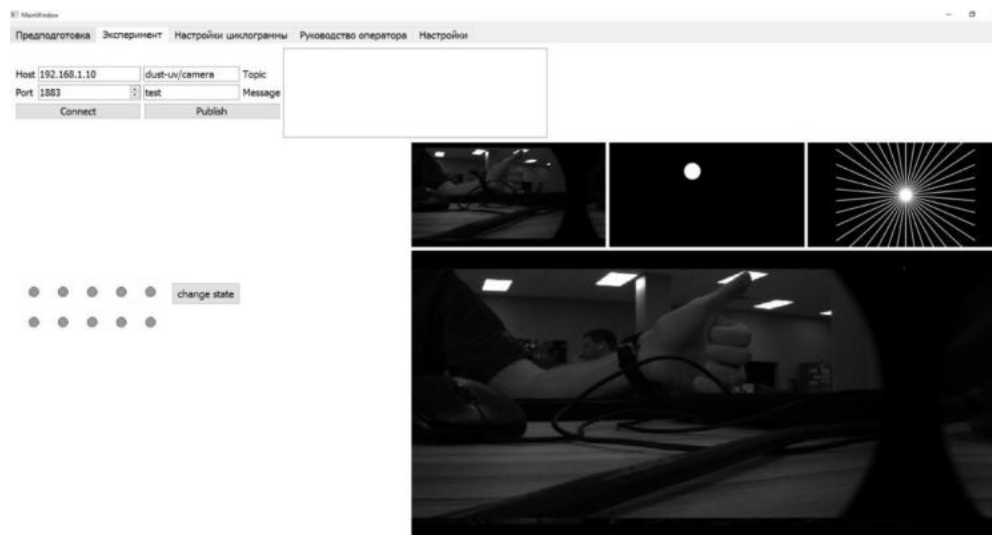


Рисунок 7 –



Рисунок 8 – Цепочка получающих потоки видеосообщения и отображающий их в GUI

Заключение. В рамках данной работы был спроектирован и реализован программный комплекс, отвечающий за работу с потоками видеосообщения, поступающими с камер в режиме реального времени. Для реализации пользовательского графического интерфейса использовалась связка из набора библиотек Qt5 и языка высокого уровня С++. Так же были использованы сторонние библиотеки gstreamer для работы с видеосообщением и paho-mqtt для реализации клиента mqtt. Модуль управления камерой был написан на языке высокого уровня С++ так же с использованием библиотек paho-mqtt и gstreamer. Разработанные модули позволяют выполнять полный спектр задач для работы с потоками видеосообщения в рамках КЭ «Пыль-УФ».

Библиографический список

1. Пыль-УФ [Электронный ресурс] - URL: https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/pyl_uf/ (дата обращения 09.03.2022).
2. Страуструп Бьерн. Язык программирования C++. Специальное издание.: Пер. с англ. –М.: ООО «Бином», 2017. –1136с.
3. MQTT: The Standard for IoT Messaging. [Электронный ресурс] - URL: <https://mqtt.org/>. (дата обращения 17.03.2022).
4. Фреймворк Qt. [Электронный ресурс] - URL: <https://www.qt.io/>. (дата обращения 11.03.2022)
5. Саммерфилд М. Qt. Профессиональное программирование. Разработка кроссплатформенных приложений на C++. – Пер. с англ. СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 560 с.

УДК 004.415.2

РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «ГАЗОАНАЛИЗАТОР-ФС»

И.А. Андрейчук, Т.М. Сухов, И.Н. Магомедов, А.А. Васильев

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

Введение. Актуальность обусловлена необходимостью решения проблем, связанных с низкой эффективностью уже используемых методов и подходов обнаружения микропримесей и газов, возникающих при аварийных ситуациях на Международной Космической Станции (МКС). Таким образом, актуальна задача создания прибора, который бы в автоматическом и/или автоматизированном режиме смог определять газовый состав атмосферы МКС и предупреждать космонавта о нештатных ситуациях. Внедрение такой научной аппаратуры позволит снизить функциональную нагрузку космонавтов за счёт автоматического/автоматизированного мониторинга газовых примесей, облегчит обработку данных и позволит повысить производительность труда.

Современные газоаналитические приборы в виду обширного спектра выполняемых измерений (оценка большого числа газов и примесей в составе газовой смеси), представляют собой аппаратно-программные комплексы.

АО «Лазерные системы» выполняют разработку Фурье-спектрометра в рамках космического эксперимента «Научная аппаратура «Газоанализатор-ФС» (НА «Газоанализатор-ФС»).

Постановка задачи исследования. Ключевую задачу в аппаратно-программном комплексе НА «Газоанализатор-ФС» будет выполнять программное обеспечение, которое с одной стороны будет производить организацию сбора данных с датчиков, а с другой – выполнит математические операции для вычисления газового состава атмосферы, а также, предоставит космонавтам информацию о газовом составе атмосферы и о нештатных ситуациях.

Космический эксперимент «Газоанализатор-ФС». Изделие предназначено для проведения научных исследований в условиях микрогравитации, а именно для проведения космического эксперимента «Отработка методологии и перспективных аппаратурных средств контроля газового состава методом Фурье-спектроскопии» по отработке методологии и отработке портативного газоанализатора для автоматического мониторинга основных составляющих атмосферы, газовых микропримесей, газов, возникающих при пожаре и аварийных ситуациях, в обитаемых отсеках российского сегмента (РС) международной космической станции. НА «Газоанализатор-ФС» можно разделить на две части: аппаратную и программную составляющую.

1.1 Аппаратная составляющая

В состав аппаратной части НА «Газоанализатор-ФС» входят:

- фурье-спектрометр;
- корпус;
- модуль распределения питания;
- блок отбора проб воздуха, в состав которого входят:
 - 1) датчик кислорода;
 - 2) датчик водорода.
- блок управления и сбора данных.

1.2 Программная составляющая

Программное обеспечение научной аппаратуры реализовано в виде модулей, каждый из которых запускается в отдельном процессе. Обмениваются информацией между собой модули посредством протокола транспорт телеметрии очереди сообщений (Message Queuing Telemetry Transport, сокр. MQTT), через т.н. брокер (сервер сообщений). На рисунке 1 представлена схема состава модулей программного обеспечения НА «Газоанализатор-ФС».

Назначение модулей следующее.

Управляющий модуль – обеспечивает управление остальными модулями в системе. К его задачам относится изменение настроек модулей. Модуль управляет и настраивает остальные модули по средствам MQTT-брокера.

Модуль веб-интерфейса – обеспечивает отображение концентрации газов и газовых примесей в браузере. Модуль реализован в виде скрипта, который создаёт локальный сервер, который в свою очередь подписывается на топике с необходимыми данными, считывает и отображает их на веб-странице. Веб-страница каждые 4 секунды опрашивает сервер и получает новые данные. На веб-странице хранятся только последние данные об измерении.

Модуль управления и сбора данных от интерферометра – обеспечивает сбор показателей концентраций газов и газовых примесей.

Модуль протокола взаимодействия с информационной и управляющей системой (ИУС) РС МКС необходим для обеспечения передачи данных измерений газового состава модуля РС МКС и телеметрии НА «Газоанализатор-ФС» по запросу со стороны ИУС по протоколу передачи файлов (File Transfer Protocol, сокр. FTP), приема информации о времени от ИУС, передачу пакета данных измерений от НА «Газоанализатор-ФС» в ИУС по цифровому протоколу ИУС (DIUS), включающего в себя индикацию превышения предельных значений газов и микропримесей с периодичностью в 5 минут.

Модуль протокола взаимодействия с системой бортовых измерений (СБИ) РС МКС предназначен для передачи в СБИ служебных (телеметрических) параметров.

Модуль обработки вибратора необходим для обработки данных с преобразователя напряжения.

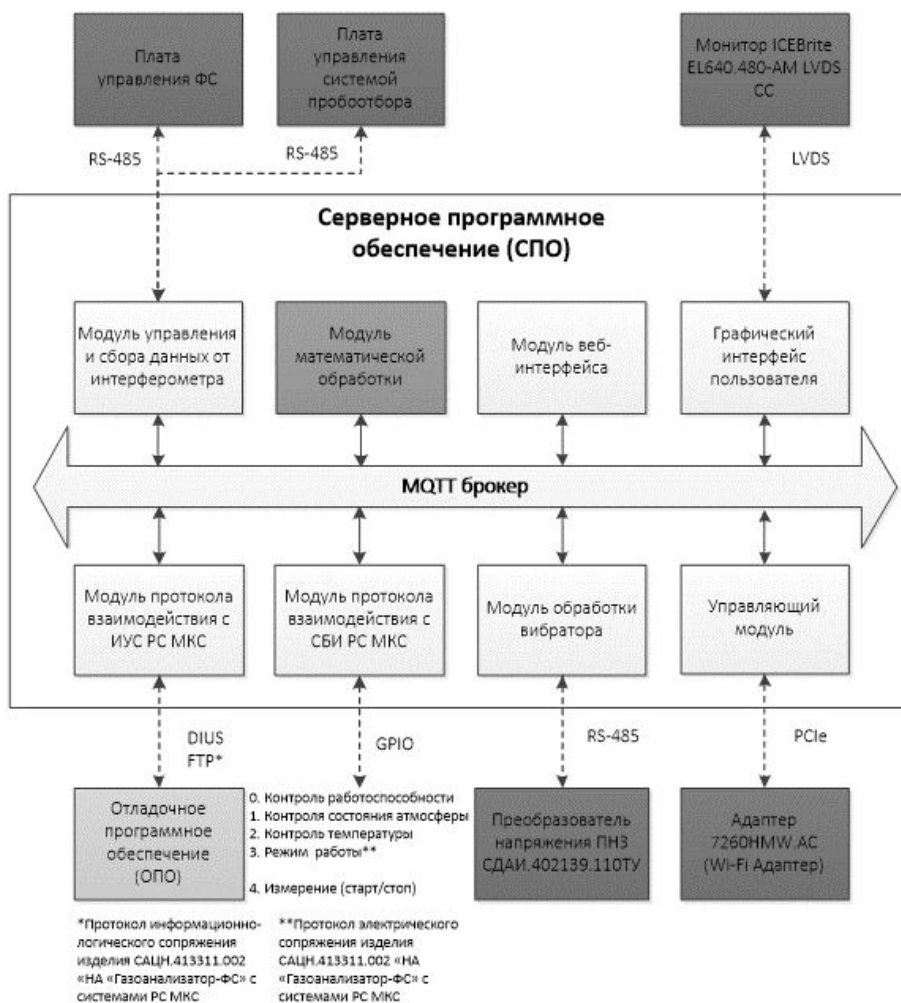


Рисунок 1 – Структура модулей программного обеспечения НА «Газоанализатор-ФС»

Методы обработки концентраций газов и газовых примесей

Входными данными для модуля математической обработки в составе НА «Газоанализатор-ФС» является массив, каждый элемент которого представляет собой отношение спектральной мощности излучения на данной длине волны, прошедшего через кювету с исследуемым веществом, к спектральной мощности излучения, прошедшего через кювету, наполненную азотом.

Выходными данными являются концентрации газов в численном виде, записанные на топики модуля.

Методом решения поставленной задачи выбрано решение по закону Бугера-Ламберта:

$$-\frac{1}{L} \ln \left(\frac{P(\lambda)}{P_0(\lambda)} \right) = \sum_{j=1}^N \sigma_j(\lambda) n_j$$

Управляющие средства внутреннего обмена

Внутренний обмен между модулями происходит посредством MQTT-брокера. Для передачи и получения данных используются два основных сообщения – опубликовать (PUBLISH) и подписаться (SUBSCRIBE).

Сообщение PUBLISH используется непосредственно для передачи данных. Данные сообщения PUBLISH представляют собой байтовый массив. В этом массиве в текстовом или бинарном виде передается значение параметра.

Сообщение SUBSCRIBE используется для подписки на выбранный топик. Пример сообщений в клиенте программного обеспечения MQTT.fx представлен на рисунке 2.

Управляющие средства модуля пользовательского интерфейса

Модуль пользовательского интерфейса подключается к MQTT-брокеру при запуске и подписывается на требуемые для его работы топики.

Входными данными для модуля являются концентрации газов, представленные в числовом виде и находящиеся на топике модуля математической обработки.

Модуль обеспечивает отображение обработанных данных с топиков модуля математической обработки в графическом виде.

Выходные данные в виде заполняющейся, в зависимости от концентрации примеси в атмосфере, шкалы выводятся в главное окно пользовательского интерфейса.

Пример главного окна модуля пользовательского интерфейса представлен на рисунке 3.

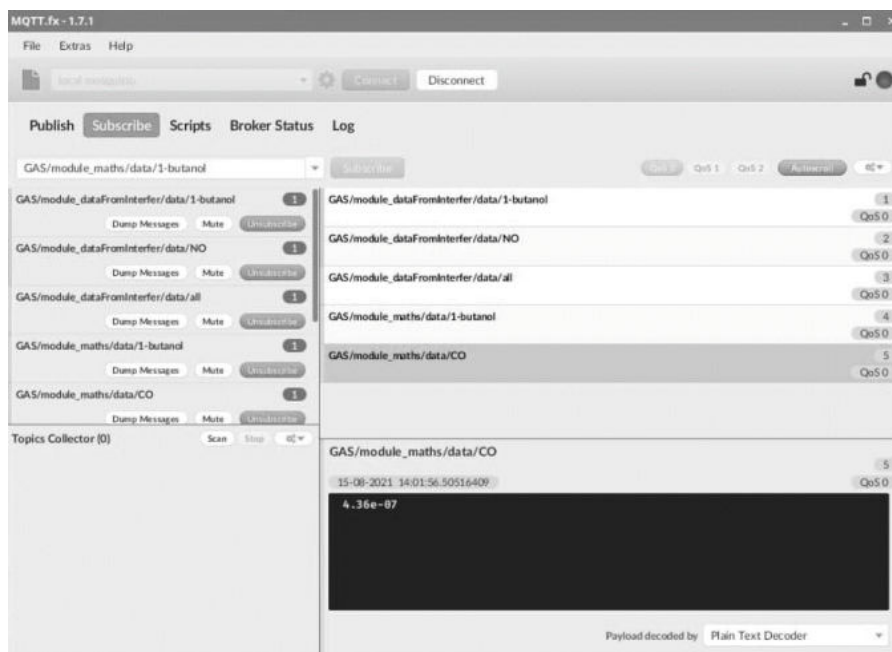


Рисунок 2 – Сообщения в клиенте



Рисунок 3 – Пример окна пользовательского интерфейса

Выводы. По итогу проделанной работы были реализованы модуль математической обработки и модуль графического интерфейса, а также внутренний обмен между модулями по MQTT-брокеру. Была отработана методология перспективного газоанализатора, созданного на базе Фурье-спектрометра, и датчиков кислорода, водорода, по автоматическому мониторингу основных составляющих воздуха, газовых микропримесей, газов, возникающих при пожаре и аварийных ситуациях, в обитаемых отсеках РС МКС.

С помощью данного оборудование космонавты могут легко определить основные составляющие воздуха и газовые микропримеси в обитаемых отсеках РС МКС и при необходимости предотвратить чрезвычайную ситуацию.

Библиографический список.

1. Газоанализатор-ФС [Электронный ресурс] - URL: https://tsniamash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/gazoanalizator_fs/ (дата обращения 09.03.2022).
2. Страуструп Бьерн. Язык программирования C++. Специальное издание.: Пер. с англ. -М.: ООО «Бином», 2017. –1136с.
3. Фреймворк Qt. [Электронный ресурс] - URL: <https://www.qt.io/>. (дата обращения 11.03.2022)
4. Саммерфилд М. Qt. Профессиональное программирование. Разработка кроссплатформенных приложений на C++. – Пер. с англ. СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 560 с.
5. MQTT: The Standard for IoT Messaging. [Электронный ресурс] - URL: <https://mqtt.org/>. (дата обращения 17.03.2022).

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА МОРСКОГО ДНА

П. О. Журкин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Цифровая модель рельефа (ЦМР) дна морских акваторий является важнейшим компонентом базы пространственных данных геоинформационных систем (ГИС) различной направленности. Данные по свойствам рельефа дна необходимы как для решения фундаментальных задач, так и широкого круга прикладных исследований: 1) создание и внедрение наукоемких инновационных технологий геолого-геофизических исследований, в том числе высокоразрешающих сейсмоакустических методов с целью исследования тонкой структуры рельефа дна; 2) планирование и организацию морской деятельности в условиях возможного увеличения сроков навигации в Арктике, а также прогнозные построения динамики рельефа по трассе Северного морского пути, включая вероятные геориски; 3) использование данных о свойствах дна для проектно-строительных работ; 4) развитие оперативной океанологии; 5) Использование батиметрических данных для разработки реалистичных симуляторов управляемого движения автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА); 6) разработку и эксплуатацию гидроакустических средств подводного наблюдения, в том числе прогноз их потенциальной дальности действия, а также другую обработку гидроакустической информации и т.д.[1]

В данной работе рассматривается использование открытых баз батиметрических данных о рельефе дна для разработки программного комплекса моделирования управляемого движения АНПА. Данный программный комплекс может использоваться для тестирования и отладки алгоритмов управления и навигации. В ходе работы было разработано несколько программных компонентов, отвечающих за чтение данных из базы, внутреннее представление и визуализацию.

Удобство использования данной программы заключается в том, что данные о рельефе дна считываются с изображения растрового формата .tif, взятого из открытой базы данных GEBCO. Также, важно отметить, что у программы достаточно высокая скорость получения и обработки данных, что позволяет обновлять выходные данные с высокой частотой, а это в свою очередь позволяет использовать ее в различных совместимых программных симуляторах.

GEBCO – аббревиатура от General Bathymetric Chart Oceans. Это международная группа геофизиков и гидрографов, работающих над разработкой ряда батиметрических наборов данных и продуктов. Целью GEBCO является предоставление наиболее авторитетной общедоступной батиметрии мирового океана. Она действует под совместной эгидой Международной гидрографической организации (МГО) и Межправительственной океанографической комиссии (МОК) (ЮНЕСКО). Работа GEBCO направляется Руководящим комитетом и поддерживается подкомитетами по картированию океана и названиям подводных объектов, а также специальными рабочими группами. Исследование мирового океана GEBCO осуществляется несколькими способами: акустическим (при помощи эхолотов) и с недавних пор (относительно всего существования GEBCO) при помощи орбитальных радаров, что дает точное и эффективное заполнение открытых баз данных. Карта рельефа дна мирового океана находится в открытом доступе, что является важным аспектом для разработчиков программ, использующих пространственные данные.[2]

Для работы с батиметрическими данными был выбран пакет GDAL. GDAL – это библиотека для чтения и записи растровых и векторных гео-пространственных форматов данных. Как библиотека, она представляет вызываемому приложению растровую абстрактную модель данных и векторную абстрактную модель данных для всех поддерживаемых форматов. GDAL также поставляется с различными полезными утилитами командной строки для перевода и обработки данных.[3] Эта библиотека способна обрабатывать данные с формата .tif, на основе взаимодействия с которым и была построена программа. Она использует функции и методы библиотеки GDAL, для получения, обработки и вывода данных, полученных с изображения пользователю.

TIFF – формат хранения растровых графических изображений, основное его преимущество – это огромная, по сравнению с другими растровыми форматами, глубина цвета. В программе используется усовершенствованная версия tiff формата, а точнее GeoTIFF. Этот формат, помимо большой глубины цвета, обладает еще одним преимуществом – наличием метаданных о географической привязке, что является очень важным аспектом в разработке программ, связанных с получением и обработкой геоданных.

Программа использует функции библиотеки GDAL для считывания растрового файла формата .tif и дальнейшего получения массива глубин с целью последующей обработки данных интерполяцией для получения более приближенной и точной сетки, состоящей из глубин в вершинах и интерполированных значениях между ними.

Более точная структура программы выглядит следующим образом: сначала программа считывает данные пользователя, введенные им с клавиатуры либо записанные заранее, а именно его текущие координаты и растровое изображение подводного рельефа дна в формате .tif, далее программа при помощи функций библиотеки GDAL получает массив глубин данного региона из растрового файла, затем опираясь на координаты пользователя и метаданные самого изображения программа вычисляет интерполированное значение глубины в текущих мировых координатах.

Интерполяция в предложенной программе реализована следующим образом: полученный массив глубин является своего рода сеткой, у которой узлы это значения массива, равноудаленные друг от друга на определенную величину, значение которой постоянно и записано в метаданных изображения. Однако зачастую возникает необходимость определить глубину в координатах между узлами сетки, тогда на помощь приходит интерполяция с коэффициентом, которая рассчитывает значение глубины в текущих координатах с учетом удаленности от каждого из близлежащих узлов:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{r_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^p}}$$

Где z_i – глубина в узле сетки, r_i^p – расстояние узла сетки от заданной точки, и z – искомая глубина заданной точки. Также учитывается мощность (p) – настраиваемый параметр, предполагаемый сглаживание значений по мере приближения к узлам. Такой метод интерполяции не только гибок в использовании, но и достаточно вариативен и точен в вычислениях.

Важно отметить, что существует множество методов интерполяции данных, среди которых есть еще один так же предложенный создателями и редакторами библиотеки GDAL – метод скользящей средней. Этот метод усреднения данных использует движущееся окно эллиптической формы для поиска значений и усреднения всех точек данных в окне. В этом способе интерполяции эллипс поиска можно повернуть на заданный угол. Математически это можно выразить так:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}$$

Где z_i – глубина в узле сетки, n – количество точек в эллипсе поиска, и z – искомая глубина заданной точки.

Возвращаясь к описанию программы, важно отметить, что она позволяет, в первую очередь, достаточно точно получить значение глубины в координатах, заданных пользователем. Выполнение программы занимает малое количество времени, за счет операций с памятью в процессе считывания массива глубин с растрового изображения. Разработанный программный комплекс является расширяемым и модульным, поэтому его доработка, изменение и внедрение в симуляторы не является проблемой. Программа содержит в себе помимо основной функции вывода текущей глубины также промежуточные функции, которые могут быть использованы как инструмент в реализации задач связанных с обработкой пространственных данных.

Пример работы предложенной программы с иллюстрациями позволяет понять ее функционал и возможности, а также увидеть результат обработки растрового изображения, загруженного из открытой базы данных GEBCO. Для примера был взят регион Тихого океана в месте, где расположен Марианский жёлоб, представленный на рис.1.



Рис. 1. Исходный растровый файл формата .tif

С данного растрового изображения программа считывает геоданные, затем при помощи своих функций создает двумерный массив из значений глубины каждого пикселя растрового изображения. Далее программа рассчитывает начальные и конечные координаты взятого региона для более понятного отображения визуальных данных.

После обработки и расчетов программой всех необходимых для построения графика значений, в том числе массива глубин изображения и его метаданных, программа строит график по выбору пользователя. График линий уровня рельефа дна отображает перепады глубин по координатной сетке, отображение глубины при этом представлено в виде изменения цвета линий уровня, он представлен на рис.2, а трехмерный график, отображающий визуализацию рельефа дна, также использующий для отображения перепадов глубин цветовую гамму, в этом регионе представлен на рис.3.

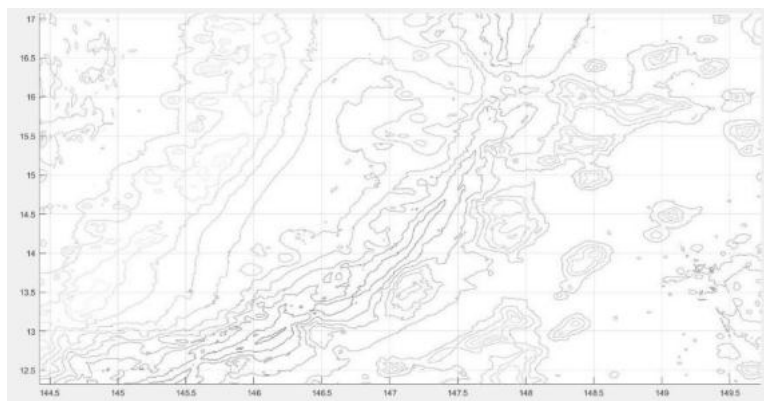


Рис. 2. Построенный график линий уровня рельефа

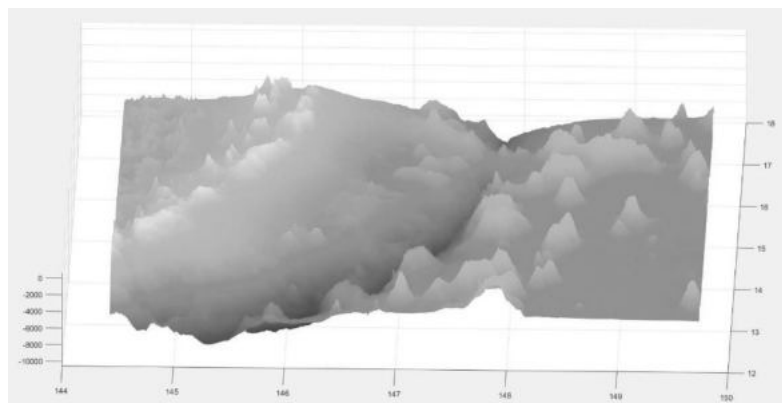


Рис. 3. Трехмерный график рельефа

Данная обработка растрового изображения – лишь часть функционала предложенной программы, помогающая визуализировать и более наглядно продемонстрировать рельеф дна заданного региона, что также может найти применение в исследованиях и разработке навигационных комплексов и систем управления ПА.

На данный момент поставлена задача внедрения разработанной программы в программный комплекс, моделирующий управление ПА, для тестирования и оценки ее эффективности, а также для дальнейшей доработки и развития ее функционала.

Библиографический список

1. С.Л. Никифоров, С.М. Кошель, Н.О. Сорохтин, Н.Е. Козлов Цифровые модели рельефа дна и некоторые возможности их морфометрического анализа // Вестник МГТУ, том 18, № 2, 2015 г. стр. 287-294
2. Организационная структура и цель GEBCO [Электронный ресурс] // GEBCO; URL: https://www.gebco.net/about_us/overview/
3. GDAL/OGR contributors (2022). GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library. Open-Source Geospatial Foundation. URL: <https://gdal.org> DOI: 10.5281/zenodo.5884351

УДК 621.397.424.2

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ДЕТЕКТИРОВАНИИ ВЗРЫВНЫХ УСТРОЙСТВ

В. А. Лупанова

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

Системы технического зрения (СТЗ) используются в условиях, когда объем априорной информации не достаточен и необходим анализ внешней обстановки в режиме реального времени. Благодаря развитию современных линейных и матричных приемников оптического излучения, обладающих высоким уровнем пространственного и цветного разрешения объектов, СТЗ могут использоваться для таких задач как распознавание, навигация или наведение, также они являются незаменимыми источниками информации применяемых в работах, сопряженных с риском для жизни человека – разминирование, мониторинг в агрессивных средах и т.д.

Автоматическое детектирование и распознавание объектов на изображениях и видео является одной из основных задач технического зрения. Как правило, эти задачи разбиваются на несколько подзадач: предобработка, выделение характерных свойств изображения объекта и классификация.

В настоящее время различные виды взрывных устройств (ВУ) используются террористами в местах большого скопления людей. Чаще всего такими местами являются различные виды транспорта: железнодорожный транспорт, автомобильный транспорт, авиатранспорт и морской транспорт. Первым и самым важным шагом для (предотвращения угрозы взрыва) является своевременное детектирование взрывного устройства и дальнейшее его разминирование/утилизация. Взрывные устройства могут быть самыми разнообразными как по внешнему виду, так и по принципу действия, но все они имеют демаскирующие признаки, опираясь на которые, можно провести анализ и предположить их назначение и способы активации.

Для реализации детектирования и распознавания взрывных устройств была разработана система обработки сигналов, состоящая из робототехнического устройства, пункта обработки сигналов с использованием алгоритмов обработки видео и изображений.

Робототехническое устройство выполняет функции съема и передачи видеопотока в пункт обработки информации, где, в дальнейшем, происходит его обработка.

Робототехническое устройство включает в свой состав:

- 1) МК Raspberry Pi Zero W;

В данной работе используется модель Raspberry Pi Zero W, она обладает самыми малыми размерами по сравнению с остальными моделями линейки Raspberry Pi и хорошо подходит для использования в робототехническом устройстве типа «камера видеонаблюдения», который, для повышения параметра скрытности, не должен обладать большими размерами. На плате находятся чипы Broadcom BCM2835 и оперативной памяти объемом 512 МБ, порты ввода-вывода, слот для microSD-карты и мультимедийные интерфейсы. Главное отличие Zero W от стандартной Raspberry Pi Zero — наличие беспроводного модуля с Wi-Fi и Bluetooth, что позволяет интегрировать мини-компьютер в проекты интернета вещей без дополнительной периферии. Мощности процессора хватает для работы с графическими операционными системами и обработки потокового видео с помощью библиотеки OpenCV.

- 2) Камера Raspberry Pi Camera Board V2;

Камера оснащена восьмимегапиксельным сенсором Sony IMX219 Exmor, что позволяет захватывать, записывать и транслировать видео в форматах 1080p, 720p и VGA. Для фотографий максимальное разрешение кадров составляет 3280×2464 пикселей.

Для подключения модуля используется специальный видеовход CSI (Camera Serial Interface), что значительно снижает нагрузку на центральный процессор по сравнению с подключением камер по USB. Модуль совместим со всеми моделями Raspberry Pi 1, 2 и 3.

- 3) microSD - карта с образом системы;
- 4) Шлейф с полноразмерного разъема CSI на миниатюрный CSI, используемый в моделях Zero и Zero W;
- 5) Корпус устройства.
- 6) Питание устройства

Пункт обработки информации выполняет функцию обработки видеопотока для детектирования и классификации возможного ВУ. Для осуществления данной функции необходимо реализовать следующие операции:

- 1) принятие видеопотока;
- 2) разбиение видеопотока на последовательные изображения с некоторым периодом (создание скриншотов);
- 3) использование алгоритмов обработки изображения;
 - 3.1) тренировка нейросети;
 - 3.2) предобработка полученных изображений;
 - 3.3) выделение характерных свойств изображения объекта;
 - 3.4) классификация;
- 4) принятие решения, находится ли ВУ на изображении.

Этап предобработки обычно включает некоторые операции с изображением, такие как фильтрация, выравнивание яркости, геометрические корректирующие преобразования для облегчения устойчивого выделения признаков.

Под характерными свойствами изображения объекта понимается некоторый набор признаков, приближённо описывающий интересующий объект.

Под классификацией понимают определение принадлежности объекта к тому или иному классу путём анализа вектора признаков, полученного на предыдущем этапе, разделения признакового пространства на подобласти, указывающие на соответствующий класс.

Важнейшим фактором, влияющим на качество классификации, ее устойчивость, является выбранное множество признаков, их способность отделять изображения объектов разных классов друг от друга. Чем большей разделительной способностью обладают признаки, тем проще устроено признаковое пространство, и классификатор может иметь простой вид. Наоборот, чем менее уникальны признаки, тем сложнее устроено признаковое пространство и требуется более сложный классификатор для его успешного разделения. Композиция большого количества “простых” признаков может аппроксимировать небольшое количество “сложных”. Используя эти идеи, современным и эффективным является подход, объединяющий все этапы анализа изображения: предобработку, одновременное выделение множества “простых” признаков и их классификация на основе оптимизации по обучающей базе изображений многослойных сверточных нейронных сетей глубокого обучения (CNN), в которых процедура выделения признаков осуществляется в начальных слоях, являясь частью классификатора, структура признаков формируется автоматически в процессе его обучения и определяется моделью и архитектурой сети. Чем больше “простых” признаков необходимо использовать для характеристики (аппроксимации) целевых объектов, тем больше параметров требуется для задания модели сети, тем она вычислительно “сложнее”. CNN можно рассматривать как обобщенный метод моделирования признакового пространства, однако он требует значительных вычислительных ресурсов и объема обучающей выборки изображений, репрезентативно представляющих все необходимые классы объектов.

Также возможны следующие дополнительные операции, осуществляемые системой:

- Оповещение оператора о нахождении в поле зрения камер ВУ
- Запись лиц людей в БД (базу данных) имеющих контакт с ВУ

Пункт обработки информации включает в свой состав:

- 1) МК Raspberry Pi 4 Model B;

Плата построена на базе SoC Broadcom BCM2711, которая содержит четыре 64-разрядных ядра ARM Cortex-A72 с тактовой частотой 1.5 ГГц. В отличие от любой предыдущей платы, Raspberry Pi 4 Model B доступна в трех разных моделях, каждая из которых предлагает различные варианты памяти с 1 ГБ, 2 ГБ, 4 ГБ или 8 ГБ LPDDR4 SDRAM оперативной памяти.

Наиболее заметное отличие от предыдущих моделей заключается в том, что на новой плате отсутствует микросхема LAN7515, которая выполняла функции USB и Ethernet. На его месте VLI VL805, которая обеспечивает USB 3.0 Hub через шину PCI Express. Использование шины PCI Express, предоставляемой новым BCM2711, означает, что теперь есть не только возможность USB 3.0, но и Gigabit Ethernet, который теперь предоставляется с использованием Broadcom BCM54213PE отдельно от USB. Беспроводная связь обеспечивается тем же чипом Cypress CYW43455, который мы видели на Raspberry Pi 3 модель В+. Предлагается двухдиапазонная беспроводная сеть IEEE 802.11.b/g/n/ac 2,4 ГГц и 5 ГГц, а также Bluetooth 5.0 и Bluetooth LE.

- 2) Устройства ввода и вывода информации (периферия)

Для установки необходимого ПО и управления процессом принятия и обработки информации, необходимо подключить монитор, клавиатуру и компьютерную мышь.

- 3) Корпус устройства
- 4) Питание устройства

Для достижения цели работы, были подключены дополнительные библиотеки для работы с изображениями.

Библиотека OpenCV

OpenCV — это open source библиотека компьютерного зрения, которая предназначена для анализа, классификации и обработки изображений. Широко используется в таких языках как C, C++, Python и Java. Но

наиболее часто она используется для написания приложений машинного обучения на языке Python, особенно в сфере компьютерного зрения.

Помимо кроссплатформенности и поддержки многих языков программирования, которые позволяют использовать приложения на различных системах, библиотека OpenCV весьма эффективна (по сравнению с другими похожими библиотеками) с точки зрения вычислений, так как почти все функции и операторы в ней векторизованы.

Библиотека Pixellib

Pixellib — это библиотека для задачи сегментации объектов на изображениях и видеозаписях. Библиотека поддерживает два основных вида сегментации объектов: семантическую и instance сегментации.

Сложность имплементации ML-моделей

Сегментация объектов имеет множество применений в компьютерном зрении, как анализ медицинских изображений, сегментация дорожной сцены для беспилотных автомобилей, анализ спутниковых изображений и редактирование фотографии. Разработчики обычно сталкиваются со сложностями в интеграции моделей машинного обучения в свои продукты. Одна из сложностей заключается в комбинировании навыков программирования с навыками обучения моделей. Цель Pixellib — снизить порог входа для разработчиков, которые хотят использовать модели сегментации объектов в своих системах.

Редактирование фона на изображении

Библиотека позволяет имплементировать модели сегментации без теоретических знаний работы нейросетей. Одна из задач, которую позволяет решить Pixellib, — редактирование заднего фона на изображении или видеозаписи. Это решается в 5 строчек кода.

Функционал библиотеки позволяет:

- Создавать виртуальный фон для изображений и видео;
- Затирать фон на изображениях и видео;
- Окрашивать задний фон в какой-то цвет;
- Делать фон черно-белым

Библиотека Pillow

Библиотека изображений Python, или PIL (Python Imaging Library) нужна для обработки графики в Python. Фредрик Лунд является автором одного из лучших блогов, посвященных Python. Однако он перестал обновляться в далеком 2009 году, незадолго до последнего релиза PIL. К счастью, нашлись разработчики Python, что подхватили проект, создав форк PIL под названием Pillow. Pillow стал заменой оригинальной библиотеки PIL. Он также поддерживает Python 3, чего PIL так и не достиг.

Библиотека Face_recognition

Еще одна open-source библиотека, построена на C++ библиотеке dlib. Отличается высокой точностью, очень удобна в использовании, ее легко развернуть на сервере даже без дорогостоящего GPU и у нее довольно простые требования. Выделяет черты лица на изображениях, и в случае, если нам нужен такой функционал, записывает информацию о нем в БД и, по полученным снимкам, осуществляет идентификацию найденного человека.

Функциональная схема системы обработки сигналов для детектирования и распознавания ВУ выглядит следующим образом:



Рис. 1. Конструкция системы обработки сигналов робототехнического устройства

Разработка и дальнейшая отладка данной системы позволят быстрее реагировать на случаи минирования, что увеличит шансы на своевременное разминирование/утилизацию взрывного устройства.

Библиографический список

1. Ян Эрик Содем. «Программирование компьютерного зрения на языке Python».
2. Ричард Шелски. «Компьютерное зрение: алгоритмы и приложения».
3. Айрапетян В. С., Бакуменко М. С., Губин С. Г. «Методы обнаружения взрывчатых веществ» // URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-obnaruzheniya-vzryvchatyh-veschestv>

4 октября 1957 года был запущен первый искусственный спутник Земли. С каждым годом применение спутниковых систем увеличивается. Они используются для научных исследований, наблюдения Земли, военных нужд, астрономии, обеспечения связи, образования, а также для отработки технологий. Создание малых космических аппаратов, привело к снижению сроков разработки и стоимости космических проектов, что привело к росту запусков малых космических аппаратов. Кроме финансовой стороны, преимуществом является возможность проведения летных испытаний миниатюрных датчиков и элементов бортовых систем в условиях космического пространства до их применения в дорогостоящих космических миссиях.

Кластерные запуски позволили одновременно вывести несколько спутников (от двух и более) на околоземную орбиту. А запуск нескольких спутников, совместно решающих целевую задачу, значительно расширяет область их применения. Применение группировок «созвездие», «формация» и «рой» создало преимущество перед возможностями большого аппарата.

Поддержание структуры группировки предполагает наличие на борту двигательной установки, на возможность применения вариации которой влияют весовые ограничения. Требования к выбору двигателя и запасу характеристической скорости определяется задачей разведения спутников по фазе в каждой из орбитальных плоскостей и поддержания фазы при эксплуатации, также влияют затраты на компенсацию атмосферного торможения.

Существуют наноспутники, не оснащенные двигательной установкой. В этом случае поддержание структуры группировки осуществляется посредством управления аэродинамическим сопротивлением. За счет изменения ориентации спутника меняется и площадь его сечения относительно набегающего потока, которая определяет величину аэродинамической силы, действующий на аппарат [1].

В групповом полёте спутников очень важно поддержание определенного расстояния между ними. В данной работе излагается подход к созданию и поддержанию формации малых космических аппаратов на околоземных орбитах, с применением проекционных круговых орбит (Projected Circular Orbit, PCO). В основе лежит управление с помощью ПД-регулятора [2]. Дополнительно рассмотрен вариант комбинированного закона управления с использованием мультиагентного управления на основе алгоритма консенсуса. В этом случае малые космические аппараты обмениваются информацией между собой. Для построения информационных связей используется теория графов. Подобный шаг позволил увеличить точности позиционирования формации.

Новые законы предложены для полной нелинейной и зависящей от времени динамики относительного движения спутников по эллиптической орбите. Спутник-лидер движется по эллиптической орбите вокруг Земли. Он обеспечивает опорную точку для движения группы спутников-последователей (рисунок 1). Для описания динамики относительного движения спутников-последователей, летящих в центральном поле тяготения Земли использованы уравнения в местной-вертикальной – местной-горизонтальной (Local Vertical Local Horizontal, LVLH) [1] системе отсчета, записанные в относительных координатах согласно модели Хилла – Клохесси – Уилтшира (Hill—Clohessy—Witshire, HCW) [3–5], описывающей относительное движение двух спутников.



Рисунок 17 — Системы координат

Системы координат показаны на рисунке 1. На этом рисунке \vec{r}_c — это вектор позиции головного спутника, \vec{r} — вектор позиции ведомого спутника и $\vec{\rho}$ — относительный вектор положение между головным и преследующим.

Основная нелинейная система уравнений относительного движения выражена [6]

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} - 2\dot{\theta}\dot{y} - \ddot{\theta}y - \dot{\theta}^2x + \frac{\mu}{\gamma}x + \frac{\mu}{\gamma}r_c - \frac{\mu}{r_c^2} \\ \ddot{y} + 2\dot{\theta}\dot{x} + \ddot{\theta}x - \dot{\theta}^2y + \frac{\mu}{\gamma}y \\ \ddot{z} + \frac{\mu}{\gamma}z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\ddot{r}_c = r_c \dot{\theta}^2 - \frac{\mu}{r_c^2}, \quad \ddot{\theta} = -\frac{2\dot{r}_c \dot{\theta}}{r_c} \quad (2)$$

где x , y and z - переменные состояния для описания вектора относительного положения, $\vec{\rho}$ в x , y и z осях, соответственно; a_x , a_y и a_z орбитальные возмущения, такие как асферическое геопотенциальное возмущение, нагрузка, сопротивление воздуха и солнечный ветер. $a_j = (f_j + d_j)/m_f \quad \forall j = \{x, y, z\}$, где m_f обозначает массу космического корабля, и f_j обозначает управляющий вход, приложенный к космическим кораблям, d_j возмущения, θ угол широты головного спутника, r_c радиус орбиты головного спутника и гравитационный параметр. Наконец, γ определена, как:

$$\gamma \equiv |\vec{r}_c + \vec{\rho}| = ((r_c + x)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}, \quad (3)$$

При движении лидера по круговой орбите Земли, его угловое ускорение равно нулю [6]. В таком случае, в системе (1), $\ddot{\theta}y = \ddot{\theta}y = 0$, $r_c = const$, $\dot{\theta} = const = n$, где n – средняя угловая скорость лидера, а уравнения (1),(2) принимают следующий вид[6]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - 2n\dot{y} - n^2x &= -\frac{\mu(r_c + x)}{\gamma} + \frac{\mu}{r_c^2} + a_x, \\ \ddot{y} + 2n\dot{x} - n^2y &= -\frac{\mu y}{\gamma} + a_y, \\ \ddot{z} &= -\frac{\mu z}{\gamma} + a_z. \end{aligned} \quad (4)$$

Линеаризованные уравнения (4) называются уравнениями Хилла – Клохесси-Уилтшира (HCW) [6,8]:

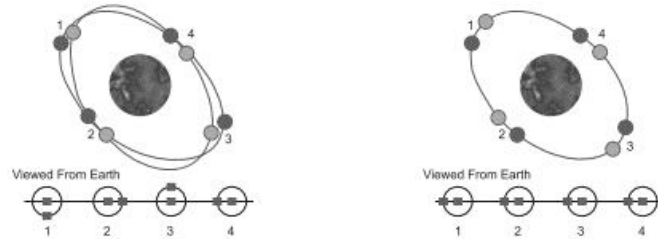
$$\begin{aligned} \ddot{x} - 2n\dot{y} - 3n^2x &= a_x, \\ \ddot{y} + 2n\dot{x} &= a_y, \\ \ddot{z} + n^2z &= a_z. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения HCW имеют следующие ограниченные периодические решения [9]:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (c_1/2) \sin(nt + \phi) \\ c_1 \cos(nt + \phi) + c_3 \\ c_2 \sin(nt + \phi) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где x , y и z – координаты относительного движения, ϕ – это фазовый угол в плоскости между лидером и последователем (начальный фазовый угол определяется во время пересечения экватором спутника лидера в локально-горизонтальной плоскости yz). Константы c_1 , c_2 , c_3 , α_0 определяются начальными условиями:

- Выбор $c_1 = c_2 = \rho$, $c_3 = 0$ задает конфигурацию, при которой последователь движется вокруг лидера так, что проекция его движения на локальную горизонтальную плоскость является окружностью $y^2 + z^2 = \rho^2$, где ρ – константа. Такая орбита называется проекционной круговой орбитой (Рисунок 2(а)).
- Выбор $c_1 = \rho$, $c_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $c_3 = 0$ задает конфигурацию, при которой последователь движется вокруг лидера по окружности в осях x , y и z локальной системы координат: $x^2 + y^2 + z^2 = \rho^2$. Такая орбита называется основной круговой орбитой или General Circular Orbit (GCO).
- Выбор $c_1 = c_2 = 0$, $c_3 = \rho$ задает конфигурацию лидер-последователь или Along-Track Orbit (ATO), где последователь следует за лидером по его орбите с постоянным смещением ρ (Рисунок 2(б)).



а) Проекционная круговая орбита б) Конфигурация лидер-последователь
Рисунок 2 — Конфигурация спутниковых орбит

Подставив в уравнения (6) значения $c_1 = c_2 = r_{dpc}$, $c_3 = 0$, получаем уравнение PCO:

$$\begin{pmatrix} x_d(t) \\ y_d(t) \\ z_d(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (r_{dpc}/2) \sin(nt + \phi) \\ r_{dpc} \cos(nt + \phi) \\ r_{dpc} \sin(nt + \phi) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где r_{dpc} размеры PCO группы, ϕ угол в плоскости между спутником-последователем и спутником-лидером, и n угловое ускорение, которое равно $\sqrt{\mu/a_c^3}$ (a_c – большая полуось орбиты спутника-лидера) [6].

Пусть задача управления группировкой спутников ставится так — имеется спутник – лидер, который движется по эллиптической орбите, но с малым эксцентриситетом, т.е. орбита близка к круговой орбите. Необходимо создать и поддерживать некую группировку спутников, которые располагаются в определенной формации относительно лидера и сохраняют эту формацию в течение времени. В случае круговой орбиты лидера, наиболее эффективными, с точки зрения расходования топлива двигателями спутников-последователей, будут орбиты GCO, PCO и ATO, поскольку такие орбиты являются устойчивыми решениями уравнений HCW (5). Тогда управление будет расходоваться только на противодействие возмущениям и парирование неучтенных нелинейностей в модели (5). Наиболее интересной представляется задача расположения и поддержания орбит группировки спутников на относительных орбитах PCO, даже в случае эллиптических орбит лидера. Также интересно исследовать возможность одновременного сохранения формации большого количества спутников на разных орбитах PCO. В этом варианте задается несколько орбит с разными r_{dpc} в (7), а на окружностях спутники располагаются с разными смещениями ϕ , так, что получается симметричное распределение спутников.

Для поддержания своего положения в формации каждый спутник – последователь должен в качестве заданной траектории $x_d(t)$ использовать выражение (7). Настраиваемыми параметрами являются матрица $K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$. Закон управления ПД-регулятора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_x &= -K_{px}e_x - K_{dx}\dot{e}_x, \\ \ddot{u}_y &= -K_{py}e_y - K_{dy}\dot{e}_y, \\ \ddot{u}_z &= -K_{pz}e_z - K_{dz}\dot{e}_z, \end{aligned} \quad (8)$$

где K_{px} , K_{dx} , K_{py} , K_{dy} , K_{pz} , K_{dz} положительные настраиваемые коэффициенты. В векторном виде:

$$\bar{\mathbf{u}} = -\mathbf{K}_{pd}\mathbf{e}, \quad (9)$$

где матрица $\mathbf{K}_{pd} \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ имеет вид:

$$\mathbf{K}_{pd} = \begin{bmatrix} K_{px} & 0 & 0 & K_{dx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{py} & 0 & 0 & K_{dy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{pz} & 0 & 0 & K_{dz} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Полученный закон управления (10) применяются отдельно к каждому спутнику группировки и не используют информацию о взаимном положении спутников в формации. Для повышения точности позиционирования формации можно применить мультиагентное управление на основе алгоритма(протокола) консенсуса [10,11].

Базовые сведения по алгоритму консенсуса

Граф ζ – это пара (v, ξ) , где $v = 1, \dots, n = 1$ набор узлов (агентов), $\xi \in v \times v$ – множество ребер, в котором каждое ребро представлено упорядоченной парой различных узлов. Ребро (i, j) показывает, что узел i является соседом узла j , и узел j может получать информацию от узла i . Граф является ненаправленным если для каждого $(i, j) \in \xi, (j, i) \in \xi$. Путь от узла i_1 к узлу i_l это последовательность упорядоченных ребер вида $(i_k, i_{k+1}), k = 1, \dots, l - 1$. Ненаправленный граф является связным, если для любого $i \in v$ существуют пути ко всем другим узлам.

Пусть в графе ζ содержится n узлов. Матрица смежности $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ определяется как $a_{ii} = 0, a_{ij} = 1$, если $(j, i) \in \xi$, и 0 в противном случае. Матрица Лапласа $\mathcal{L} = [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ определяется как $l_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ и $l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j$.

Сделаем предположение, что коммуникационный граф ζ ненаправлен и связан. На рисунке 3 показаны примеры ненаправленных связных графов. Пусть $\xi_i \in \mathbb{R}$ и $\zeta_i \in \mathbb{R}$ являются информацией о состоянии i -го агента. Для информационных состояний с динамикой второго порядка фундаментальный алгоритм консенсуса второго порядка был предложен Реном и Аткинсом в [12] следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \zeta_i, \\ \dot{\zeta}_i &= u_i. \end{aligned} \quad (11)$$

где $u_i \in \mathbb{R}$, имеет следующий вид:

$$u_i = -\sum_{j=1}^n a_{ij} (\gamma_0 (\xi_i - \xi_j) + \gamma_1 (\zeta_i - \zeta_j)), \quad (12)$$

где $\gamma_0 > 0, \gamma_1 > 0$.

Для алгоритма консенсуса (11)-(12) считается, что консенсус достигается асимптотически среди нескольких агентов, если $\|\xi_i(t) - \xi_j(t)\| \rightarrow 0$ и $\|\zeta_i(t) - \zeta_j(t)\| \rightarrow 0, \forall i \neq j$, при $t \rightarrow \infty$ для любых $\xi_i(0)$ и $\zeta_i(0)$. Когда ξ_i и ζ_i представляют собой позицию и скорость объекта управления, то выражение (12) задает ускорение.

Пусть для все агентов $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_n]^T$ и $\zeta = [\zeta_1, \dots, \zeta_n]^T$, тогда всю систему можно записать в векторном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\zeta} \end{bmatrix} = \Gamma \begin{bmatrix} \xi \\ \zeta \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_n \\ -\gamma_0 \mathcal{L} & -\gamma_1 \mathcal{L} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Векторное управление будет

$$U_c = -[\gamma_0 \mathcal{L} \xi + \gamma_1 \mathcal{L} \zeta], \quad (15)$$

где $U_c \in \mathbb{R}^n$.

Закон управления формацией спутников на основе алгоритма консенсуса

Мультиагентный закон управления формацией спутников можно получить, объединив выражения (9) и (13). Надо учесть, что (13) это закон управления для одной координаты. Введем следующие обозначения:

n — число агентов в формации (число спутников);

$i = 1, \dots, n$ - номера агентов;

$e_i = [e_{xi} e_{yi} e_{zi} \dot{e}_{xi} \dot{e}_{yi} \dot{e}_{zi}]^T$ — вектор ошибки агента i . Тогда закон управления для агента i можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{xi} &= -K_{px} e_{xi} - K_{dx} \dot{e}_{xi} - \sum_{j=1}^n a_{ij} \left((e_{xi} - e_{xj}) + \gamma (\dot{e}_{xi} - \dot{e}_{xj}) \right), \\ \bar{u}_{yi} &= -K_{py} e_{yi} - K_{dy} \dot{e}_{yi} - \sum_{j=1}^n a_{ij} \left((e_{yi} - e_{yj}) + \gamma (\dot{e}_{yi} - \dot{e}_{yj}) \right), \\ \bar{u}_{zi} &= -K_{pz} e_{zi} - K_{dz} \dot{e}_{zi} - \sum_{j=1}^n a_{ij} \left((e_{zi} - e_{zj}) + \gamma (\dot{e}_{zi} - \dot{e}_{zj}) \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Другой вариант мультиагентного управления формацией спутников можно получить на основе закона управления (10). Для этого представим матрицу коэффициентов в виде $\mathbf{K} = [k_x k_y k_z]^T$, где $k_x k_y k_z \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$, и вектор $\mathbf{u} = [u_x u_y u_z]^T$. В новых обозначениях (24) можно записать так

$$\begin{aligned} \bar{u}_x &= -k_x \mathbf{u}, \\ \bar{u}_y &= -k_y \mathbf{u}, \\ \bar{u}_z &= -k_z \mathbf{u}. \end{aligned} \quad (17)$$

Моделирование движения 24 спутников на трёх РСО орбитах

Для подтверждения работоспособности разработанных алгоритмов управления было проведено моделирование в пакете MATLAB/Simulink. Рассмотрена система (1), (2) и два закона управления, (9), (16). Закон (9) обозначается как ПД закон, (16) как пропорционально-дифференциально-консенсусный (ПДК). Была смоделирована одна ситуация для всех законов управления: 24 спутников на трех РСО орбитах. Орбита спутника лидера была одинаковой для всех расчетов. Параметры орбиты лидера следующие: $m_F = 10$ кг; $\mu_e = 398.600$ км³ с⁻²; радиус

перигея $R_p = 6971$ км; эксцентриситет $e = 0.2$; $\Omega, \omega = i = M = 0$ рад/с. Возмущения $d_j(t)$ для $j = \{x, y, z\}$, воздействуют на систему (1), (2), и включают гравитационные возмущения J_2 , атмосферное сопротивление и солнечный ветер были также учтены. Была принята следующая модель возмущения [8, 13, 14]:

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = 1.2 \times 10^{-3} \begin{bmatrix} 1 - 1.5 \sin(nt) \\ 0.5 \sin(2nt) \\ \sin(nt) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Стоит отметить, что модель (18) дает значения возмущений, немного превышающие действительные в схожих условиях.

Для моделирования заданы радиусы РСО-орбит 1000 м, 2000 м, 3000 м. На первой и второй РСО-орбите располагаются по 4 спутника, а на третьей — 8. Фазовый сдвиг между малыми космическими аппаратами, расположенными на первой орбите — $\frac{\pi}{2}$, а второй четверки, относительно первой — $\frac{\pi}{4}$. На третьей РСО-орбите все спутники располагаются с фазовым сдвигом $\frac{\pi}{2}$.

Коэффициенты для законов управления ПД и ПДК $K_{p_x} = K_{p_y} = K_{p_z} = 0.025$, $K_{d_x} = K_{d_y} = K_{d_z} = 15$. Они получены эмпирическим путем. Критерием является точность позиционирования после двух витков вокруг Земли [15]. Для ПДК дополнительно задавались коэффициенты алгоритма консенсуса $\gamma_0 = 0.01$ и $\gamma_1 = 0.04$ для пропорциональной и дифференциальной составляющей соответственно. Эти коэффициенты были одинаковыми для каналов x, y, z всех 24 спутников. Коммуникационный граф представлен на рисунке 3.

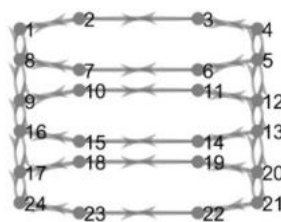


Рисунок 3 — Коммуникационный граф для 24 спутников

Результаты моделирования полета группы из 24 спутников с управлением ПД представлены на рисунке 4. Рисунок 5 демонстрирует результаты моделирования движения группы с ПДК законом.

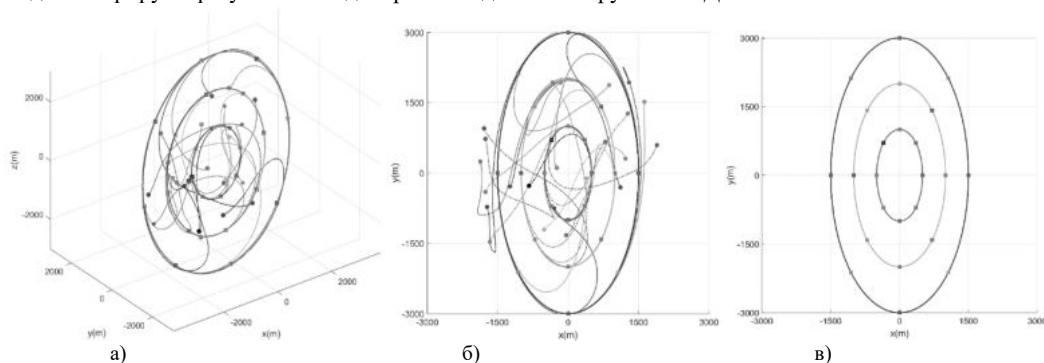


Рисунок 4 — ПД-регулятор: а) трёхмерный график траекторий; графики траекторий на плоскости YZ б) до выхода на РСО-орбиту; в) после выхода на РСО-орбиту

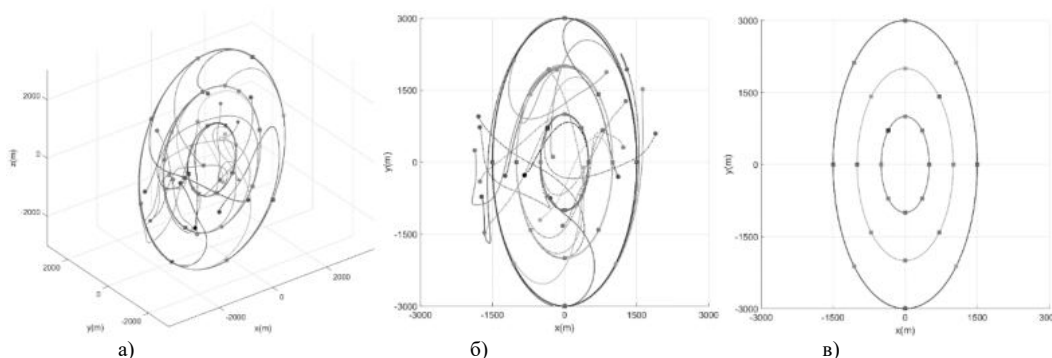


Рисунок 5 — ПДК-регулятор: а) трёхмерный график траекторий; графики траекторий на плоскости YZ б) до выхода на РСО-орбиту; в) после выхода на РСО-орбиту

Сравнение результатов моделирования для алгоритмов ПД-регулятора и ПДК-регулятора приведено в таблице 1.

Таблица 1 — Ошибки позиционирования для 24 спутников

Режим	e_x , см	e_y , см	e_z , см
ПД	33	12	31
ПДК	21	7.5	20

Заключение

В этой статье предложены законы позволяющие построить и поддерживать формацию спутников, основанные на использовании ПД-регулятора и мультиагентного управления. Было проведено математическое и компьютерное моделирование полученных алгоритмов для 24 спутников на трех проекционных орбитах. Было проведено сравнение этих методов.

Полученные результаты показали хорошую работоспособность предложенных законов управления формированием спутников для интересующей задачи. Показано, что предложенные закономерности управления группой обладает устойчивостью к различным возмущениям, включая асферическое возмущение гeопотенциала, сопротивление воздуха и давление солнечного излучения.

Внедрение алгоритма консенсуса привело к улучшению точности позиционирования спутников.

Библиографический список

1. Андриевский Б.Р., Кузнецов Н.В., Попов А.М. Алгоритмы аэродинамического управления относительным движением двух спутников по околокруговой орбите // Дифференциальные Уравнения и Процессы Управления. 2020. № 4. С. 28–58.
2. Popov, A.M.; Kostin, I.; Fadeeva, J.; Andrievsky, B. Development and Simulation of Motion Control System for Small Satellites Formation. Electronics. 2021. Том 10, № 24, 1–29.
3. Wong, H.; Kapila, V.; Sparks, A. Adaptive output feedback tracking control of multiple spacecraft // Proc. 2001 American Control Conference (ACC 2001), 2001, Vol. 2, pp. 698–703.
4. Zou, A.M.; Kumar, K. Distributed Attitude Coordination Control for Spacecraft Formation Flying // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2012, 48, 1329–1346.
5. Leonard, C.L.; Hollister, W.M.; Bergmann, E.V. Orbital formation keeping with differential drag // Journal of Guidance, Control, and Dynamics 1989, 12, 108–113.
6. Alfriend, K.; Vadali, S.; Gurfil, P. Spacecraft Formation Flying // Butterworth-Heinemann: Oxford, 2010.
7. Vaddi, S.; Alfriend, K.; Vadali, S. Formation Flying: Accommodating Nonlinearity and Eccentricity Perturbations // J. Guidance Control and Dynamics 2003, 26, 214–223.
8. Chobotov, V. Orbital Mechanics; American Institute of Aeronautics & Astronautics: AIAA Education Series, 2002.
9. Vaddi, S.S.; Alfriend, K.T.; Vadali, S.R.; Sengupta, P. Formation Establishment and Reconfiguration Using Impulsive Control // Journal of Guidance, Control, and Dynamics 2005, 28, 262–268.
10. Ren, W.; Beard, R.W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control // Springer London, 2008.
11. Olfati-Saber, R.; Murray, R. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays // IEEE Trans. Automat. Contr. 2004, 49, 1520–1533.
12. Ren, W.; Atkins, E. Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange // International Journal of Robust and Nonlinear Control 2007, 17, 1002–1033.
13. Godard, J.; Kumar, K. Fault Tolerant Reconfigurable Satellite Formations Using Adaptive Variable Structure Techniques // J. Guidance Control and Dynamics 2010, 33, 969–984.
14. Кузнецов Н.В., Андриевский Б.Р., Кудряшова Е.В., Кузнецова О.А., Попов А.М. Скрытые колебания управляемой аэродинамическим сопротивлением формации двух спутников // Материалы III Международного семинара, посвященного 75-летию акад. А.И. Субботина. 2020. С. 207–210.
15. Костин И.Д., Попов А.М., Кострыгин Д.Г., Фадеева Ю.В. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С НЕЯВНОЙ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ ГРУППИРОВКОЙ МАЛЫХ СПУТНИКОВ // XXIV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. С. 230–231.

УДК 621.311.69

РАСЧЕТ ФИЛЬТРУЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

К.В. Захарова, И.Г. Пронькин, В.А. Светлаков

АО «Научно-производственное объединение автоматики Н.А. Семихатова»

В настоящее время импульсные преобразователи используются практически во всех областях радиоэлектроники и являются одним из самых широко применяемых схемотехнических решений для построения источников вторичного электропитания (ИВЭП). Основными преимуществами импульсных преобразователей является высокое значение КПД и массогабаритные характеристики. Последнее достигается за счет возможности работы импульсных ИВЭП на высоких частотах преобразования.

Несмотря на то, что повышение частоты позволяет снизить габаритно массовые характеристики реактивных элементов выходного фильтра источника питания (конденсаторов и дросселей), это так же влечет за собой повышение влияния паразитных параметров как составляющих фильтр элементов, так и печатных проводников, соединяющих эти элементы.

На рисунках 1 и 2 представлены графики зависимости комплексного сопротивления от частоты для конденсатора и дросселя согласно их схемам замещения: последовательный и параллельный колебательный RLC-контур соответственно. На высоких частотах частотная характеристика элементов не имеет линейную зависимость. Для реального конденсатора комплексное сопротивление с ростом частоты достигает своего минимума, после чего сопротивление приобретает индуктивный характер и начинает расти с повышением частоты. Для катушки индуктивности ситуация обратная, на высоких частотах дроссель проявляет свои емкостные свойства. На высоких частотах у реальных элементов фильтра искажаются параметры элементов относительно номинального значения. Таким образом, на высоких частотах реальные параметры на выходе фильтра отличаются от желаемых.

Второй проблемой, при построении последовательных фильтров является неравномерное распределение нагруженности элементов при прохождении сигнала от источника к приемнику за счет наличия последовательных элементов и паразитных параметров линий связи. Это необходимо учитывать, так как все реальные элементы, а в особенности электролитические конденсаторы, имеют жесткие требования по режимам эксплуатации. С учетом того, что форма импульсов на входе фильтра не является синусоидальной, то проектирование надежного выходного фильтра источника питания перестает быть тривиальной задачей, допускающей применение стандартных методов расчета.

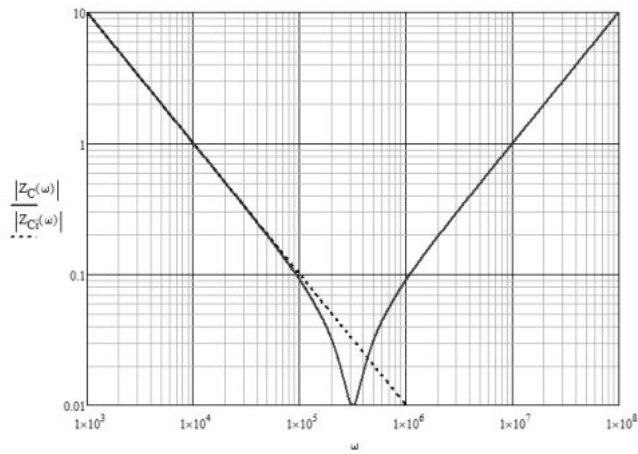


Рис. 1. Зависимость модуля комплексного сопротивления от частоты идеального и реального конденсатора

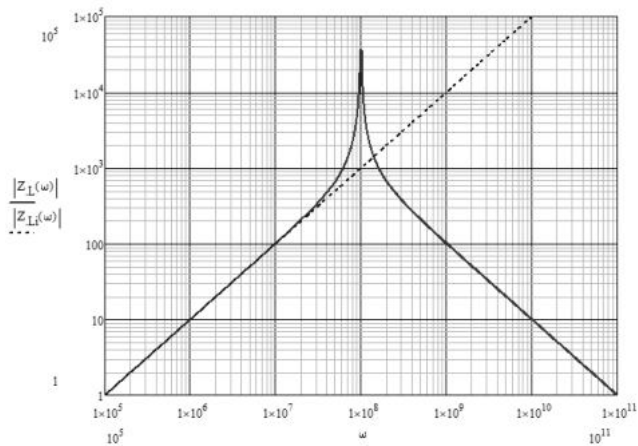


Рис. 2. Зависимость модуля комплексного сопротивления от частоты идеального и реального дросселя

Как правило, при разработке выходных фильтров используются системы автоматизированного проектирования. Однако, протекающие в цепях процессы можно описать с помощью математического аппарата, поэтому далее рассматривается аналитический метод определения рабочих режимов элементов выходного фильтра в составе однотактного обратного преобразователя на рисунке 3а через прямое преобразование Фурье. Анализируемая схема представлена на рисунке 3б.

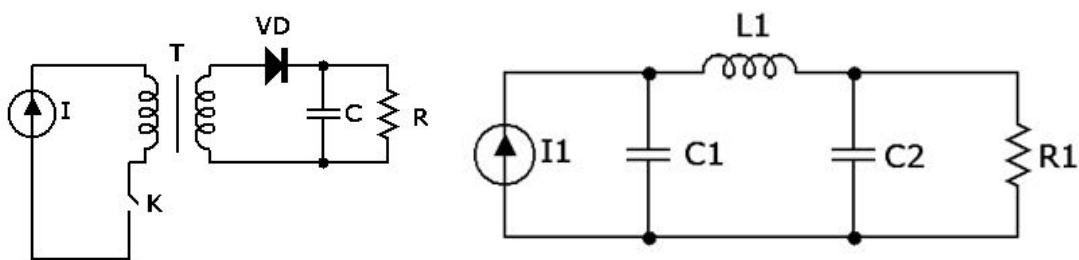


Рис. 3а. Схема обратного преобразователя, рис. 3б. Анализируемая схема CLC-фильтра

Как известно любой периодический сигнал может быть разложен в бесконечный ряд Фурье согласно формуле 1 на гармонические составляющие кратные основной. Коэффициенты функции Фурье a_0 , a_k и b_k находятся по формулам 2 – 4. Разложение в ряд Фурье и расчет коэффициентов рассматривается для параметров принципиальной электрической схемы фильтра на рисунке 4.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)) \quad (1)$$

$$a_k = \frac{2}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} J_1(t) \cos(kwt) dt \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} J_1(t) \sin(kwt) dt \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{2}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} J_1(t) dt \quad (4)$$

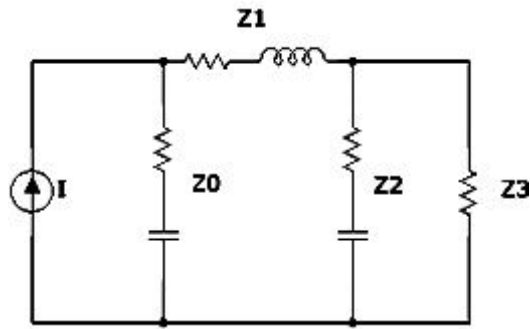


Рис. 4. Эквивалентная схема CLC-фильтра

Для исследования фильтра коэффициенты функции Фурье представлены в виде матриц, графики зависимости тока от времени на рисунке 5 и 6 рассчитаны для конденсаторов C_1 и C_2 , которым ставится в соответствии эквивалентное комплексное сопротивление Z_0 и Z_2 . Паразитной индуктивностью для конденсаторов C_1 и C_2 , а также паразитной емкостью для катушки индуктивности L_1 пренебрегаем. Расчеты проводились согласно формулам 5 – 12.

$$J_1(k) = a_k - j b_k \quad (5)$$

$$Z_0(k) = R_0 + \frac{1}{j\omega k C_0} \quad (6)$$

$$Z_1(k) = R_1 + j\omega k L_1 \quad (7)$$

$$Z_2(k) = R_2 + \frac{1}{j\omega k C_2} \quad (8)$$

$$A_1(k) = \begin{vmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ \frac{-Z_0(k)}{\Omega} & \frac{Z_1(k)}{\Omega} & \frac{Z_2(k)}{\Omega} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-Z_2(k)}{\Omega} & \frac{Z_3(k)}{\Omega} \end{vmatrix}$$

$$B_1(k) = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$I(k) = A_1(k)^{-1} B_1(k) \quad (9)$$

$$I_0(t) = \sum_{k=1}^N [Re(I(i)_0) \cos(k\omega t) - Im(I(i)_0) \sin(k\omega t)] \quad (10)$$

$$I_2(t) = \sum_{k=1}^N [Re(I(i)_2) \cos(k\omega t) - Im(I(i)_2) \sin(k\omega t)] \quad (11)$$

$$I_3(t) = \sum_{k=1}^N [Re(I(i)_3) \cos(k\omega t) - Im(I(i)_3) \sin(k\omega t)] \quad (12)$$

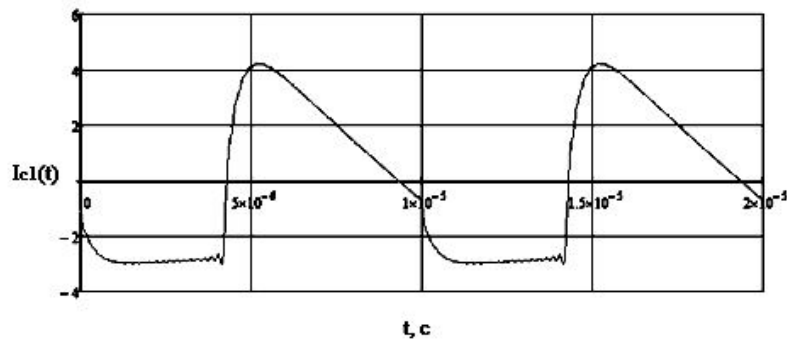


Рис. 5. График зависимости тока от времени на конденсаторе C_1

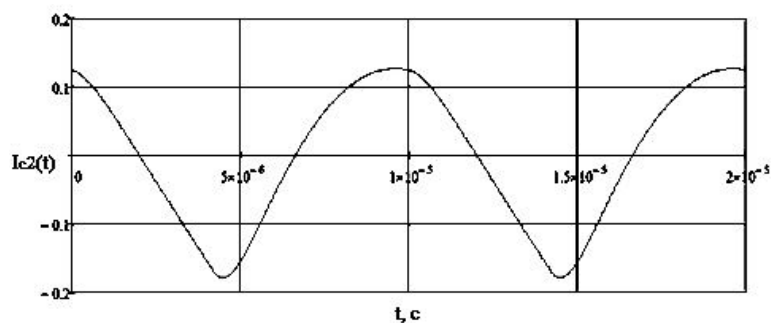


Рис. 6. График зависимости тока от времени на конденсаторе C_2

Исходя из графиков на первом конденсаторе уровень пульсаций тока составляет 4,219 А, что может значительно превышать допустимое значение, заложенное в технических условиях для элемента, на втором конденсаторе значение тока достигает 127 мА. Таким образом конденсатор на входе фильтрующей цепи перегружен и может выйти из строя. Рекомендуется использовать дополнительный конденсатор для шунтирования, который имеет достаточный запас прочности по электрическим характеристикам в соответствии с параметрами работы устройства.

Аналитический метод расчета может быть использован для выходных фильтров в составе различных устройств, т.к. позволяет в процессе разработки учесть не только величину пульсаций тока на выходе, но также и форму сигнала. Шунтирование электролитического конденсатора на входе фильтрующей цепи керамическим необходимо, чтобы предотвратить пробой компонента и необходимость изменения топологии схемы на этапах изготовления печатной платы устройства.

Библиографический список

1. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
2. Дмитриков, В.Ф. Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств / В.Ф. Дмитриков, В.В. Сергеев, И.Н. Самылин. – М.: Радио и связь, 2005. – 424 с.
3. Мэк, Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению / Р. Мэк. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 272 с.
4. Макашов, Д. Обратногоходовой преобразователь / Д. Макашов. Силовая электроника, 2006. – 46 с.

УДК 004.725.5

РЕАЛИЗАЦИЯ УДАЛЁННОГО МОНИТОРИНГА АКТИВНОГО СЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ ОТСЛЕЖИВАНИЯ СТАТУСОВ “ZABBIX” ПОСРЕДСТВОМ ПРОТОКОЛА SNMPV3

Д.А. Молошиников

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

Бесперебойное функционирование активного сетевого оборудования в современных организациях на сегодняшний день является залогом успешности компании в целом.

Уже сложно себе представить, чтобы взаимодействие сотрудников внутри организации происходило только лично, а документооборот был исключительно на бумажных носителях. Несколько лет назад большую популярность приобрела удалённая работа, при которой доступ к рабочей станции, физически расположенной в офисе, осуществляется с любого удалённого устройства с помощью настроенной виртуальной частной сети через Интернет. Крупные предприятия разграничивают сеть на сегменты, для каждого из сегментов настраиваются определённые виртуальные локальные сети, устанавливаются политики безопасности. Частой практикой является организация внутреннего почтового сервера, а также других серверов, для всевозможных для организации внутренних служб, к примеру, складского ПО [3].

Вся сетевая инфраструктура любого предприятия зависит от бесперебойной работы коммутаторов и маршрутизаторов в ЛВС. Ведь именно эти устройства обрабатывают весь трафик и осуществляют доставку от отправителя до получателя.

Чтобы исключить ситуацию, при которой вследствие внезапного отключения электричества, произойдёт отключение сетевого оборудования в серверном помещении, организовывается резервное питание при помощи специализированных устройств – источников бесперебойного питания (ИБП).

Современное активное оборудование имеет функционал мониторинга своего статуса и параметров. Это относится как к управляемым коммутаторам, маршрутизаторам, так и ИБП, имеющим сетевые интерфейсы.

Всё управление осуществляется по протоколу – Simple Network Management Protocol (SNMP). Данный стандартный протокол был определён Инженерным советом Интернета (IETF) и является частью стека TCP/IP, включает в себя набор стандартов для управления по сети. Работает по протоколу UDP на портах 161 и 162. Это значит, что соединение между сетевым устройством и системой управления не устанавливается и передача данных не гарантируется [2].

За своё существование протокол SNMP прошёл три итерации модернизации, а именно SNMPv1, SNMPv2 и SNMPv3 соответственно.

Наиболее быстрой и безопасной считается именно третья версия протокола. В ней была добавлена криптографическая защита одним из трех методов шифрования – AES, DES или 3DES.

- DES – алгоритм симметричного шифрования разработанный и утверждённый в 1977 году. Ключ имеет длину 56 бит. Алгоритм использует комбинацию нелинейных и линейных преобразований.
- 3DES – симметричный алгоритм, созданный в 1978 году на основе алгоритма DES с целью устранить главный его недостаток, а именно малую длину ключа. Алгоритм DES может быть взломан методом полного

перебора ключа. В простом виде 3DES, исходя из названия шифрует/расшифровывает данные с помощью трехкратного выполнения DES. Длина ключа составляет уже 168 бит (56*3).

- AES – симметричный алгоритм блочного шифрования. Разработан и утверждён в 2002 г. Сейчас данный алгоритм получил широкое распространение в связи с тем, что в сравнении с DES и 3DES имеет более сложный для расшифровки способ шифрования и динамическую длину ключа: 128, 192 или 256 бит.

В распоряжении имеется ЛВС состоящая из нескольких сегментов. Один сегмент построен на оборудовании компании Extreme Networks, а именно коммутаторах SUMMIT X440-G2-48P. Второй сегмент включает коммутаторы Cisco C2960S. Все коммутаторы подключены к устройствам бесперебойного питания APC Smart-UPS 750, имеющим возможность мониторинга по сети. На рисунке 1 представлена логическая топология сети.

Сетевые устройства настроены заранее для удалённого доступа через консоль по защищённому протоколу SSH (Secure Shell). В отличие от протокола Telnet, протокол SSH шифрует передаваемые данные, и они передаются по защищённому каналу. Telnet передаёт данные авторизации в открытом виде, и если злоумышленник перехватит трафик самым простым анализатором пакетов, он с лёгкостью узнает данные для авторизации. Telnet является стандартным протоколом стека TCP/IP, в свою очередь SSH представляет собой программу для входа на удаленное устройство по сети, для выполнения команд [4].

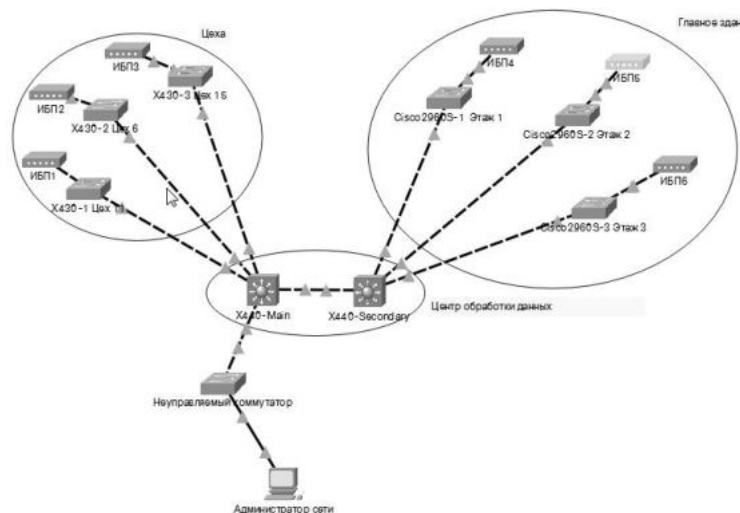


Рисунок 18 - Логическая топология сети

Работы по настройке будут производиться с рабочей станции сетевого администратора. Коммутаторы настраиваются через специализированный клиент Putty, ИБП – через web-интерфейс устройств.

Конфигурация SNMPv3 состоит из нескольких этапов:

Создание пользователя, группы и настройки доступа, а также включения протокола SNMPv3.

Пользователь должен быть создан, добавлен в группу, и этой группе должен быть предоставлен доступ.

1. Создание пользователя

```
configure snmpv3 add user <Имя пользователя> authentication <Метод аутенфикации> <Пароль для аутенфикации> priv <Метод шифрования> <Пароль шифрования>
```

- Имя пользователя — имя пользователя SNMPv3.
- Метод аутенфикации — MD5 или SHA (SHA1).
- Пароль для аутенфикации — пароль для аутентификации пользователя.
- Метод шифрования — AES (128 192 256), DES или 3DES.
- Пароль шифрования — пароль шифрования.

2. Создание группы, добавление пользователя в группу

```
configure snmpv3 add group <Имя группы> user <Имя пользователя> sec-model usm
```

- Привязывает ранее созданного пользователя к группе. Имя пользователя должны совпадать с аналогичным полем в первом этапе.
- Имя группы является произвольным и используется только локально, хотя оно должно совпадать с именем группы из команды доступа.

3. Настройка доступа

```
configure snmpv3 add access <Имя группы> sec-model usm sec-level priv read-view defaultAdminView write-view defaultAdminView notify-view defaultAdminView
```

- Предоставляет группе доступ для чтения/записи SNMP OID.
- read-view — разрешено чтение write-view — разрешена запись notify-view — позволяют использовать уведомления.

- При данной настройке defaultAdminView разрешает полный доступ к коммутатору

4. Включение доступа через snmp snmpv3

```
enable snmp access snmpv3
```

Настройка SNMPv3 на остальных коммутаторах X430 производится аналогичным образом.

Проверка настроенной конфигурации выполняется командой `sh conf "snmp"` (рисунок 2).

```
* X440-48t.34 # sh conf "snmp"
#
# Module snmpMaster configuration.
#
configure snmpv3 add user "ladmin1" engine-id 80:00:07:7c:03:00:04:96:98:61:fe authentication sha
auth-encrypted localized-key 6c:27:23:86:23:81:5a:30:23:a5:23:f3:23:ac:23:db:23:bf:23:9a:23:d5:23:
9a:34:71:51:2b:2a:23:02 privacy privacy-encrypted localized-key 4c:69:23:84:23:fd:23:f8:23:80:7d:2
3:ee:23:e1:23:f4:23:dd:4b:4c:23:b7:23:b2:6d:23:94:23:9a:7a:60
configure snmpv3 add group "v3group" user "ladmin1" sec-model usm
configure snmpv3 add access "v3group" sec-model usm sec-level priv read-view "defaultAdminView" wr
ite-view "defaultAdminView" notify-view "defaultAdminView"
* X440-48t.34 #
```

Рисунок 19 - Конфигурация коммутатора X430

Следующим шагом настроим SNMPv3 на коммутаторах Cisco.

Настройка состоит из 6 шагов:

1. Включение привилегированного режима EXEC
enable

2. Вход в режим глобальной конфигурации
configure terminal

3. Настройка группы

snmp-server group [Имя группы {v1 | v2c | v3 [auth | noauth | priv]]] [read read-view] [write write-view] [notify notify-view]

- v – версии протокола snmp
 - auth | noauth | priv – тип аутентификации.
 - Далее идут права на чтение, запись и уведомления
4. Создание пользователя и добавление его к группе.

snmp-server user user-name group-name {v1 | v2c | v3 [auth {md5 | sha} auth-password]} [priv {aes | des} 3des } priv-password]

Пример настройки коммутатора:

C2960S>enable

C2960S#configure terminal

C2960S(config)# snmp-server group v3group v3 priv

C2960S(config)# snmp-server user ladmin1 v3group v3 auth sha AuthP@ss priv des PrivP@ss

C2960S(config)# exit

Настройка SNMPv3 на остальных коммутаторах X430 производится аналогичным образом

Теперь необходимо произвести настройку источников бесперебойного питания, она выполняется следующим образом:

1. Зайдя на веб интерфейс необходимо перейти на вкладку

Administration > Network > SNMPv3 > Access

Затем установить галочку в пункте Enable SNMPv3 access.

2. Следующим шагом является настройка учётной записи для авторизации в системе мониторинга, для этого необходимо перейти на вкладку User profiles (рисунок 3):

- Administration > Network > SNMPv3 > User profiles

Требуется выбрать один из пустых профилей, настроить имя пользователя, пароль аутентификации, пароль шифрования, и выбрать один из протоколов аутентификации и шифрования соответственно.

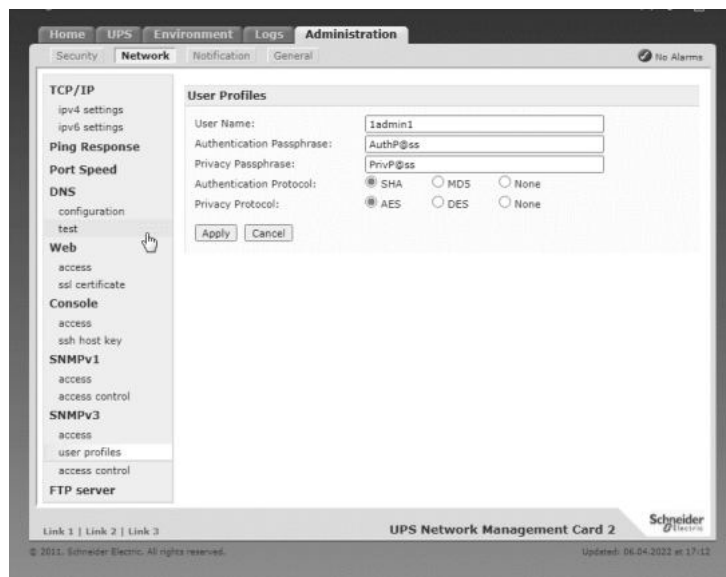


Рисунок 20 - Настройка учётной записи на ИБП APC

В результате произведенных манипуляций был настроен протокол SNMPv3 на всём активном оборудовании в ЛВС.

После настройки протокола на оборудовании следует организовать мониторинг с помощью системы отслеживания статусов "Zabbix".

Zabbix является ультимативной платформой для администраторов больших программно-аппаратных комплексов. Данный продукт приобрёл широкую популярность среди компаний и на текущий момент он

используется даже в сетях малого бизнеса. Несмотря на обширную представленную документацию, и огромную поддержку на форуме, Zabbix является настолько широко применимым продуктом с колоссальным количеством функций, что даже прожжённые профессионалы не могут утверждать на сто процентов, что знают платформу полностью, тем более что она имеет довольно прогрессивное развитие.

Впрочем, для организации мониторинга базовых параметров активного сетевого оборудования, будет достаточно, чтобы администратор обладал навыками использования любого дистрибутива на основе ядра Linux. Сообщество продукта довольно обширно и существует большое количество плагинов и шаблонов от сторонних разработчиков, многократно расширяющих возможности Zabbix'a.

Для обработки статистических данных, собранных в ходе мониторинга необходим Zabbix сервер, который расположен на одной виртуальной машине. Сервер собирает и хранит статистику и имеет интерфейс, где можно настроить отображение доступности устройств в реальном времени [1]. Вторым компонентом системы являются агенты. Под агентами понимаются любые активные сетевые устройства, мониторинг которых настроен на сервере. Агентами могут выступать как конечные, так и промежуточные устройства.

На сервере можно настраивать так называемые триггеры – действия на произошедшие события. К примеру в случае потери связи с устройством сервер может изменить цвет устройства, и отправить уведомление сетевому администратору, чтобы специалист оперативно отреагировал на возникшие неполадки.

Для настройки применяются специальные шаблоны где прописываются те параметры, которые сервер запрашивает у агентов, к примеру время безотказной работы, версия прошивки и т.д. Шаблон настроенный для коммутаторов x430 компании Extreme Networks представлен на рисунке 4 .

Узел	Интервал	История	Динамика ...	Тип	Последняя проверка	Последнее значение	Изменение
CPU (2 элемента данных)							
CPU Utilization	1m	1w	365d	SNMP агент	06.04.2022 16:43:00	12 %	-3 %
extremeCpuMonitorTotalUtilization							
CPU Utilization Threshold	10m	1w	365d	SNMP агент	06.04.2022 16:43:00	90 %	
extremeCpuMonitorThreshold							
General (6 элементов данных)							
Primary Software Revision	1d	1w		SNMP агент	06.04.2022 03:03:00	16.1.1.4 patch1-1	
extremePrimarySoftwareRev							
Secondary Software Revision	1d	1w		SNMP агент	06.04.2022 03:03:00	16.2.5.4	
extremeSecondarySoftwareRev							
sys_location	1d	1w		SNMP агент	06.04.2022 03:03:00	Order 74 OKB	
extreme_location							
sysName	1d	1w		SNMP агент	06.04.2022 03:03:00	2K3-4	
extreme_hostname							
System ID	1d	1w		SNMP агент	06.04.2022 03:03:00	800544-00-06 1511N-42739	
extremeSystemID							
Type	1d	1w		SNMP агент	06.04.2022 03:03:00	ExtremeXOS (X430-48) version 16...	
extreme_type							
ICMP (2 элемента данных)							
ICMP loss	5s	1w	365d	Простая проверка	06.04.2022 16:43:20	0 %	
icmploss							
ICMP ping	5s	1w	365d	Простая проверка	06.04.2022 16:43:20	Up (1)	
icmpping							
Temperature (1 элемент данных)							
Device Temperature	5m	1w	365d	SNMP агент	06.04.2022 16:43:00	18 °C	
extremeCurrentTemperature							

Рисунок 21- Шаблон настройки

Первым шагом в настройке узлов требуется добавить устройство в систему. Добавление производится через графу настроек. Сперва, в пункте макросы следует задать макросы, которые являются ключами к реальному значению элемента, чтобы в дальнейшем сетевому администратору было удобно устанавливать пароли по ключевому слову, не запоминая сам пароль, который указывается единократно, а также из соображений безопасности, так как пароль оказывается скрыт и заменён макросом. Окно настройки макросов представлено на рисунке 5.



Рисунок 22 – Макросы

Затем следует добавить непосредственно требуемые сетевые устройства. В отличие от настройки SNMPv3, добавление устройств происходит идентично, для всех рассматриваемых коммутаторов фирмы Extreme Networks, Cisco Systems, а также источников бесперебойного питания фирмы APC, необходимо только правильно указать название и IP адрес необходимого устройства. В качестве примера, на рисунке 6 изображена конфигурация коммутатора X430.

Узел сети Шаблоны IPMI Теги Макросы Инвентаризация Шифрование

* Имя узла сети: Extreme X430-12 Цеп

Видимое имя: k-2-1

* Группы: extreme-computers (нажмите печатать для просмотра) Выбрать

* Интерфейсы

Тип	IP адрес	DNS имя	Подключаться через	Порт	По умолчанию
SNMP	10.2.1.10		SNMPv3	DNS	161

* Версия SNMP: SNMPv3

Имя контакта: []

Имя безопасности: (\$SNMPV3LOGIN)

Уровень безопасности: AuthPriv

Протокол аутентификации: MD5 SHA

Пароль аутентификации: (\$SNMPV3AUTHPASS)

Протокол безопасности: DES AES

Ключевая фраза безопасности: (\$SNMPV3PRIVPASS)

Использовать массовые запросы

Добавить

Описание: []

Наблюдение через прокси: (без прокси)

Активировано:

Добавить Отмена

Рисунок 23 - Добавление устройства в систему

Финальным шагом является добавление устройств на динамически изменяющуюся карту (рисунок 7). Теперь у сетевого администратора существует возможность отслеживать показатели коммутаторов и ИБП в реальном времени, в одно движение подключаться к CLI (Command Line Interface) в один клик, а также оперативно получать информацию, при возникновении неполадок.

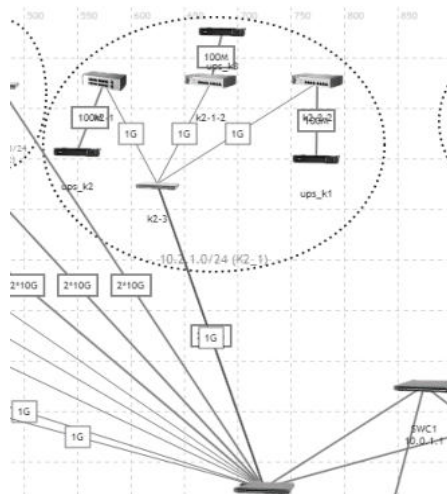


Рисунок 24 - Динамическая карта мониторинга

В результате была осуществлена настройка мониторинга коммутаторов двух производителей: Extreme Networks, Cisco Systems и Источников Бесперебойного Питания фирмы APC посредством протокола сетевого управления SNMPv3. Система Zabbix позволяет отслеживать отказоустойчивость в реальном времени с помощью интерактивной карты, а также собирать данные устройств согласно настроенным шаблонам.

Библиографический список

1. Андреа Д.В. Zabbix. Практическое руководство -М.: ДМК Пресс 2017. – 356с.
2. Захаров Г.П. Методы исследования сетей передачи данных. – М.: Радио и связь, 1982. – 208с.
3. Камалян А.К., Кулев С.А., Назаренко К.Н. Компьютерные сети и средства защиты информации: Учебное пособие. – Воронеж: ВГАУ, 2009. – 119с.
4. Новиков Ю.А., Кондратенко С.В. Локальные сети: архитектура, проектирование. – М.: изд-во ЭКОМ, 2001. – 312 с.

УДК 621.398

СИСТЕМА РАДИОСВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Кузнецов В.А.

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

В современном мире беспилотные летательные аппараты (БПЛА) прочно заняли свою нишу во многих отраслях деятельности человека, причем постоянно находятся новые сферы применения этих устройств, а усовершенствованные алгоритмы и технические характеристики расширяют объемы их использования. [4].

Вместе с этим можно сказать, что особенности их применения сформировали ряд неизменных на ближайшие десятилетия требований к БПЛА. В частности, к ним относится: снижение масса-габаритных показателей, увеличение времени, дальности и автономности полета, снижение стоимости и трудоемкости процесса производства.

Практически улучшения всех этих характеристик можно добиться применением энергоэффективной, помехозащищенной и устойчивой системы связи.

Чтобы все БПЛА могли безопасно летать (что на данном этапе часто становится ключевым фактором), должны быть установлены надежные каналы связи между БПЛА и землей. Одним из перспективных направлений в этом вопросе является применение существующей сети беспроводной связи различных стандартов.

Если говорить о последних достижениях в области использования БПЛА, то невозможно обойти стороной такие направления как: самоорганизующийся рой БПЛА, система полной интеграции пилота, самообучающиеся нейронные сети и пр. Но все эти перспективные разработки даже в обозримом будущем не решат проблему потери управления БПЛА, причин которой при использовании радиосвязи может быть очень много.

При использовании БПЛА в сфере обеспечения военной безопасности (например, в качестве ударного воздушного средства) потеря аппарата допустима только в случае выполнения боевой задачи (нанесения экономически целесообразного урона) и при этом не должно возникнуть угрозы безопасности для своих сил. Поэтому проектируя системы управления и связи для БПЛА в таких сферах применения нельзя обойтись без использования дублирующих каналов и систем, применения систем помехозащиты, направленных управляемых антенн, кодирования и шифрования информации. При этом использование этого перечня опирается в соображения экономической избыточности.

Управление БПЛА может осуществляться тремя основными способами [3]:

с помощью дистанционного управления, когда все решения принимает удаленный оператор;

дистанционное управление: с возможностью запуска и выполнения заданной автономии, в то же время допуская вмешательство человека при необходимости;

полное автономное управление: БПЛА могут принимать все необходимые решения без необходимости какого-либо вмешательства человека.

С одной стороны, БПЛА должны обмениваться важной информацией с различными организациями, такими как операторы, находящиеся поблизости самолеты и авиадиспетчеры, чтобы обеспечить безопасные, надежные и эффективные полеты. Этот тип связи известен как управляемая связь без полезной нагрузки (CNPC) [2]. С другой стороны, в зависимости от задачи может потребоваться своевременная передача и/или получение связанных с миссией данных, таких как аэрофотоснимки, высокоскоростное видео и пакеты данных для ретрансляции на/с различных наземных объектов, таких как операторы БПЛА, конечные пользователи или наземные шлюзы. Для этого используется связь с полезной нагрузкой. Конкретные требования к связи и спектру обычно различаются для CNPC и для передачи полезной нагрузки.

В зависимости от функций, выполняемых БПЛА, связь может быть организована двумя способами для повышения надежности. Как правило, на борту БПЛА размещаются как минимум две системы связи: дуплексная/полудуплексная аппаратура для передачи командно-телеметрической информации и симплексная система для передачи информации о полезной нагрузке. При этом, с одной стороны, увеличение каналов передачи данных повышает надежность и сопротивляемость линий связи, а с другой стороны, предоставляет потенциальному противнику больше возможностей для совершения атак.

Рассмотрим, в частности, особенности использования спутниковой связи для организации связи между наземным комплексом управления (НКУ) и БПЛА. Спутники могут использоваться для ретрансляции связи, если БПЛА и НКУ разнесены на значительные расстояния, например, если БПЛА находится над океаном или в удаленных районах, где отсутствует покрытие наземной сети. Кроме того, спутниковые сигналы также могут использоваться для навигации и локализации БПЛА. WRC 2015 одобрила условное использование спутниковых частот в Ku/Ka-диапазоне для подключения БПЛА к спутникам, а некоторые спутниковые компании, такие как Inmarsat, запустили услуги спутниковой связи для беспилотных летательных аппаратов [3].

Тем не менее, существует ряд проблем, возникающих при организации спутниковой связи между НКУ и БПЛА. Во-первых, потери и задержки сигнала очень значительны из-за больших расстояний между спутником и БПЛА/наземными станциями, которые находятся на малых высотах, что недопустимо для передачи данных управления и телеметрии. Во-вторых, беспилотные летательные аппараты обычно имеют строгие ограничения по размеру, весу и мощности и могут быть не в состоянии нести тяжелое, громоздкое и энергоемкое оборудование спутниковой связи. В-третьих, высокие эксплуатационные расходы на спутниковую связь также затрудняют ее широкое использование.

Таким образом в комплексах БПЛА, имеющих высокую стоимость, целесообразным является использование отдельных радиолиний связи для передачи командно-телеметрических данных и данных полезной нагрузки. При этом на первый план выходят вопросы электромагнитной совместимости приемопередающего оборудования, частотного разделения каналов связи и размещения антенно-фидерного оборудования на борту БПЛА.

Выбор рабочего частотного диапазона радиоканала связи обуславливается несколькими факторами:

- требованиями к массе, габаритам и потреблению приемопередающего устройства БПЛА;
- необходимой дальностью работы при заданной вероятности битовой ошибки;
- возможностью получения лицензии на работу в необходимом диапазоне или возможностью безлицензионной работы.

Для систем связи малых БПЛА решающими факторами при выборе частотного диапазона являются масса и габариты бортового приемопередатчика и антенно-фидерного устройства (АФУ). Целесообразным является выбор диапазона сверхвысоких частот (СВЧ), при этом удастся создать антенну малых размеров, способную разместиться в профиле крыла. Плотная компоновка оборудования внутри малого БПЛА не позволяет эффективно использовать приемопередатчики большой мощности с укороченными антеннами ультракоротковолнового диапазона (УКВ) вследствие проблем с электромагнитной совместимостью и большим влиянием окружающих объектов на характеристики антенны. Одним из подходящих частотных диапазонов является диапазон 2,4 ГГц. Безлицензионная работа в этом диапазоне разрешена только для внутриофисного оборудования [1], поэтому необходимо рассматривать варианты получения лицензии.

К системам связи БПЛА среднего и большого класса предъявляются более жесткие требования по дальности работы, помехозащищенности и вероятности битовой ошибки. В этом случае является возможным и оптимальным комплексирование нескольких каналов связи, работающих в разных частотных диапазонах (рисунок 1).

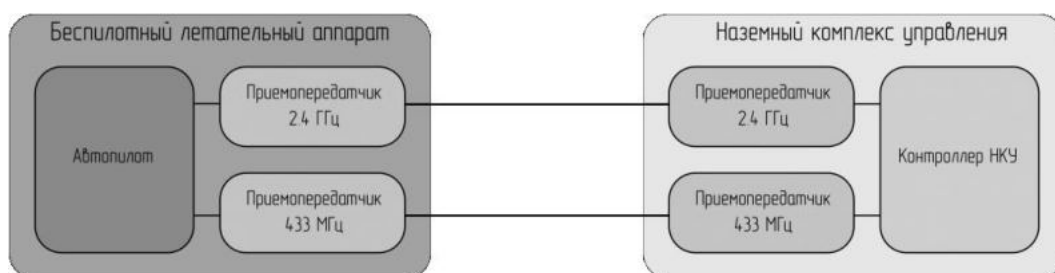


Рисунок 1 – Пример комплексирования радиоканалов связи

Как правило, максимальное расстояние для прямой радиосвязи между БПЛА гражданского назначения и НКУ на сегодняшний день составляет не более 100 км. Для командно-телеметрической связи на больших расстояниях возможно использование спутниковой связи. В этом случае поток данных ограничивается минимально необходимой информацией о состоянии БПЛА, интервал передачи которой может составлять, например, от 30 до 300 секунд.

Перспективным направлением в развитии систем связи с БПЛА является использование частотных диапазонов выше 5 ГГц. При этом становится возможной передача большого объема данных полезной нагрузки в режиме реального времени (например, это могут быть изображения с датчиков излучения различного диапазона длин волн). Факторами, резко ограничивающими радиус действия радиосистемы связи при использовании данных диапазонов, являются сильная зависимость условий распространения электромагнитных волн от погодных условий, необходимость прямой видимости и влияние многолучевости.

Для когерентного детектирования сигналов BPSK и QPSK необходимо применение схем восстановления несущего колебания в приемнике (схема с возведением сигнала в квадрат, петля Костаса и др.).

При этом возникает проблема решения фазовой неоднозначности восстанавливаемого несущего колебания, которая может быть решена несколькими способами:

- использованием фазоразностной манипуляции (ФРМ);
- введением уникальной последовательности бит перед блоком данных, дающей острый автокорреляционный пик при приеме сигнала;
- использованием методов канального кодирования.

Фазовая манипуляция в идеальных условиях имеет более высокую помехоустойчивость в сравнении с ФРМ (на ~1–3 дБ) [2]. Большое распространение систем с ФРМ объясняется их более простой реализацией, что на сегодняшний день не является принципиальным фактором.

Анализ канала связи подразумевает проведение расчетов полезной мощности сигнала и мощности шума в приемнике с учетом всех этапов передачи радиосигнала.

Переключение между различными видами модуляции позволит повысить спектральную эффективность системы связи. Наиболее эффективным решением является создание универсального квадратурного модулятора со следующими видами модуляции: BPSK, QPSK, QAM16, QAM32 и т.д.

Таким образом, современная система связи НКУ с БПЛА на уровне обработки сигнала должна быть реализована как программно-определяемая радиосистема, что позволяет в зависимости от условий прохождения сигнала на трассе БПЛА – НКУ адаптивно изменять виды модуляции, выходную мощность передатчика, виды канального кодирования сигнала, параметры расширения спектра сигнала, скорость передачи данных, соотношение времени передачи и приема для полудуплексных каналов связи, параметры шифрования передаваемых данных. По возможности необходимо использовать управляемые антенные решетки или направленные антенны с поворотным устройством на борту ЛА и два типа автоматически переключаемых антенн НКУ: остронаправленную на опорно-поворотном устройстве (или АР) и ненаправленную. Одной из актуальных задач на сегодня является создание сетевых систем связи с кодовым разделением, позволяющих передавать данные как между БПЛА и НКУ, так и транзитом через все доступные БПЛА. При этом для обеспечения устойчивой связи с удаленным БПЛА возможно использовать малые БПЛА в качестве ретрансляторов сигнала.

Библиографический список

1. Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Министерстве информационных технологий и связи Российской Федерации от 6 декабря 2004 г. № 04-03-04-003 Об использовании полосы радиочастот 2400–2483,5 МГц для внутрифирменных систем передачи данных.
2. Боев Н. М. Анализ радиолиний связи с беспилотными летательными аппаратами // ООО НПП «Автономные аэрокосмические системы – ГеоСервис» Институт инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.
3. Боев Н.М., Лебедев Ю.А. Управление энергетической эффективностью совмещенных каналов передачи данных единой системы связи // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. Вып. 1(47) / гл. ред. д.т.н. И.В. Ковалеву – Красноярск: СибГАУ. – 2016.
4. M. Marshall, R. K. Barnhart, S. B. Hottman, E. Shappee, M. T. Most, Introduction to unmanned aircraft systems. 1st edit. CRC Press. Boca Raton 2016, doi:10.1201/b11202

СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М. Д. Архипов

Московский авиационный институт

С помощью нейросетевых систем решаются следующие задачи: распознавание лиц (наличие маски, спектр эмоций), оплата по распознаванию лиц, контроль температуры тела и ношения СИЗ (медицинская маска, каска, перчатки и т.д.), контроль и учет перемещений пользователей по объекту, учет рабочего времени сотрудников, поведенческая видеоаналитика (выполнения Требований Безопасности), система машинного зрения для задач производства, соблюдения ТБ и т.д., охрана периметра (контроль зон, движения, ТС), индивидуальная видеоаналитика с использованием глубоких нейронных сетей, анализ данных с использованием глубоких нейронных сетей.

Рассмотрим модуль стерео-идентификации. Стерео-идентификация – это использование двух камер для распознавания. Преимущества использования: распознавание в четко очерченной зоне (точность до 5-10 см) без привязки к размеру (ширине) лица, распознавание одного человека с обеих камер (левой и правой), повышающее показатели качества и скорости распознавания системы, распознавание человека еще до подхода к турникету, генерация события происходит сразу же после входа в зону распознавания – практически мгновенное срабатывание системы. Две камеры можно использовать для распознавания на нескольких турникетах (например, двух или трех соседних).

Рассмотрим модуль оплаты по распознаванию лиц, оплата по распознаванию – позволяет интегрировать модуль распознавания лиц с платежной системой заказчика:

- 1) Распознавание/оплата в настраиваемой зоне (точность до 5-10 см) без привязки к размеру (ширине) лица
- 2) Защита от подлога (антиспуфинг)
- 3) Контроль от ошибок (несколько лиц в кадре, неполная видимость лица и т.д.)

В связи с распространением вируса SARS-CoV-2 и массового использования медицинских масок, закрывающих часть лица, в Face Recognition System встроены алгоритмы детектирования и распознавания людей в медицинских масках, что позволяет использовать программный продукт в условиях распространения вируса для успешного распознавания лиц, снижая ошибку не распознавания лица более чем в 100 раз по сравнению с другими решениями на рынке.

Технология распознавания лиц в масках заняла 10-ю строчку в результатах конкурса WebFace260M, состоявшегося в рамках международной конференции по компьютерному зрению ICCV-2021.



Рисунок 1. Распознавания лиц в масках.

Система определение наличия или отсутствия СИЗ:

- 1) Производит быструю оценку наличия/отсутствия медицинской маски на лице, не увеличивая время распознавания
- 2) Работает со всеми типами медицинских масок
- 3) Может производить накопительную оценку по треку лица – человек без маски всегда будет обнаружен
- 4) Наличие спущенной маски до верхних губ маски определяется как ее отсутствие
- 5) Работает с любыми типами перекрытий лица, не только медицинскими масками, но и другими элементами СИЗ

Рассмотрим модуль измерения температуры тела. Встроенный модуль ThermalFace предназначен для бесконтактного измерения температуры тела с одновременным распознаванием личности в медицинских масках. Для измерения температуры тела необходимо в существующую систему Face Recognition System добавить тепловизионный комплекс.

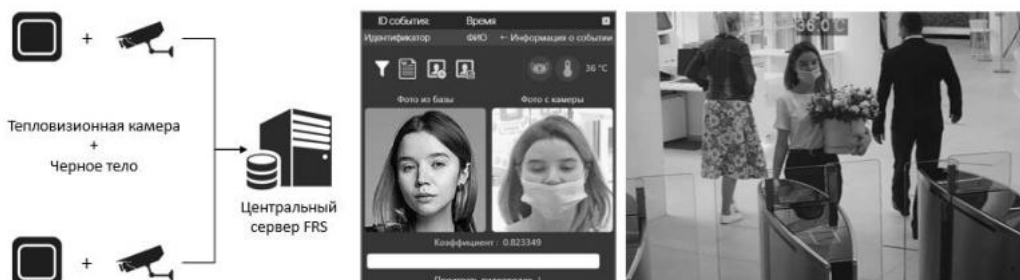


Рисунок 2. Модуль ThermalFace

Рассмотрим модуль антиспуфинга. Он предполагает определение спуфинга по обычному видеопотоку (последовательности 2D кадров). Для этого разработана система с различными моделями на детектирование попыток подлога фотографиями, мобильными устройствами с фото или видео. Работает на базе рекуррентных нейронных сетей – анализирует несколько последовательных кадров, а не один – существенное повышение вероятностей определения векторов атак.



Рисунок 3. Пример попытки подлога фотографиями

Модуль определения эмоций, пола и возраста распознает следующие типы эмоций: нейтральный, радость, грусть, удивление, отвращение, страх, гнев. Возможность создания «спектра эмоций» – статистики по всем кадрам видеопоследовательности (маршрута), на которой присутствует человек. Не требует никаких вычислительных затрат относительно базового распознавания.

Рассмотрим мониторинг перемещений людей на примере офисного здания. Программный комплекс позволяет осуществлять мониторинг нарушений разрешенной зоны для сотрудников и посетителей в автоматическом режиме с отображением на 2D и 3D макете здания, строить маршруты пользователей и определять их текущее положение. Позволяет оперативно выявлять нарушителей, а также формировать маршруты перемещений сотрудников или посетителей.

Построение маршрутов пользователей на примере торговой площадки включает в себя:

- 1) Добавление информации о покупках
- 2) Синхронизация списка покупок с Базой Данных
- 3) Добавление и уточнение маршрута пользователей



Рисунок 4. Пример мониторинга перемещений покупателя

Рассмотрим терминалы распознавания. Терминалы распознавания (Biosmart, SpooftPad, Elvees и др.) представляют собой законченный программно-аппаратный комплекс, разработанный с использованием 3D камер (Intel RealSense, Rockchip и др.) для построения геометрии лица и позволяющий в реальном времени проверить изображения человека на спуфинг, провести процедуру распознавания на борту устройства, проверить температуру или выслать фото в наилучшем ракурсе во внешнюю систему для прохождения верификации или идентификации. Обучено на многомиллионной базе спуфинга, содержащей многочисленные примеры по разным классам атак, и обеспечивает максимальный уровень защиты от спуфинга.

Мы рассмотрели основные модули системы распознавания лиц, которые решают широкий спектр задач.

Библиографический список

1. Антиспуфинг [Электронный ресурс]//URL: <https://habr.com/ru/company/speechpro/blog/436700/> (Дата обращения 25.03.2022)
2. Система биометрического проезда [Электронный ресурс]//URL: <https://habr.com/ru/news/t/584146/> (Дата обращения 26.03.2022)
3. Распознавание лица в маске [Электронный ресурс]//URL: <https://habr.com/ru/company/globalsign/blog/489928/> (Дата обращения 27.03.2022)

СОЗДАНИЕ ИГРОВОГО ПРИЛОЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМЫМИ СИГНАЛАМИ МОЗГОВОГО РИТМА

Лузан Р.Д.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В последние годы повышается интерес к разработкам интерфейса «мозг-компьютер» (ИМК), который обеспечивает взаимодействие человека с окружающим миром, минуя нервно-мышечные пути. В зарубежной литературе можно встретить синонимичное название мозго-машинные интерфейсы.

Развитие инвазивных и неинвазивных ИМК привело к созданию технологии, включающей множество разнообразных приборов, регистрирующих сигналы мозговой активности, а также программные средства для их обработки с конечной целью классификации состояний мозга или воображаемых команд, которые могут быть использованы для нейрореабилитации или нейроуправления. Системы нейрореабилитации на основе ИМК вселили надежду пациентам, страдающим двигательными нарушениями. Несколько исследовательских групп разработали технологии нейроуправления на основе ИМК, например, для управления инвалидными колясками, роботизированными руками, экзоскелетами и др.

Существует исследование в рамках аспирантской работы СПбПУ, основой которой является алгоритм подсчетов альфа и бета ритмов. Абстрактность математических результатов нуждается в визуализации через практическое применение. Один из подходов - применение этих результатов для управления игрой с ИМК.

Цель моего проекта - создание игры-тренажера для развития управления концентрацией и медитацией для практического применения результатов исследования динамики изменения альфа и бета ритмов.

В процессе работы были поставлены следующие задачи:

- Разработать игру «Лабиринт»;
- Создать графики для визуализации математических результатов обработки сигналов мозга;
- Создать связь между математическими результатами и игрой с ИМК, используя процент концентрации или медитации для управления;
- Протестировать возможность управления игрой с помощью ЭЭГ шлема.

Актуальность используемых средств разработки

Таблица 1

Unity 2D		GameMaker Studio 2	
Плюсы	Минусы	Плюсы	Минусы
быстрое и удобное прототипирование	Ограниченный встроенный инструментарий	интуитивно-понятный интерфейс	медленная работа движка из-за элементарного языка программирования
бесплатная версия для начинающих разработчиков и студентов	закрытый исходный код	обширная документация	после привыкания к GameMaker Studio могут возникнуть сложности при переходе на более продвинутые игровые движки
совместимость с любой платформой	нестабильность редактора и отладчика	наличие русификации	после привыкания к GameMaker Studio могут возникнуть сложности при переходе на более продвинутые игровые движки

В результате анализа технологий (таблица 1), для разработки проекта был выбран Unity 2D, по следующим критериям: Unity 2D предоставляет возможность бесплатной разработки, что невозможно в технологии GameMaker Studio 2. Минусы Unity 2D не несут в себе жёсткий ограничительный характер, в отличие от минусов GameMaker Studio 2. И, технически, возможность их нивелировать не представляется для нас сложной.

С точки зрения основ нейробиологии, нас интересовала следующая теория: в лобных долях при умственной нагрузке начинают преобладать сигналы с частотами в пределах 14-30 Гц — так называемый, «бета-ритм». В затылочных долях, где находится зрительная кора, при расслаблении - возникает высокоамплитудный «альфа-ритм» в частотах 8-14 Гц. В частности, при закрытии глаз, когда мозгу не нужно обрабатывать обильные визуальные данные, этот эффект наиболее легко достижим и наблюдаем.

С помощью альфа и бета ритмов мы сможем определить процент концентрации и медитации. «Медитация» и «концентрация» - нормированные мета-показатели (0-100%), позволяющие понять, насколько человек в данный момент расслаблен или умственно загружен, соответственно. Создана игра-лабиринт с управляемой стрелочкой. Задача игрока – добраться до цели. Особенность игры заключается в том, что при уровне концентрации больше 50% стрелочка двигается по направлению, а если уровень концентрации меньше 50%, то стрелочка крутится по своей оси, тем самым позволяет выбрать направление.

Для использования игры необходимо следующее оборудование:

- ЭЭГ шлем NEUROPLAY-8Cap;
- Персональный компьютер с операционной системой Windows 7+ и поддержкой беспроводного соединения Bluetooth;

Было проведено тестирование на нескольких студентах и сотрудниках колледжа и СПбПУ. По наблюдению, можно предположить, что контроль над концентрацией и медитацией можно повысить тренировками. Так, тестирование показало, что более опытные игроки проходят уровни быстрее. Из чего можно сделать вывод, что полученные с помощью игры навыки помогают повысить контроль над концентрацией в повседневной жизни и

скрупулёзной работе. При тренировке управления игры с помощью медитации (расслабления) можно научиться расслабляться волевым усилием.

В результате, можно сделать следующие выводы: нами разработана игра «Лабиринт» (Рисунок 1), которая представляет из себя случайно создаваемые уровни, размеры которых можно указать. Управление в игре реализовано с помощью одной кнопки и с помощью процента концентрации или медитации.



Рисунок 1

Была создана шкала для визуализации процента концентрации или медитации с динамическим обновлением в реальном времени (Рисунок 2).

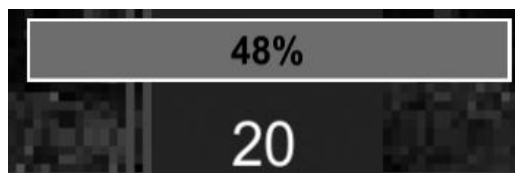


Рисунок 2

Была реализована связь между игрой и математическими результатами с помощью API приложения «NeuroPlayPro» и движка Unity.

Было произведено тестирование управления игрой с помощью ЭЭГ шлема. В тестировании участвовала аспирантка СПбПУ Журавская А (Рисунок 3).



Рисунок 3

В процессе разработки все поставленные задачи были выполнены в полном объеме. В дальнейшем планируется реализовать систему многопользовательского использования и сохранение результатов.

Научный руководитель – преподаватель Иванова Д.В.

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ ДАННЫХ ЛИДАРА И КАМЕРЫ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕЙ

Кучков А.В.

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Необходимость работы с трёхмерными данными зачастую возникает в задачах машинного зрения. Так, для определения пространственной составляющей сцены, т.е. восприятия окружающего пространства используются специальные сенсоры машинного зрения, такие как: лидары, радары, сонары (в ближней зоне), а также различного рода многокамерные конфигурации, дающие глубину посредством взаимных триангуляций. Каждый из представленных видов сенсоров обладает определёнными преимуществами и недостатками, ни один из них не является ультимативным решением. В данной статье идёт речь о взаимодействии двух сенсоров: лидаров – устройств, сканирующих пространство лазерным лучом по определённому паттерну, и камер – сенсоров с высокой плотностью заполнения данных и возможностью получения цветовой информации.

Основную трудность при работе с данными лидара составляет их трёхмерная природа – на них неприменимы большинство известных алгоритмов машинного зрения, используемых при обработке изображений. Наиболее значимыми проблемами являются:

- Трёхмерность данных – обработка сырых данных представляет собой довольно ресурсоёмкую задачу;
- Разнородный состав – кроме координат, в них также может присутствовать рефлексивность, кол-во отражений и иная информация о пришедшем сигнале;
- Разрежённость данных – ввиду механических и оптических ограничений невозможно заполнить все поле зрения.

Перед тем, как говорить о способах нахождения объектов на облаке точек необходимо дать некоторое представление о том, какими способами можно представить облако в памяти компьютера. Дело в том, что обработка сырого облака точек, для большинства задач, может представлять собой достаточно ресурсоёмкую операцию ввиду большого количества входных параметров.

Воксельное представление подразумевает разбиение исходного облака точек на ячейки, каждая из которых обладает определённым вектором параметров. Размер ячеек, как правило, задаётся динамически, т.к. различные объекты сцены обладают отличными друг от друга размерами.

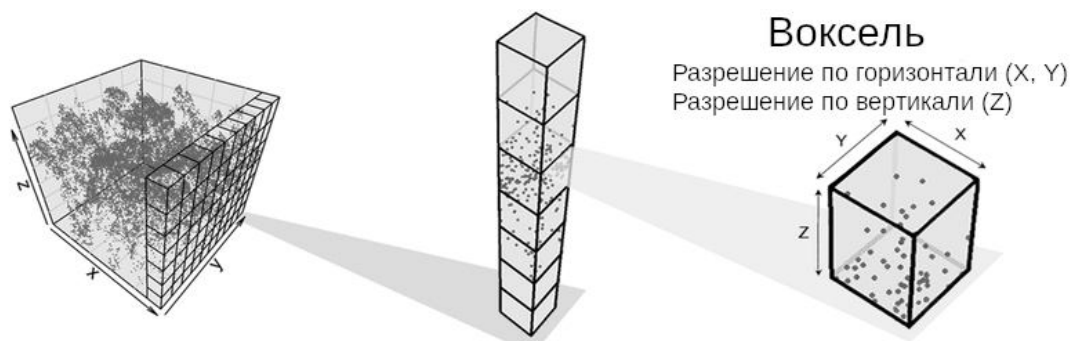


Рисунок 1 – Воксельное представление облака точек. Все пространство разбивается на воксели. Каждому вокселю присваивается вектор – список параметров: кол-во точек, плотность, плотность соседей и т.д

Преимущества:

- Достаточно точно представляет форму предмета, т.к. позволяет делить ячейки на видимые и перекрытые другими элементами;
- Воксельное представление является обобщением двумерных непрерывных данных (как в изображении) на трёхмерное пространство, что позволяет непосредственно применять на нем 3D CNN (трёхмерные сверточные нейронные сети).

Недостатки:

- Является трёхмерной структурой, а следовательно проигрывает в скорости работы CNN по сравнению с двумерным представлением;
- Требует первичного преобразования – вокселизации исходного облака точек, что также занимает определённое время и ресурсы.

Существует множество исследований на тему детектирования на вокселях, авторы которых предлагают следующие архитектурные решения: 3D ShapeNet[1], VoxNet[2], 3D-GAN[3] и др.

Представляет собой исходное облако точек без предварительной вокселизации, а также иных других видов предобработки, необходимых для преобразования облака точек. Замеченное не касается этапов фильтрации шумов, сегментации земной поверхности и т.д.

Преимущества:

- Представляет исходные данные, что позволяет составить более точную информацию о поверхностях объектов;
- Не требует предварительного преобразования в иной вид данных.

Недостатки:

- Непосредственная работа с сырым облаком точек имеет высокую вычислительную сложность, поэтому, зачастую, применяются Max-Pooling слои, которые усредняют информацию от групп точек, что приводит к некоторой потере пространственной информации;

- Из-за своих особенностей, а именно вычислительной сложности, данный подход по большей части применяется для классификации и сегментации точек. Локализация объектов непосредственно на облаке точек носит более сложный, с вычислительной точки зрения, характер.

Данный подход к представлению облака точек заключается в проецировании исходных данных на одну или несколько плоскостей.

Преимущества:

- Позволяет использовать известные 2D CNN непосредственно на полученных псевдоизображениях;
- Имеют высокую производительность при схожей с воксельным представлением точностью;
- С этим представлением легче создать алгоритм, реализующий как шаги детектирования, так и локализации с классификацией в одной модели, что также упрощает стадию обучения.

Недостатки:

- Имеется сильная зависимость итоговой точности модели от детализации исходных данных – наличия/отсутствия каналов интенсивности, цвета и т.д. Причиной этому служит то, что исходные данные представляются в виде изображения, каналами которого являются параметры точки;

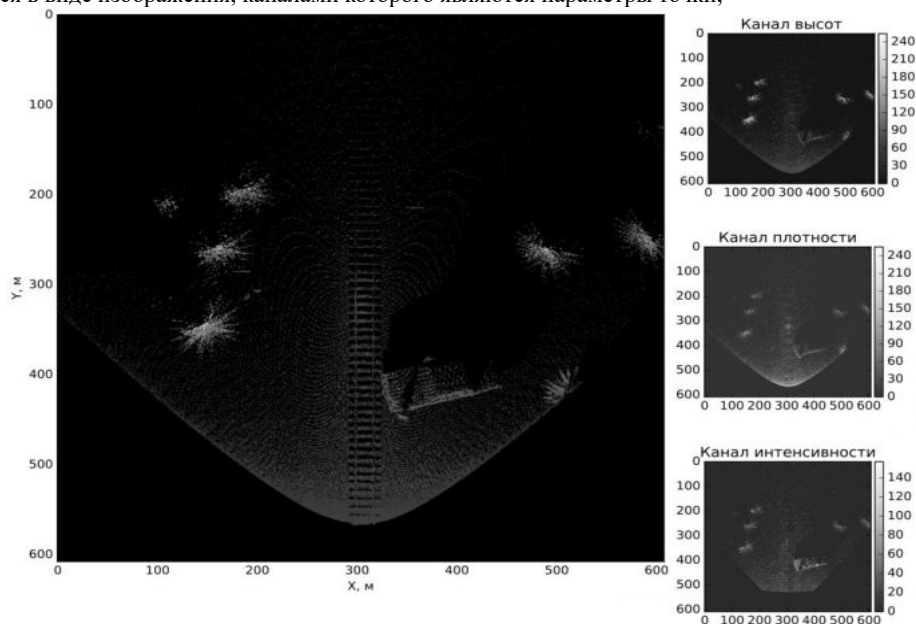


Рисунок 2: Представление облака точек в виде проекции на плоскость с каналами высот, плотности и интенсивности. Количество каналов может ограничиваться лишь пределом вычислительных способностей.

Т.к. данные представляют собой проекции, то стоит задача выбора их количества, которое может варьироваться от одной до нескольких десятков. Из этого следует необходимость решения задачи объединения результата вычислений на проекциях.

Представление в виде графа представляет собой неевклидовую структуру данных. Узлы графа являются точками из облака, а ребра – отношение между соседями. Преимущества:

- Графовое представление позволяет сохранить большинство геометрических связей между точками.

Недостатки:

- Возникает нетривиальная задача определения взаимосвязей с соседями;
- Также, существуют трудности с распределением параметров модели между слоями CNN.

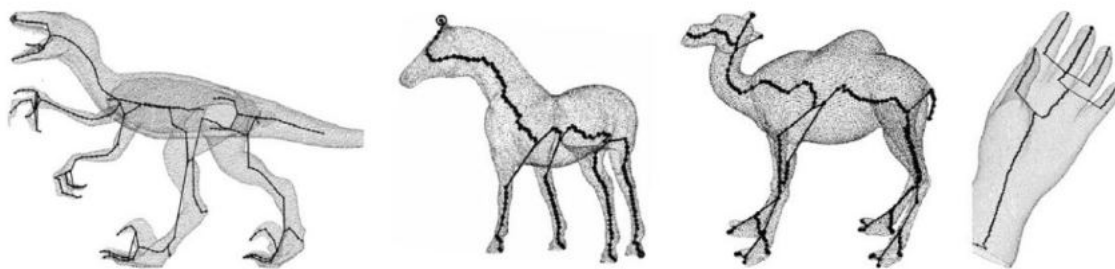


Рисунок 3: Облако точек с графом, вершины которого содержат параметры, характерные для местной группы точек [4]. Чем больше вершин, тем больше разрешение представления и близость к исходному облаку

В процессе детектирования каждому объекту на сцене присваивается определённый вектор параметров. Например, для камеры и для лидара они могут иметь следующий вид: (x, y, h, w, c) и (x, y, z, h, w, l, c) , где x, y, z – координаты объекта, h, w, l – его размеры, c – класс.

Выбор конкретного метода представления и алгоритма обработки уже зависит от конкретной поставленной задачи. Все способы комплексирования данных лидара и камеры можно условно подразделить на 3 типа: использование раннего, позднего и последовательного связываний данных.

Данные способы комплексирования отличаются своей природой: в раннем связывании комплексирование данных происходит до начала процесса обработки данных, в позднем – после. Кроме этого, конечно, могут иметь место также различные переходные формы, в которых связывание происходит на определённом этапе обработки. Основным преимуществом первого типа связывания является то обстоятельство, что в процессе обработки участвует вся информация о сцене, которая была получена от различных сенсоров. Сложность же состоит в том, что объединённые данные плохо поддаются работы над ними. Рассмотрим отдельно каждый из типов и приведём конкретные примеры реализации. Также, здесь и далее используется предположение о том, что все сенсоры откалиброваны друг относительно друга.

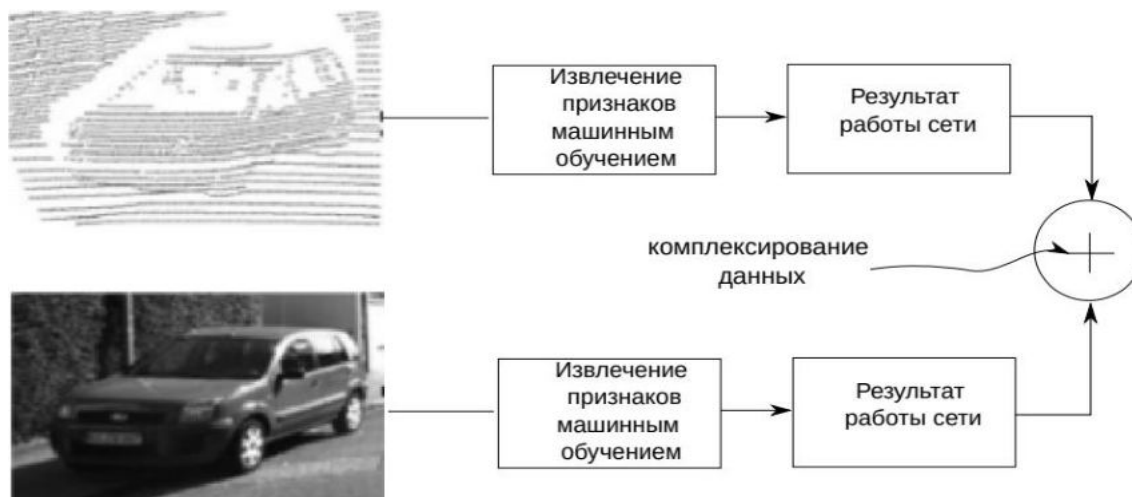


Рисунок 4: Позднее связывание данных сенсоров

Как пример можно привести полностью параллельную обработку облака точек и изображения с камеры. На рисунке 5 приведены источники данных. Для поиска объектов на изображении может применяться любая нейросеть для обычных изображений: YOLO 3/4/5, SSD, R-CNN, Fast/Faster-R-CNN и т.д. На облаке точек с лидара не происходит практически никакого поиска объектов, вместо этого на изображении объекты проецируются точки и отсекаются те, которые не попали ни на один из найденных объектов. Данные о типе объекта впоследствии дополняются найденным до него расстоянием (положением в пространстве).

Эта методика используется в работе [5]. Проецирование лидара на изображение камеры позволяет определить расстояние до отдельных частей объектов внутри обнаруженных ранее с помощью 2D CNN частей.

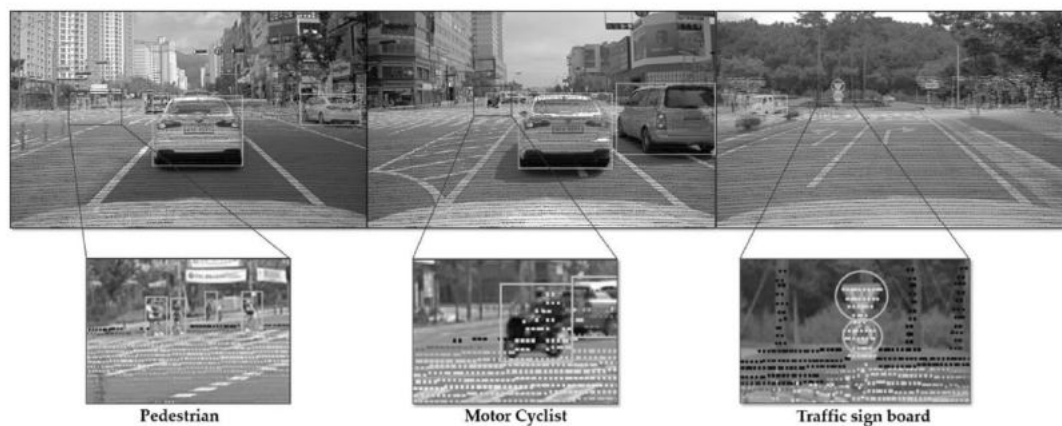


Рисунок 5: Проекция облака точек на изображение с камеры для получения информации о глубине

Приведённый выше пример позднего связывания является наиболее простым, но он подвержен серьёзному недостатку: вся задача по нахождению объектов накладывается на один сенсор – камеру, что сводит на нет все преимущества лидара и из-за этого он мало где применим.

Другая стратегия, вернее набор стратегий состоит в более разумном подходе. Также происходит параллельная обработка, но в этот раз на поиск объектов происходит как на изображении, так и на облаке точек. Для поиска объектов на облаке точек могут применяться методы: VoxelNet[6], ComplexYolo[7], VoteNet[8]. Наиболее интересная часть происходит на этапе комплексирования. Т.к. имеются несколько, возможно даже конфликтующих между собой, результатов детектирования одного и того же объекта, то необходимо применять различные стратегии для выбора наиболее подходящих значений. Среди методов объединения результатов нескольких параллельно вычисленных моделей нейросетей, можно выделить несколько наиболее интересных.

Пусть L_i – векторы параметров от i -ой модели нейросети для i -го сенсора. В таком случае могут применяться следующие техники:

- Метод средних: $L = L_{mean} = \sum_{i=0}^N L_i$,
- Метод максимума и минимума: $L = L_{max} = \max\{L_i\}, L = L_{min} = \min\{L_i\}$
- Метод перемножения вероятностей: $L = \frac{\prod_{i=1}^N L_i}{\prod_{i=1}^N L_i + \prod_{i=1}^N (1-L_i)}$
- Использование SVM (Support Vector Machine) или иного подхода, основанного на применении отдельной нейронной сети для определения типа выходного результата – метод, требующий обучения на выходных данных моделей L_i .

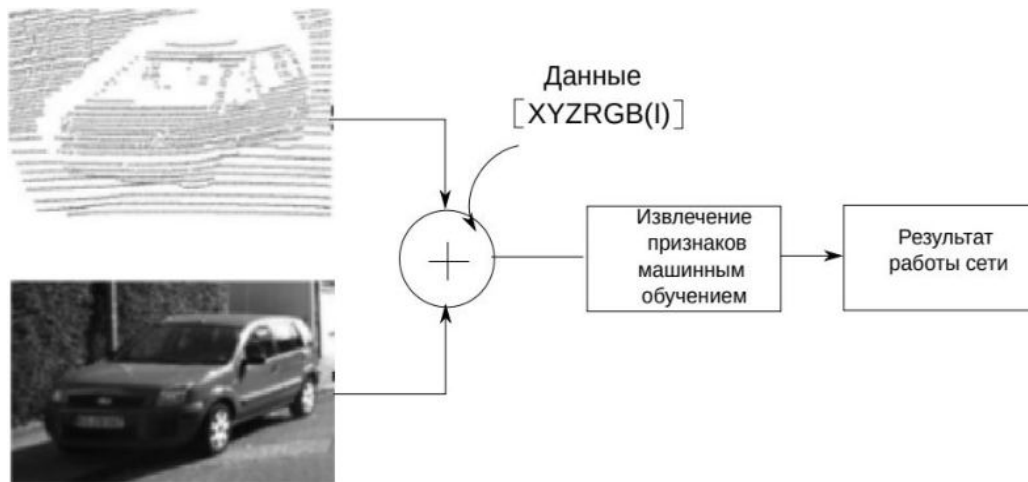


Рисунок 6: Раннее связывание данных сенсоров

В раннем связывании основной и наиболее трудоёмкой задачей является определение необходимых параметров с каждого сенсора для связывания с данными другого сенсора, что, зачастую, может представлять определённую сложность ввиду разной природы устройств. Такая проблема, в частности, возникает и при комплексировании лидара и камеры. В качестве примера разберём архитектуру PointPillar энкодера с дополненными данными с камеры[9]. Данная архитектура основана на PointNet и использует проекцию облака точек на плоскость (BEV), в каналах которого записана информация об исходном облаке точек. Вся модель можно разделить на три части: Pillar Feature Net, 2D CNN и SSD – детектор.

Первая часть сети отвечает за составление 2D изображения облака точек с определенным заранее заданным разрешением. Каждый пиксель спроецированного облака точек проходит через PointNet для определения его вектора параметров. Вектор параметров пикселя представляет собой, с учётом данных с камеры:

$l = [x, y, z, r, X_c, Y_c, Z_c, X_p, Y_p, R, G, B]$, где x, y, z – координаты точки, r – рефлективность, X_c, Y_c, Z_c – смещения от средних значений по изображению для каждой точки, X_p, Y_p – смещение относительно центра столбца (по вертикали), R, G, B – цвета с изображения.

Полученное таким путём псевдоизображение поступает на вход 2D CNN слоёв, в которой оно проходит параллельно через слои различного разрешения, которые затем объединяют результаты для последующей работы SSD – детектора. Из-за отсутствия непосредственной работы с трёхмерными данными в слоях модели, скорость работы вполне укладывается в рамки реального времени: 16 мс.

Основная задача 2D CNN слоёв состоит в определении признаков в нескольких разрешениях: $H/2, H/4$ и $H/8$, где H – высота изображения на выходе из PFN – слоя.

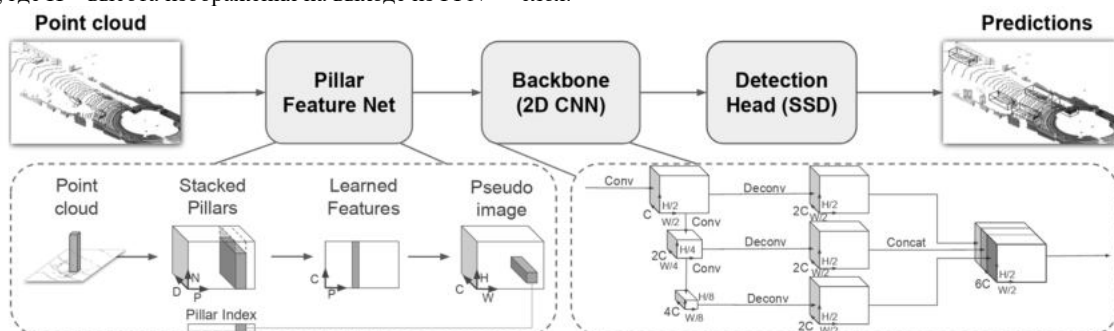


Рисунок 7: Архитектура сети PointpillarNet.

Результаты тестов данной архитектуры на KITTI (AP на автомобилях): Easy=92.85, Moderate=86.09, Hard=83.22.

Иногда, когда плотность облака точек лидара настолько мала, что на нем невозможно производить детектирование на прямую, прибегают к подходу последовательной обработки[10]. В этом случае все процедуры поиска объектов производятся на изображении с камеры (2D координаты и ширина с высотой), а данные с лидара служат для определения формы предмета в найденном двумерным ограничивающем объёме. Для этого в прямоугольном поле зрения лидара, ограниченного найденным боксом с помощью PointNet производится сегментация точек в данном объёме. Главным недостатком подобного подхода является накопление ошибок на разных этапах. Преимущество же – разделение сложной задачи на относительно простые этапы.

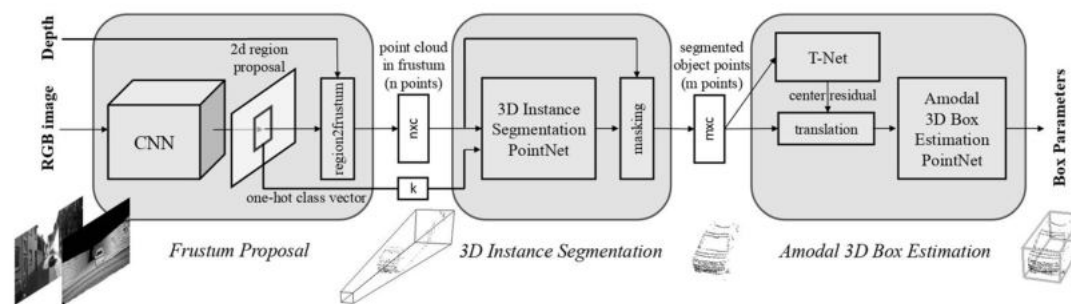


Рисунок 8: Архитектура сети PointPillarNet.

Последний этап, также использующий PointNet, отвечает за локализацию объекта в трёхмерном пространстве в найденном ранее ограничивающем объёме. Ввиду наличия трёх отдельных этапов обработки, функция ошибок примет следующий вид:

$L = L_{seg} + \lambda(L_{c1-reg} + L_{c2-reg} + L_{h-cls} + L_{h-reg} + L_{s-cls} + L_{s-reg} + \gamma L_{corner})$, где L_{seg} – ошибка этапа сегментации, L_{c1-reg} и L_{c2-reg} – ошибки определения координат x, y, z , L_{h-cls} и L_{h-reg} – ошибки определения угла поворота объекта, L_{h-cls} и L_{s-reg} – ошибка определения размера объекта L_{corner} – общая ошибка определения сторон объекта. Результаты тестов данной архитектуры на KITTI в AP (Average Precision – средняя точность) на автомобилях: Easy=83.76, Moderate=70.92, Hard=63.65.

При мультисенсорном восприятии (при количестве сенсоров более 3) практически невозможно построить архитектуру нейросети для однопроходной совместной обработки всех данных. Однако возможно объединить некоторые этапы, как, как примеру, сделано в [9]. Выбор реализации также будет существенно зависеть от решаемой задачи: не везде требуется точная сегментация облака точек или же возможность работы в реальном времени. Для задач, где требуется наиболее полное восприятие, на нескольких диапазонах дистанций, неминуемо использование мультисенсорного подхода.

Библиографический список

1. Wu Z. et al. 3d shapenets: A deep representation for volumetric shapes //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2015. – С. 1912-1920.
2. Maturana D., Scherer S. Voxnet: A 3d convolutional neural network for real-time object recognition //2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2015. – С. 922-928.
3. Chan, Eric R. and Lin, Connor Z и др.: Efficient Geometry-aware 3D Generative Adversarial Networks // Stanford University. – 2021.
4. Natali M. et al. Graph-based representations of point clouds//Graphical Models.–2011.–Т. 73. – №. 5. –С. 151 164.
5. Kumar G. A. et al. LiDAR and camera fusion approach for object distance estimation in self-driving vehicles //Symmetry. – 2020. – Т. 12. – №. 2. – С. 324.
6. Zhou Y., Tuzel O. Voxelnet: End-to-end learning for point cloud based 3d object detection //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2018. – С. 4490-4499.
7. Martin S. et al. Complex-yolo: real-time 3d object detection on point clouds //Computer vision and pattern recognition. – 2018.
8. Qi C. R. et al. Deep hough voting for 3d object detection in point clouds //proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2019. – С. 9277-9286.
9. Darshan Bhanushali, Robert Relyea, Karan Manghi, Abhishek Vashist, Clark Hochgraf, Amlan Ganguly, Andres Kwasinski, Michael E. Kuhl, Raymond Ptucha, "LiDAR-Camera Fusion for 3D Object Detection" in Proc. IS&T Int'l. Symp. on Electronic Imaging: Autonomous Vehicles and Machines. – 2020 – С 257-1 — 257-9.
10. Qi C. R. et al. Frustum pointnets for 3d object detection from rgb-d data //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2018. – С. 918-927.

УДК 004.9, 912.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ СЛУЖБ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТОВ

А. К. Абдулхаликова, Н. К. Арутюнова

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

В современном мире интернет является важнейшим средством доступа к информации в любой области человеческой деятельности. Увеличение количества информационных систем, вкупе с изменением мировоззрения людей, приводит к глобальным изменениям во всех сферах деятельности, в том числе и в туристической отрасли. Согласно всероссийскому опросу НАФИ, на данный момент интернет является основным средством выбора места отдыха (61% опрошенных выбрали данный вариант поиска) и именно с помощью информационных ресурсов люди определяют список мест, которые планируют посетить (78%) [1].

Мобильность, удобство и полнота получения информации через интернет-ресурсы позволяют полностью спланировать предстоящее путешествие заранее и избежать проблем выбора на месте. Однако построение маршрутов по городу применяется не только в туристической области, но и в повседневной жизни. Множество картографических сервисов с построением маршрутов из заданных точек, базой данных городских объектов и дорог позволяют без труда ориентироваться в любой местности, в том числе и в незнакомой. Они прокладывают не просто маршрут, а кратчайший путь между заданными пунктами, учитывая все способы передвижения и местность, применимую для соответствующего способа.

Наиболее известными поисково-информационными картографическими службами построения маршрутов на данный момент являются: Яндекс Карты, 2GIS и их зарубежный аналог Google Maps. Согласно данным общедоступных статистических сервисов Google.Analytics и Яндекс.Radar за март 2019 года по России, аудитория

Яндекс Карт составляет более 60 млн. человек, Google Карт – более 35 млн., 2GIS – более 21 млн. [2]. Все три сервиса предоставляют возможность построения маршрута из начальной точки в конечную, с добавлением дополнительных точек.

Построение маршрутов у Google Maps и 2GIS осуществляется только в строгой последовательности, а изменение порядка следования точек возможно только при самостоятельной перестановке пунктов пути вручную. Автоматическое построение кратчайшего пути, проходящего через несколько пунктов, без задания пользователем строгой их последовательности становится невозможным. Это является одним из главных недостатков данных служб при выборе пользователем туристического маршрута обхода нескольких достопримечательностей, когда последовательность обхода пунктов не существенна.

Также недостатком данных сервисов можно назвать существенное ограничение допустимого количества промежуточных точек маршрута – не более 10 для 2GIS [3], не более 9 – для Google Maps [4] и не более 8 – для Яндекс Карт [5].

Сервис Яндекс Карт также как Google Maps и 2GIS получает строгую последовательность точек, однако в отличие от них, у Яндекс Карт есть возможность оптимизировать маршрут, минимизируя время и расстояние в пути, между промежуточными пунктами, не изменяя начальную точку [5]. Эта опция возможна при построении маршрута по 4 и более точкам. Однако данная функция не всегда работает корректно (см. рис.1).



Рис. 1. Пример маршрутов, построенных с помощью ЯндексКарт: «Татарский государственный академический театр оперы и балета имени Мусы Джалиля – Ленинский сад» с обходом трёх промежуточных пунктов

Менее известными средствами с возможностью построения маршрута являются: Maps.Me, с аудиторией, насчитывающей около 1,69 млн. человек [2], и Логист, имеющий не более 50 тыс. посещений в месяц [6].

Maps.Me – это мобильное приложение офлайн-карт всего мира, использующее свободный некоммерческий веб-географический проект OpenStreetMap. Построение маршрута между двумя точками осуществляется также с точки зрения кратчайшего пути, допускается добавление дополнительных точек. Главным достоинством данного сервиса является возможность использования основного функционала без постоянного подключения к сети Интернет: после загрузки карт интересующих регионов можно пользоваться ими офлайн – служба построения маршрута работает локально на устройстве. Следующим преимуществом приложения является наличие в загруженных картах базы данных объектов, поиск по которой также не требует подключения к сети Интернет. Недостатком данного приложения так же, как и предыдущих сервисов, является отсутствие встроенного средства оптимизации путей обхода, которое бы выполняло перебор различных порядков следования пунктов пути – маршрут строится по строго заданной пользователем последовательности пунктов.

Русскоязычный сервис Логист рассчитан на решение задач логистики. После задания начальной и конечной точек пути, и, возможно, некоторых промежуточных точек, данный сервис строит оптимальный маршрут с точки зрения временных затрат. Главными недостатками этого сервиса является доступность только таких средств передвижения, как автомобиль и вертолет, а также невозможность оптимизации порядка следования пунктов маршрута.

При сравнении всех представленных картографических служб относительно детализации карт можно отметить, что Google Maps, Яндекс Карты и Maps.Me обладают картами всех стран мира. При этом у Google Maps наблюдается слабая детализация стран СНГ, что выражается в наличии ошибок в расположении дорог и объектов, в особенности небольших населенных пунктов и вне мегаполисов, однако, это не распространяется на города вне стран СНГ. Яндекс Карты напротив, как отечественный продукт, предоставляет наиболее точные данные именно для стран СНГ,

уделяя меньшее внимание детализации зарубежных стран. Приложение Maps.Ме, использующее открытые карты OpenStreetMap, редактируемые всеми участниками сообщества, имеет очень детализированные и точные карты даже самых труднодоступных мест. Туристические тропинки лесов, парков, полей прорисованы на картах Maps.Ме точнее, чем на любой карте других сервисов. Вследствие чего это приложение удобнее использовать в первую очередь для построения пеших спортивно-туристических маршрутов.

Сервис 2GIS обладает картами городов таких стран, как России, Казахстана, Италии, Чехии, Чили, ОАЭ, Саудовской Аравии, Омана, Киргизии, Украины, Узбекистана, Азербайджана и Кипра [7] с высокой степенью детализации. Рассматривая менее известный сервис Логист, можно отметить, что детализация его городов очень слабая и этот сервис следует использовать в основном для построения транспортных маршрутов между городами и странами, а не внутри городов.

Сравнительный анализ интерфейсов рассматриваемых сервисов представлен в таблице 1. Наиболее узким набором средств обладает интерфейс сайта Логист. Интерфейсы остальных сайтов предоставляют примерно одинаковый объем возможностей, но при этом обладают собственными уникальными средствами, так, например, слой высот присутствует только у приложения Maps.Ме, а интерактивная карта движущегося в реальном времени транспорта – только у Яндекс Карт.

Таблица 1. Сравнение интерфейсов картографических сервисов

	Яндекс Карты	Google Maps	2GIS	Maps.Ме	Логист
Средство масштабирования	+	+	+	+	+
Линейка	+	–	+	–	+
Средство определения местоположения пользователя	+	+	+	+	–
Режим просмотра улиц (панорама)	+	+	–	–	–
3D карта	+	–	+	–	–
Слой карт	Спутник Гибрид Дорожная ситуация Движущийся транспорт Парковки	Спутник Рельеф Пробки Транспорт	Парковки Пробки Метро Плотность ДТП	Высоты Метро	Спутник Гибрид Пробки

Проанализировав и сравнив наиболее известные картографические средства построения маршрутов, можем заключить, что наиболее практически удобными и обладающими необходимой точностью для использования на территории стран СНГ являются сервисы Яндекс Карт и 2GIS, для применения вне территории СНГ – сервис Google Maps. Оффлайн-приложение Maps.Ме является наиболее подходящим для спортивно-туристических прогулок. При этом при планировании сложных перемещений без задания строгой последовательности обхода пунктов только Яндекс Карты обладают опцией оптимизации пути. В связи с этим, можем выделить практически необходимую и актуальную задачу разработки механизма поиска оптимального варианта обхода заданных точек.

Библиографический список

1. Большинство россиян используют интернет для самостоятельной организации путешествий по стране. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://nafi.ru/analytics/bolshinstvo-rossiyan-ispolzuyut-internet-dlya-samostoyatelnoy-organizatsii-puteshestviy-po-strane/>
2. Что такое картографические сервисы и кто аудитория? [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://teletype.in/@geolid/SygmDU3c4>
3. Как построить маршрут через несколько точек. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://help.2gis.ru/question/kak-postroit-marshrut-cherez-neskolko-tochek>
4. Как проложить и посмотреть маршрут. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://support.google.com/maps/answer/144339?hl=ru&co=GENIE.Platform%3DDesktop>
5. Построение маршрута. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: https://yandex.ru/support/maps/concept/rout.html#change_point
6. Аналитика трафика и доля рынка logist.poncy.ru. | Similarweb [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://www.similarweb.com/ru/website/logist.poncy.ru/#overview>
7. Контент-продукты. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://content.2gis.ru/>

УДК 661.961.62

СРАВНЕНИЕ УКРЕПЛЕНИЙ ПАТРУБКОВ В СОСУДАХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Белов Д.С.¹, Мальков А.Э.¹, Лазарева И. А.²

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В рамках данной работы были произведены сравнительные расчеты укреплений отверстий в цилиндрической обечайке, под патрубки. Условия укреплений соответствуют ГОСТ 34233.3-2017. «Межгосударственный стандарт. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.»

В обечайках и днищах химических аппаратов часто требуется наличие разного рода отверстий: для штуцеров, вводов труб, люков, лазов и т.п. Такие отверстия могут быть неукрепленными и укрепленными. Неукрепленными

считаются отверстия под развальцовку труб, под резьбу, а также отверстия, уплотняемые любыми затворами, под патрубки, штуцера и др.

Укрепление отверстий обычно осуществляется втулками, накладками и бобышками. Основные размеры укрепляющих элементов, определяются исходя из условий равенства сечения материала укрепляемой стенки, номинальной расчетной толщины, удаляемого при образовании отверстия, сечению добавляемых укрепляющих элементов, изготовленных из тех же материалов, что и укрепляемые стенки.

Трехмерная модель сосуда, рассчитывалась в смоделированных условиях испытания, используя два вида укрепления отверстий под патрубки, а именно втулочное и накладное. Целью расчетов было определение наиболее оптимального варианта укрепления, а также выявление слабых и опасных мест конструкции. Расчет производится для сосуда под внутренним давлением 7.35 МПа.

Была разработана численная 3D-модель сосуда в двух вариантах (укрепление кольцом и утолщением), представленная на рисунке 1 и рисунке 2 соответственно.

Для построения модели, верификации конечно-элементной модели конструкции и проведения расчетов использовались следующие данные:

- материал корпуса Сталь 09Г2С
- материал патрубков Сталь 15ХМ
- внутренний диаметр обечайки 4112 мм
- толщина стенки 74 мм

Таблица свойств материалов:

Таблица 1 – свойства материалов

	Сортамент	Бт, МПа	Бв, МПа	μ
Сталь 09Г2С	лист	280	440	0,3
Сталь 15ХМ	труба	225	430	0,3

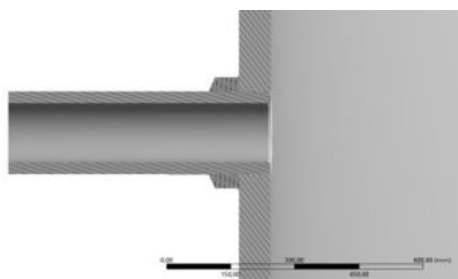


Рисунок 1 - геометрия (кольцо)

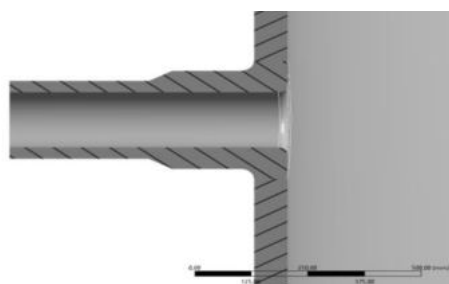


Рисунок 2 - геометрия

Затем были созданы конечно-элементные модели (рисунок 3 и рисунок 4). Тип конечного элемента Hex20. Размер элемента 20мм.

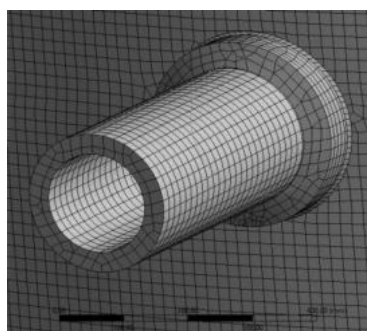


Рисунок 3 - КЭ (кольцо)

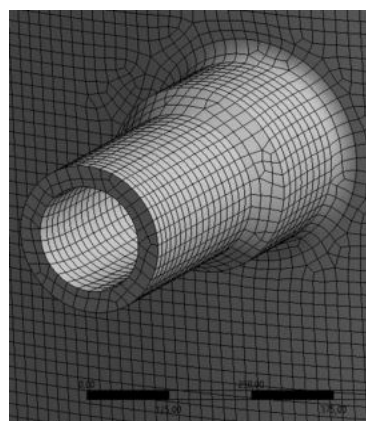


Рисунок 4 - КЭ (утолщение)

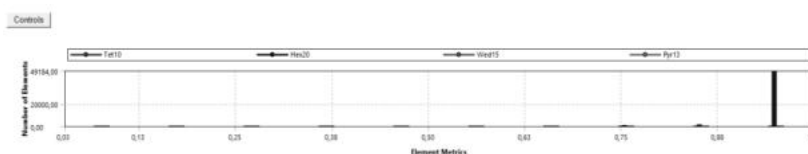


Рисунок 5 - качество сетки

На рисунке 6 представлена общая картина распределения напряжений (эквивалентных), в варианте укрепления кольцом. Стоит отметить, что зона, в которой эквивалентные напряжения достигают 500 Мпа и выше, нами не рассматривается. В этой области следует проводить расчеты на ползучесть. Мы же, в данной работе, рассматриваем только зону укрепления отверстия обечайки.

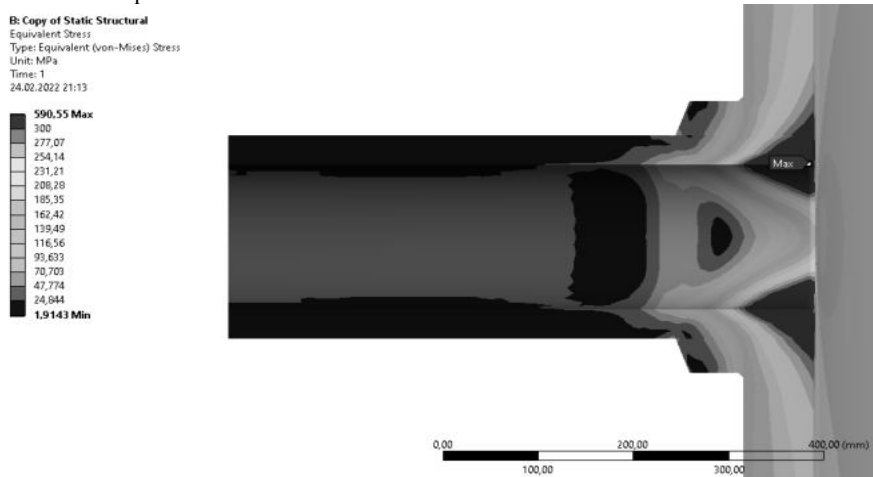


Рисунок 6 - эквивалентные напряжения (кольцо)

Общая картина распределения эквивалентных напряжений, в варианте укрепления с утолщением, представлена на рисунке 7. Отметим, что радиус скругления патрубка оказывает сильное влияние, на образование внутренних концентраторов напряжения.

На рисунке 8 представлены результаты расчетов распределения напряжений в сечении укрепления, в варианте с кольцом. Рассмотрим полученные напряжения и сравним их с допустимыми, которые найдем по формуле $\sigma = 1,5 * 218,5$ МПа, при расчетной температуре.

Таким образом, исходя из графика, представленного на рисунке 9, получаем, что мембранные + изгибные напряжения, в варианте с укреплением кольцом, равны 120 МПа. Сравниваем их, с допустимыми напряжениями: $1,5 * 218,5$ МПа = 328 МПа, и получаем достаточный коэффициент запаса, который равен $n = 2,7$.

На рисунке 10 представлены результаты расчетов распределения напряжений в сечении укреплений, в варианте с утолщением. Рассмотрим полученные мембранные напряжения, и сравним их с допустимыми, которые в данном случае равны 328 МПа (как было посчитано ранее), при расчетной температуре.

В варианте укрепления с утолщением, максимальные мембранные + изгибные напряжения составляют 114 МПа (рисунок 11). Сравниваем их с допускаемыми напряжениями 328 МПа и получаем коэффициент запаса равный $n = 2,9$.

Таким образом, проведенные сравнительные расчеты показывают, что вариант с утолщением стенки патрубка способствует наиболее лучшему распределению напряжений в зоне стыка патрубка с обечайкой. Коэффициент запаса, в варианте с утолщением, получился выше (2.9 против 2.7), также вариант с утолщением предполагает меньшее количество сварных швов. Стоит отметить, что радиус скругления на внутренней части патрубка влияет на распределение напряжений, это необходимо учитывать при проектировании.

Библиографический список

1. Бруйка В.А.- Инженерный анализ в Ansys Workbench. Учебное пособие. Часть 1-2010.
2. Лашинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: Справочник
3. Павлов А. С. - Решение задач механики деформируемого твёрдого тела в программе ANSYS [Текст]: практикум [для вузов] / А. С. Павлов; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - Изд. 2-е, испр. и доп. - СПб.: [б. и.], 2020

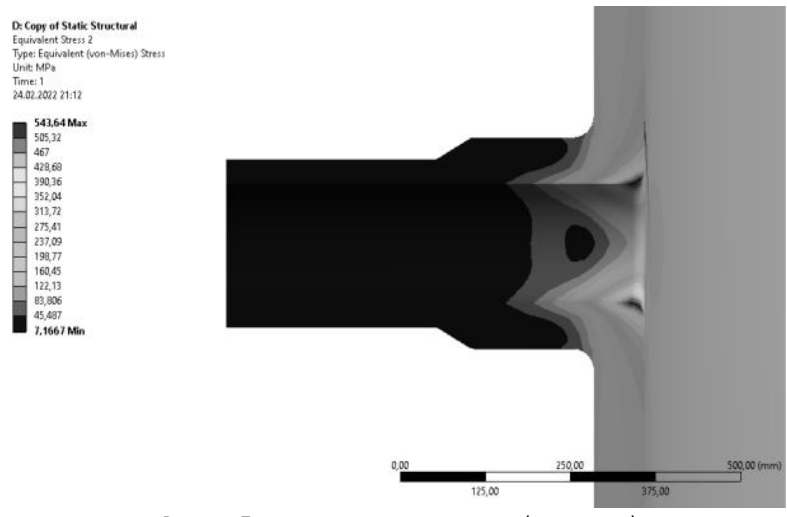


Рисунок 7- эквивалентные напряжения (утолщение)

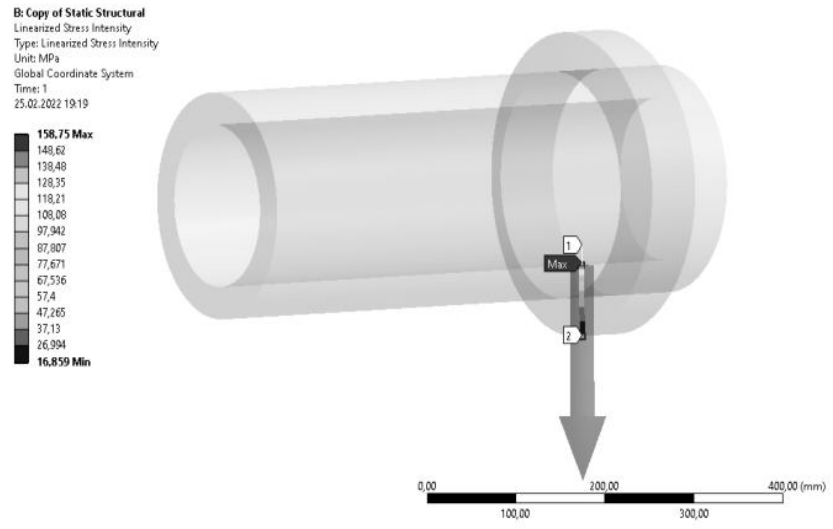


Рисунок 8 - распределение напряжений в сечении укрепления (напряжения по линии)

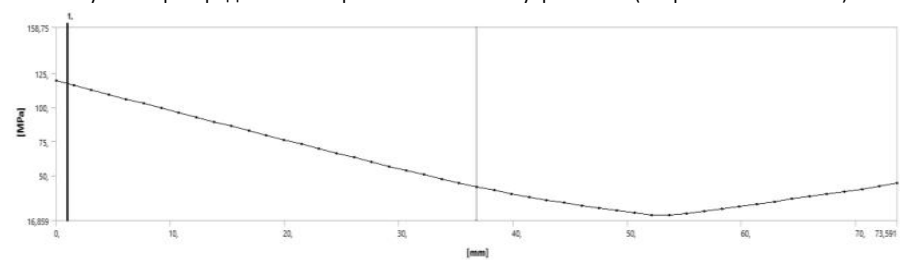


Рисунок 9 - график распределения мембранных + изгибных напряжений (кольцо)

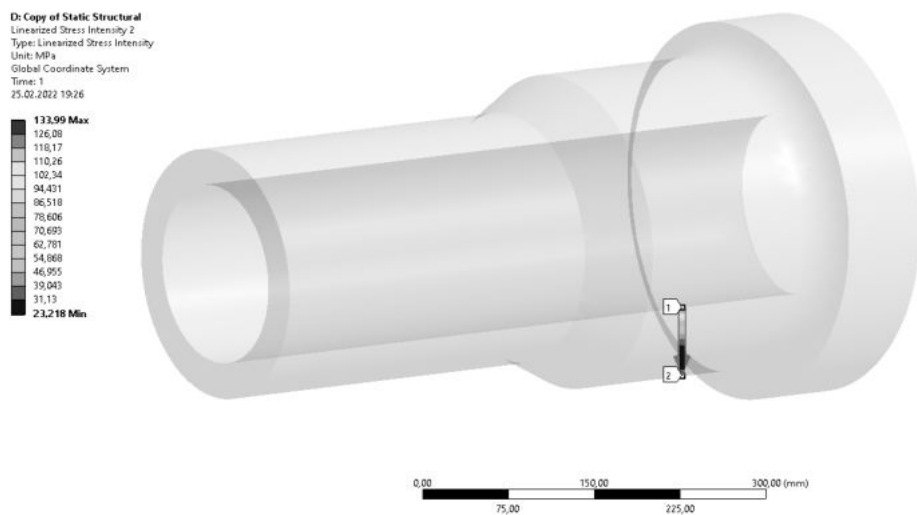


Рисунок 10 - распределение напряжений в сечении укрепления (напряжения по линии)

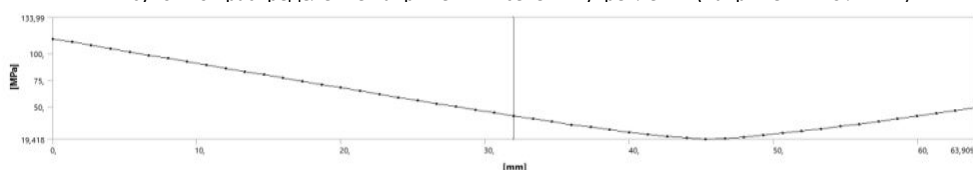


Рисунок 11 - график распределение мембранных + изгибных напряжений (утолщение)

УСТРОЙСТВО АВТОНОМНОЙ РЕГИСТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АМПУЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

Миронова Е.А., Ряхина М.Ю.

Аннотация: в статье представлено устройство автономной регистрации напряжения для испытаний ампульных источников тока. Основным источником для испытаний является СДС-3М.

Ключевые слова: ампульный источник тока, регистрация напряжения, центрифуга, микроконтроллер.

Основное требование к современным системам ближней радиолокации (СБРЛ) – обеспечение высокоэффективной работы по заданным типам целей в сложной естественной и преднамеренно создаваемой помеховой обстановке.

Постоянное развитие станций помех обуславливает необходимость решения актуальной задачи при создании новых СБРЛ для боеприпасов массового применения: совершенствование резервных источников питания СБРЛ, сочетающих долгий срок хранения, высокую надежность, быстрый выход на режим, малый уровень шумов и достаточный для современных интеллектуальных изделий уровень энергообеспеченности.

Потребность в источниках тока, которые сочетали бы в себе многолетний срок хранения с постоянной готовностью к разряду форсированным режимом, привела к разработке ампульных батарей. В них используют активные электрохимические системы, способные обеспечить высокую удельную мощность и энергию. Кратковременность разряда (несколько минут) позволяет пренебречь саморазрядом после заполнения ячеек источника электролитом.

Основная область применения ампульных источников тока с короткими режимами разряда – авиакосмическая и военная техника, батареи с длинными режимами разряда используют в переносных радиостанциях, локационных радиомаяках и другой аппаратуре связи.

Ампульные резервные источники тока СДС-3М (в дальнейшем именуемые «ампульные источники тока»), предназначены для питания постоянным током портативной радиоаппаратуры и электронных приборов одноразового пользования в подвижных вращающихся системах (например, в снарядах нарезных артиллерийских систем).

Условное обозначение ампульного источника тока СДС-3М расшифровывается следующим образом:

СДС – электрохимическая система свинец-диоксид свинца;

3М – вариант.

Наименование ампульных источников тока в соответствии с ЕКПС – первичные элементы и батареи на их основе, включая резервные батареи.

Для проверки электрических характеристик ампульного источника тока скорость вращения центрифуги может быть задана до 20 тыс. об/мин при испытаниях после воздействия повышенной температуры, что соответствует условиям эксплуатации.

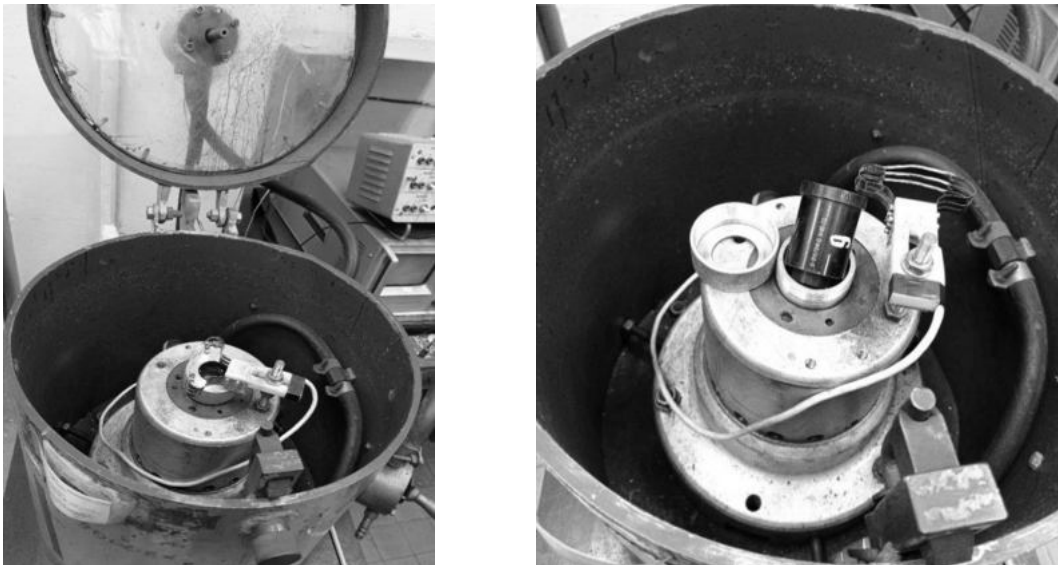


Рисунок 1. Устройство центрифуги

При испытании ампульного источника тока с использованием устройства контролю подлежат следующие параметры:

- время выхода на режим с момента активации;
- стабильность напряжения (шумы, выбросы и провалы, связанные с движением электролита).

Устройство автономной регистрации напряжения состоит из составных частей:

- электронный блок АЦП (см. рисунок 3),
- держатель батарей,
- корпус.

Схема разработанного нами электронного модуля АЦП состоит из блоков, перечисленных ниже (см. рисунок 2). Каждый из них выполняет определённые присущие ему функции.

Интерфейс внутрисхемного программирования обеспечивает первоначальное программирование и периодическую калибровку тактовой частоты микроконтроллера, которая необходима, поскольку в жестких условиях эксплуатации, а именно из-за высокой скорости вращения центрифуги, при наличии конструктивных ограничений применение кварцевого резонатора затруднительно. Интерфейс для вывода информации служит для передачи данных из флэш-памяти через программатор на компьютер для последующего анализа и составления протокола испытаний. Автономный источник питания и стабилизатор напряжения обеспечивают электроэнергией микроконтроллер и флэш-память.

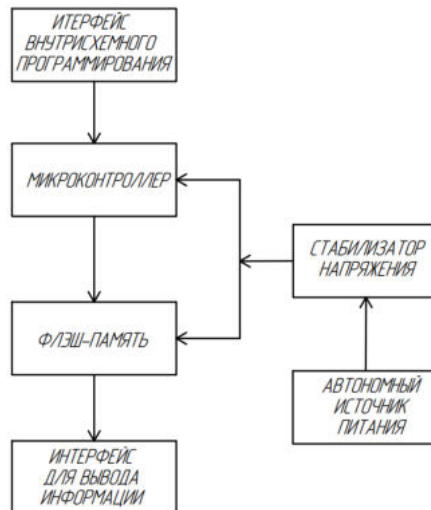


Рисунок 2. Функциональная схема устройство автономной регистрации напряжения

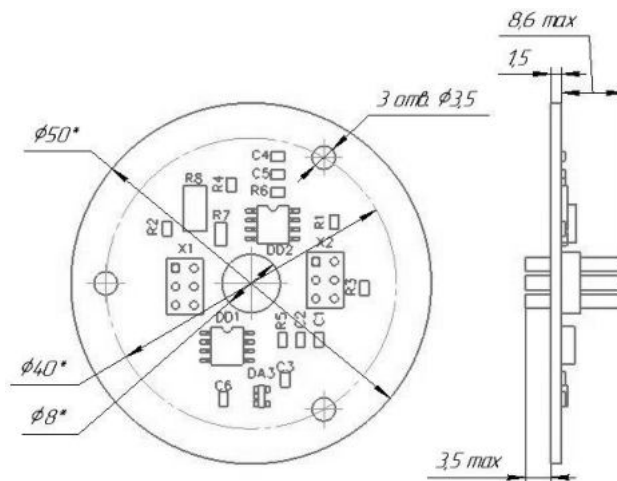


Рисунок 3. Схема сборки устройства автономной регистрации напряжения

Микроконтроллер ATtiny85 выполняет регистрацию аналогового уровня напряжения, его преобразование в цифровое значение с последующей записью во внешнюю флэш-память W25Q64 (64 Мбит). Выбор микросхем обусловлен доступностью, технологической простотой монтажа и малыми габаритами корпусов. Регистрация текущего значения напряжения происходит с частотой 1кГц.

Для выполнения измерений нами был разработан алгоритм регистрации аналогового уровня напряжения. Блок-схемы алгоритма основного цикла встраиваемого программного обеспечения и подпрограмм обработки прерываний представлены на рисунках ниже. Реализация алгоритма производится на языке ассемблер из соображений скорости выполнения операций.



Рисунок 4. Схема алгоритма главной программы

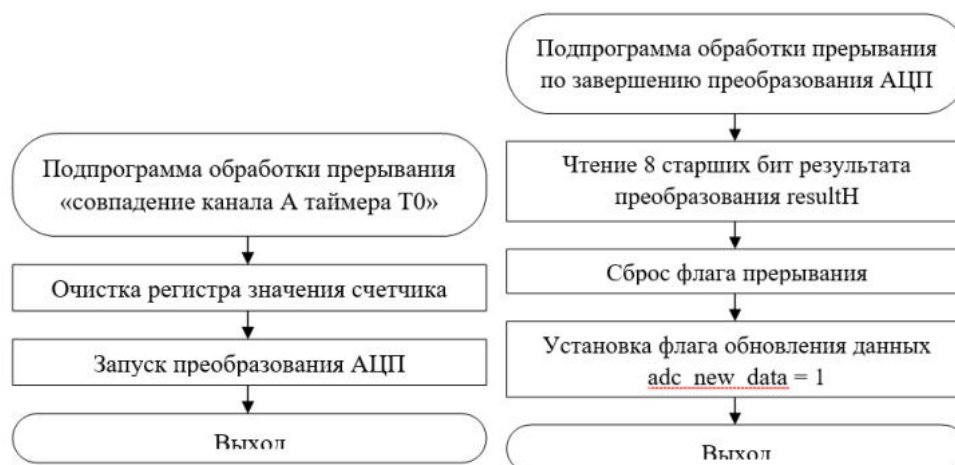


Рисунок 5. Схема алгоритма подпрограммы обработки прерывания «совпадение канала А таймера Т0» и по завершению преобразования АЦП

Разработанное устройство позволяет фиксировать время выхода на режим с момента активации и напряжение шумов. Своевременное выявление просадок напряжения ампульного источника тока позволит быстрее совершенствовать их конструкцию и в итоге повысить стабильность работы систем ближней радиолокации.

Библиографический список

1. Багоцкий В.С., Скундин А.М. / Химические источники тока. - М.: Энергоиздат, 1981. - 360 с.
2. F. L. Walls, "Design Considerations in State-of-the-Art Signal Processing and Phase Noise Measurement Systems" /S. R. Stein, J. E. Gray, and D. J. Glaze Proc. // 30th Ann. SFC. – 1976. – PP 271.
3. С.К. Boggs, A.D. Doak, «Measurement of voltage noise in chemical batteries» // National Institute of Standards and Technology 325 Broadway Boulder. – 1995. – PP 367 – 373.
4. Ампульные источники тока. [Электронный ресурс] URL: <https://niit.ru/ampulnyie-istochniki-toka.html> - / (дата обращения 3.02.2022).
5. Варыпаев В. Н. Химические источники тока. / Дасоян М. А. Никольский В. А. - Москва, Высшая школа, 1990г. - 240 с.
6. Справочник химика. [Электронный ресурс] URL: <https://www.chem21.info/page/107166069170158151168190212114238224133059210162/> - / (дата обращения 14.02.2022).
7. «Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем» – М., Государственный комитет СССР по вычислительной технике и информатике, 1992.

УДК 004.912

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЕВАНТНОЙ ВЫДАЧИ НА ОСНОВЕ ПОИСКА ПО ГРУППЕ СЛОВАРЕЙ

В. С. Добровольский, А. А. Шibaев

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

В статье рассматривается принцип формирования релевантной выдачи на основе поиска по группе словарей. Производится анализ поисковой строки. Рассматриваются принципы индексирования, ранжирования, поиска и извлечения данных.

Ключевые слова: анализ, релевантность, поисковые механизмы, поиск, индексирование.

Введение

Количество информации, хранящейся в электронном виде в 2022 году приблизилось к 50 Зеттабайт. Это количество растет и будет продолжать расти экспоненциально. В столь колоссальном объеме информации необходим инструмент поиска нужной или приблизительно схожей информации. Поисковая строка является одним из самых используемых элементов для нахождения информации. Не всегда полученный результат является ожидаемым. Это связано с отличием поискового намерения, заложенного в поисковой запрос и поисковой выдачи, или же с неправильным ранжированием результатов в модуле формирования релевантной выдачи. Из-за ошибки в запросе или процессе ранжирования пользователь может потратить много времени на поиск нужной информации или вообще не найти её. Главной задачей данной статьи является рассмотреть принцип работы поисковой строки.

Основные понятия технологии поиска

Поиск — это процесс взаимодействия между пользователем и поисковым механизмом. Человек делающий запрос пытается удовлетворить свою потребность в информации вкладывая в это свое намерение, указывая соответствующие ограничения. Механизм поиска использует эти критерии для сбора совпадений и передачи их пользователю. Важно уточнить, что поиск действует исключительно по алгоритму, то есть он не понимает значение терминов, контекста и намерений пользователя.



Рисунок 25 — Примитивная модель поискового механизма с точки зрения стороннего наблюдателя

После передачи механизму поиска запроса пользователя, поля документов подвергаются процессу анализа. В ходе анализа значение полей преобразуется в элементы, называемые *лексемами*. Лексемы не являются текстом поискового запроса, обычно лексемы проходят процесс обработки после которой остаются, только ключевые слова. По завершению анализа документы индексируются, лексемы в структурных данных поиска и используются в дальнейшей организации поиска по документу. Числовые поля сохраняются для использования числовых атрибутов в вычислении ранга.

В центре механизма поиска находятся оптимизированные структурные данные, позволяющие обрабатывать документы. Данную структуру называют обратным индексом. Обратный индекс состоит из атрибутов, самые важные это: словарь терминов и словарь указателей. *Словарь терминов* — это отсортированный список терминов, встречающихся в документах. Каждый термин находящийся в словаре прописан в каких документах он упоминается, такой список называется *указателем термина* [1]. Примерное содержание словаря терминов и указателя терминов предоставлены в Таблице 1.

Таблица 1
Структура обратного индекса

Запросы	Словарь терминов	Указатель терминов
0. красная пара обуви.	0. красная	0-> [0, 2]
1. красивые пейзажи.	1. красивые	1-> [0]
2. красная армия.	2. отдых	2-> [3]
3. отдых в Черногории.	3. пара	3-> [0]
	4. пейзажи	4-> [1]
	5. армия	5-> [2]
	6. в	6-> [3]
	7. обуви	7-> [0]
	8. Черногории	8-> [3]

На самом деле, что словарь терминов, что список указателей являются ассоциативными массивами. Обычно словарь терминов сортируют в алфавитном порядке, чтобы упростить поиск по массиву. По порядковому номеру термина можно получить список указателей с тем же порядковым номером и извлечь документы, содержащие термин. Если мы захотим найти термин *отдых* мы обратимся к словарю терминов и увидим индикатор — 3, затем мы обращаемся в список указателей терминов и видим, что термин с индикатором два находится в третьем документе.

Как говорилось ранее словарь терминов и список указателей являются основополагающими элементами обратного индекса, но не единственными. Оставив только эти элементы в механизме поисковой строки, мы бы добились работоспособной системы, но в современных поисковиках необходима релевантность, для этого необходимо добавить следующие элементы:

- Частота термина — как часто встречается данный термин в документе.
- Частота документа — количество документов содержащихся в списке указателей.
- Позиции термина — позиция термина позволяет искать термины вместе, то есть если будет задан поиск *отдых Черногория*, то важность того, что бы эти два термина находились рядом, друг с другом возрастает.
- Полезная нагрузка — завязывание лексемы с некоторым значением, генерируемым во вне. Позволяет оценить релевантность.
- Хранимые поля — информация, хранимая в обратном индексе, обработанного документа.

Анализ

Рассмотрим процесс преобразования текста в лексемы. Как уже говорили после извлечения документа из места его хранения, документы в конце концов передаются механизму поиска, где уже эти данные анализируют. Во время анализа переданная информация обрабатывается и преобразуется в лексемы, пригодные для сохранения во внутренние структуры данных. Обычно из слов убираются знаки препинания, местоимения и слова приводятся к нижнему регистру.

Механизмы поиска не обладают интеллектом и поэтому если в запросах есть ошибки, то при поиске из-за того, что документ не совпадает один в один, документ будет считаться не советующим запросу. В таких ситуациях необходимо использовать алгоритмы анализа ошибок в лексемах. Один из самых известных алгоритмов нечеткого поиска это расстояние Левенштейна и Дамерау — Левенштейна. Главной задачей поиска является: «По заданному слову найти в тексте или словаре размера n все слова, совпадающие с этим словом (или начинающиеся с этого слова) с учетом k возможных различий». При запросе «Шутка» с учетом ошибок возможны такие слова как: «Утка»,

«Жутка», «Умка» «Штука» и другие. Алгоритмы поиска с учетом ошибок характеризуются *метрикой* — в данном случае функция расстояния между словами, позволяющая оценить степень сходства.

$$p(x, y) \leq p(x, z) + p(z, y), \text{ где } x, y, z \in X. \quad (1)$$

Данный алгоритм имеет временную сложность $O(ab)$ и потребляет $O(ab)$ памяти, где a и b — длины сравниваемых строк. Который можно представить в матрице, изображенной на рисунке 2.

		М	А	Х	И	Н	А
	0	1	2	3	4	5	6
М	1	1	2	3	4	4	5
А	2	1	2	3	4	5	5
Л	3	2	2	3	4	5	6
И	4	3	3	2	3	4	5
Н	5	4	4	3	2	3	4
А	6	5	5	4	3	2	3

Рисунок 2 — Пример работы расстояния Левенштейна

Рассмотрев процесс выполнения алгоритма, можно заметить, что на каждой итерации используется две конечные строки матрицы, из этого следует, что потребление памяти можно уменьшить до $O(\min(a, b))$.

$$D_{i,j} = \min(X_b + 1, X_y + 1, X_z + C_{\text{замены}}), \quad (2)$$

$$C_{\text{замены}} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_1[i] \neq S_2[j] \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (3)$$

Есть возможность оптимизировать алгоритм, если стоит задача нахождения не более k различий. В этом случае нужно вычислять в матрице лишь диагональную полосу шириной $2k+1$ (отсечение Укконена), что сводит временную сложность к $O(k \min(a, b))$. Надо признать, что данный алгоритм не является лучшим для нечеткого поиска. Ведь одной из самых популярных ошибок при вводе запроса является перестановка двух соседних символов, а в алгоритме расстояния Левенштейна — это будет считаться за два редактирования (удаление и вставка символа), тем самым увеличивая наше значение k [2].

Из-за большого увеличения значения k , в расстояние Левенштейна внесли еще одно правило называемое — транспозицией. Именно данная метрика дает наилучшие результаты на практике. Транспозиция является операцией перестановки двух соседних букв, и является одной операцией наряду с вставкой, удалением и заменой. Теперь алгоритм обязан хранить не две последние строки матрицы, а три. Так же добавляется правило, благодаря которому в случае обнаружении транспозиции при расчете расстояния учитывается и ее стоимость. Такой алгоритм называется расстоянием *Дамерау-Левенштейна*.

$$D_{i,j} = \min(X_b + 1, X_y + 1, X_z + C_{\text{замены}}, X_m + C_{\text{транспозиции}}), \quad (4)$$

$$C_{\text{замены}} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_1[i] \neq S_2[j] \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (5)$$

$$C_{\text{транспозиции}} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_1[i] = S_2[j-1] \text{ и } S_1[i-1] = S_2[j] \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (6)$$

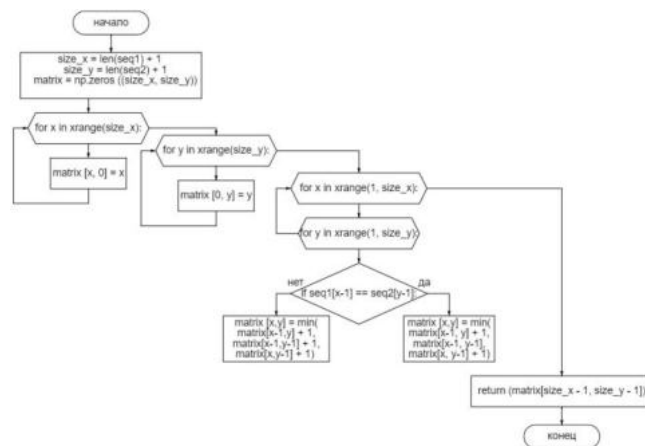


Рисунок 3 — Блок схема реализации расстояния Левенштейна

Индексирование

За анализом следует *индексирование* — процесс, в ходе которого данные сохраняются в структурах обратного индекса. Техническая реализация индексирования является тяжелой задачей, особое внимание уделяется вычислительной производительности и оптимальному распределению ресурсов. Влияние на релевантность будет сказываться, смотря какую информацию мы будем индексировать и сохранять в структуру данных. Также,

необходимо учитывать, что документы будут обрабатываться пакетами. Чаще всего в поисковых системах используют инвертированные индексы, чтобы быстро находить документы, чтобы быстро находить документы, содержащие слова в запросе, а затем ранжировать эти документы по релевантности. Поскольку обратный индекс хранит список документов, содержащих каждое слово, поисковая машина может использовать прямой доступ для поиска документов, связанных с каждым словом в запросе, чтобы быстро найти соответствующие документы (Таблица 1). Этот индекс может только определить, существует ли слово в конкретном документе, поскольку он не хранит никакой информации относительно частоты и положения слова, поэтому он считается логическим индексом. Такой индекс определяет, какие документы соответствуют запросу, но не ранжирует совпавшие документы. В некоторых проектах указатель включает дополнительную информацию, такую как частота каждого слова в каждом документе или позиции слова в каждом документе [3].

Поиск и извлечение данных

В первую очередь стоит задуматься над поиском количества терминов в документе. Имея словарь терминов и список указателей терминов, мы можем реализовать логический поиск т.е. поиск, который может использовать логические операции (И, ИЛИ, НЕ). Рассмотрим ситуацию, когда пользователь ищет «отдых Черногория». Для начала нужно извлечь указатели обоих терминов, а затем выбрать документы, присутствующие в обоих указателях.

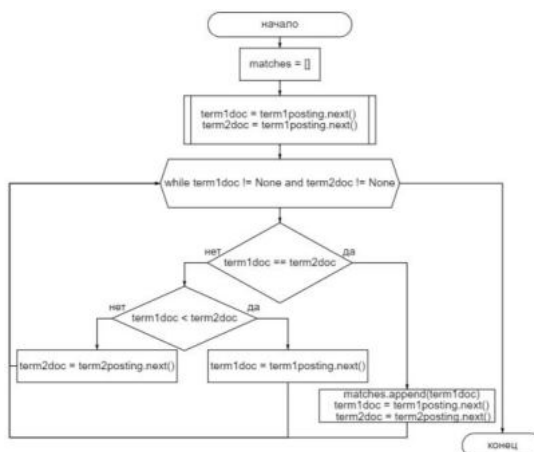


Рисунок 4 — Блок схема реализации логического И

В данном случае мы просто выполняем итерации и проходим по всему списку. Всякий раз, когда обнаруживается индикатор, присутствующий в обоих списках, он добавляется в рабочий список совпадений. Алгоритм останавливается и возвращает результат по достижению конца любого из списков. Несложно представить реализацию ИЛИ и НЕ, ведь принцип работы остаётся таким же.

Сортировка и ранжирование данных

Поисковые механизмы должны извлекать данные в определенном порядке. Сортировка может выполняться по целочисленным/вещественным значениям или в алфавитном порядке. Документы возвращаются в порядке уменьшения релевантности. Релевантность определяется функцией *ранжирования*. Функция получает данные из запроса и проходит каждый документ, соответствующий запросу, вычисляя оценку, показывая насколько документ соответствует запросу. На внутреннем уровне функция вычисляет оценку полагаясь на *частоту термина*, умноженную на коллекцию *частоты документа* и количество терм, содержащихся в поле [4]. Возьмем два документа, в котором в файле А состоящему из тысячи строк искомое слово «Черногория» встречается двадцать раз, а в файле Б десять раз. Можем ли мы считать, что статья А в два раза более релевантная? Очевидно, что скорее всего, нет. Что бы решить данную проблему воспользуемся алгоритмом BM25.

Рассмотрим формулу алгоритма ранжирования BM25:

$$score(D, Q) = \sum_{i=1}^n IDF(q_i) \cdot \frac{f(q_i, D) \cdot (k_1 + 1)}{f(q_i, D) + k_1 \cdot (1 - b + b \cdot \frac{|D|}{avgL})}, \quad (7)$$

где Q — поисковый запрос; D — документ из нашей коллекции; q_i — термы (слова), которые содержатся в запросе Q ; $f(q_i, D)$ — частота термина q_i , то есть мера TF термина q_i в документе D ; $IDF(q_i)$ — обратная документная частота термина q_i , то есть мера IDF термина q_i ; $|D|$ — количество всех термов в документе D (или длина документа); $avgL$ — средняя длина документа в коллекции; k_1 и b — свободные коэффициенты, где $k_1 = 1.5$, $b = 0.75$ [5].

Проходя через обработку алгоритмом, мы получаем оценку совпадения терминов. Благодаря этой оценке поисковая строка может выдавать релевантные результаты, основанные на пользовательском запросе.

Заключение

В данной статье был рассмотрен процесс формирования релевантной выдачи на основе поиска по группе словарей. Объяснен принцип работы алгоритма Левенштейна, Демерау-Левенштейна и BM25. Показаны способы реализации алгоритмов и логических операций.

Библиографический список

1. Берримон Д, Тарнбулл Т. Релевантный поиск с использованием Elasticsearch и Solr. М: Изд-во ДМК», 2018. 38 с.
2. Хабр [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/post/545634/> (дата обращения 19.04.2022).
3. Хабр [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/company/skillfactory/blog/566414/> (дата обращения 19.04.2022).
4. Docplayer [Электронный ресурс] URL: <http://docplayer.com/29042052-Osnovy-realizacii-poiskovoy-sistemy.html> (дата обращения 19.04.2022).
5. Hmong Press [Электронный ресурс] URL: [https://www.hmong.press/wiki/Index_\(search_engine\)](https://www.hmong.press/wiki/Index_(search_engine)) (дата обращения 19.04.2022).

Цель работы:

Реализовать основные возможности, нужные для организации ЦУП.

Центр управления полётами Юношеского клуба космонавтики им. Г.С.Титова (ЦУП ЮКК) предназначен для управления космическими, воздушными и наземными объектами и их математическими моделями. ЦУП ЮКК включает в себя как большие экраны визуализации (стена экранов), так и отдельные автоматизированные рабочие места управления (АРМ), административную машину, с которой производится контроль за всеми остальными устройствами, а также сервер, который связывает вышеперечисленные компоненты в одну сеть.

Создание ЦУП ЮКК связано с многими задачами. Одной из них является отображение информации на стене экранов. Стену планируется создавать при помощи совмещённых друг с другом экранов, которые будут показывать одно изображённое, распределённое на них. Каждый экран в этой стене представляет собой устройство, которое имеет видеокарту с поддержкой WebGL. На стене экранов планируется визуализировать 3D контент и располагать основную информацию. 3D контент также может быть запущен и на отдельных АРМах.

Для создания 3D контента был создан определённый концепт, на базе которого построена 3D модель Солнечной системы. Концепт написан на браузерном языке программирования — JavaScript (JS), с использованием библиотеки THREE.js. На данный момент реализован концепт постройки и размещения на сцене различных типов 3D объектов, согласно которому:

1. Каждый объект считается самостоятельным и хранится в файле формата svg, который позволяет размещать внутри JS код. Svg при загрузке на html-документ при помощи тега object создаёт в нём отдельный документ, который может иметь одинаковые с основным html-документом названия переменных, и они не будут вызывать ошибки.

2. У объектов указывается название родителя (название объекта, к которому следует присоединить его) и собственное имя. Благодаря этому достигается своеобразная иерархия объектов.

3. JS код, который объединяет объекты между собой находится в html-документе.

4. Каждый объект имеет обязательно 4 функции, которые могут вызываться вышеупомянутым кодом:

a. `get(data)` — возвращает свойство, имеющее название `data`, JS объекта (`datarefs`), содержащего параметры объекта.

b. `set(type, data)` — выполняет лежащую внутри svg функцию с названием `type` и аргументом `data`.

c. `init(Three, callback)` — формирует 3D объект и сохраняет в `datarefs`. Аргументы `Three` — ссылка на объект библиотеки; `callback` — ссылка на функцию, которая находится в заранее загруженном JS файле (см. пункт 3).

d. `callback(data)` — функция, которая вызывается внутри svg после завершения каких-либо действий или для запроса информации у клиента и отправляет html-документу какую-либо информацию, например, о том, что 3D объект готов.

5. По завершении загрузки svg файла вызывается событие `onload`, которое провоцирует срабатывание функции `init` в svg файле.

Одним из важных инструментов стены экранов является плоскость, на которую визуализируется графическая и видео информация. Она также является 3D объектом и способна свободно перемещаться по стене экранов. Находится плоскость может, как фиксировано перед камерой, так и прикрепленной к различным объектам 3D.

Для разделения изображения, которое будет показано на стене экранов, на части, чтобы их расположить на своих экранах планируется использовать метод, вызываемый у `Three.js` камеры (рисунок **Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

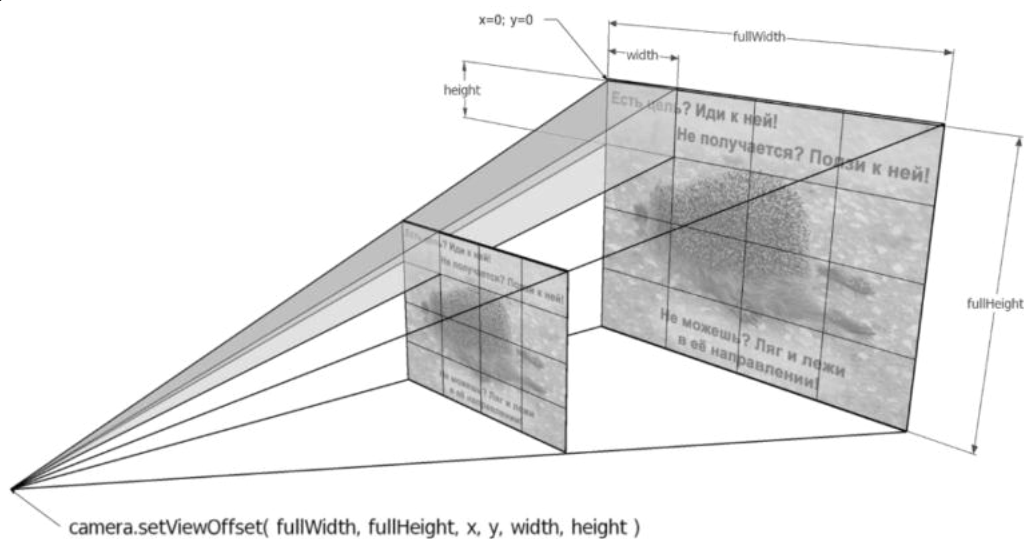


Рисунок1 – Стена экранов

Для работы системы ЦУП загружать нужные файлы планируется динамически. Для этого организуется серверная машина, на которой имеются в базе данных все файлы, нужные для работы каждой машины. Сервер построен на основе технологии node.js с надстройкой в виде node-RED.

Перед началом работы на каждой клиентской машине в системе на ней также поднимается сервер (далее сервер клиента; веб-сервер) с другим содержимым, а в памяти содержится некоторый базовый html файл, который запускается в браузере. Файл обладает минимальным содержимым, которое способно, лишь начать загрузку контента, нужного для работы (у всех машин он одинаков).

Связь между сервером и сервером клиента осуществляется по каналам MultiCast, который позволяет транслировать информацию одновременно нескольким машинам, что особенно полезно при загрузке контента на стену экранов. Связь между сервером клиента организуется по протоколу WebSocket (WS). Данный протокол, в отличие от базового http, уравнивает значения веб-сервера и клиента и позволяет обмениваться информацией между собой без дополнительных запросов.

Алгоритм загрузки файлов разделён на 2 основных этапа:

1. Базовый. Происходит запуск браузера и http запрос у веб-сервера за базовым html файлом. Благодаря JS коду внутри файл устанавливается связь по WS с веб-сервером. После установки связи машина начинает вещать свой ip серверу для дальнейшей работы.

2. Загрузка основного контента. По инициативе самого клиента (авторизация) или админа всем нужным машинам отправляется JS файл с расширенным кодом и функциями для загрузки различного контента, который тут же исполняется. Далее потоком загружаются все остальные файлы одновременно всем машинам.

Таким образом, клиенту приходят все нужные для работы файлы, однако в неопределённой последовательности. Для структуризации использования файлов, помимо их отправляются файлы с расширением JSON, которые являются инструкциями для их использования. Каждая такая инструкция содержит наименование функции, которую следует исполнить, аргументы к ней, а также условия для её запуска.

Благодаря данной системе порядок загрузки файлов становится не важным. Также система позволяет динамически отправлять подобные инструкции клиентам для управления и контроля. Однако клиенты способны формировать сами подобные инструкции и отправлять их другим клиентам, например, для синхронизации происходящего.

В ЦУП также присутствуют админы. Они организуют работу АРМов. В процессе своей работы они имеют доступ к ip всех машин, подключённых к системе, и к файлам в базе данных сервера. Перед началом работы машины админ определяет данную машину в группу, для которой набор файлов для загрузки будет одинаков. После появления всех нужных машин в группе админ даёт команду на загрузку файлов. Однако клиент может автоматом перейти в группу авторизовавшись в системе. Также это позволяет создать иерархическую структуру админов, где вышестоящие админы могут делегировать клиентов нижестоящим для дальнейшей организации работы.

К примерам таких групп можно отнести:

1. Стена экранов.
2. Админы.
3. АРМы Союза.
4. АРМы антенны.

Таким образом, на все машины стены экранов загружается одинаковый контент. Для разделения визуализации контента используется функция из библиотеки THREE.js. А для синхронизации положений объектов используется система инструкций.

Научный руководитель: к.т.н., зав.сектором Жуковский В.Ф.

Библиографический список

1. Вильданов А.Н. 3D-моделирование на WebGL с помощью библиотеки Three.js: учебное пособие. Уфа: Изд-во РИЦ БашГУ, 2014. 113 с.

АВТОРЫ СБОРНИКА

Абдулхаликова А. К.	267	Кучков А. В.	263
Агаповичев А. В.	118	Кяримов Р. Р.	20
Александров А. С.	12, 31, 48	Лазарева И. А.	269
Алексеев В. П.	118	Лазуто А. Д.	12
Андрейчук И. А.	237	Лебитков В. К.	52
Анисимов И. О.	108	Ленина В. А.	24, 77
Антипина Е. А.	31	Лихачев И. В.	212
Арутюнова Н. К.	267	Лоскутов Е. Н.	68
Архипов М. Д.	174, 259	Лузан Р. Д.	261
Бармина А. А.	123	Лупанина В. А.	242
Барышев Н. А.	42	Магомедов И. Н.	237
Батыгин А. В.	112	Маилян Г. Э.	58
Белов Д. С.	269	Маликов И. О.	79
Беспалов Д. А.	77	Мальков А. Э.	269
Бойко М. М.	183	Марков А. В.	212
Будный Н. Л.	170	Масягина Д. А.	209, 231
Васильев А. А.	237	Матвеева Е. П.	228
Васильев С. М.	123	Медведцева Ю. Г.	196
Васильков Д. В.	48, 88	Мелехин А. А.	58
Ведер Б. Р.	79	Мелузов Р. А.	103
Витов А. В.	233	Метелёв М. А.	31
Воловцов А. В.	140	Мещеряков С. А.	86
Воронов А. С.	93	Миняйло Я. Ю.	45
Гаврилов В. В.	160	Миронова Е. А.	273
Гарюн В. И.	100	Михайлов В. А.	213
Глухов А. Р.	217	Михайлов М. В.	108
Гнедов Н. М.	108	Мишин Н. Д.	12
Горохова П. Д.	133	Молошников Д. А.	252
Григорьев М. С.	16	Мясников Е. С.	148
Григорьева К. К.	9	Наумченко В. П.	29, 186
Губарев А. Д.	68	Новиков И. А.	58
Гуманенко Я. Д.	86	Орешина О. А.	212
Дмитриев Д. К.	103	Пашута П. А.	36, 39
Дмитриев П. Г.	65	Петров Ю. В.	205
Добровольский В. С.	213, 276	Пикунов Д. Г.	29, 186
Дубасов Н. С.	93	Плискин М. В.	52
Дулов Д. В.	31	Полетаев В. В.	86
Дуров Д. С.	79	Полетаева М. В.	86
Елизов М. Ю.	189	Попов А. М.	245
Ефремова Е. С.	88	Портнягин А. С.	153
Жолудев А. Н.	93	Пронькин И. Г.	249
Журкин П. О.	240	Пустовалов В. Е.	60
Загуменный А. П.	151	Пушнякова Е. В.	205
Задьян Г. Г.	42	Рузибаев Р. С.	177
Захаров С. А.	209, 231	Ряхина М. Ю.	273
Захарова К. В.	249	Самойленко Д. А.	81
Иванов Д. А.	16	Светлаков В. А.	100, 249
Иванов Н. М.	133	Седых А. И.	167
Иванов О. К.	163	Селихов А. В.	84
Иванов П. А.	6	Семенова В. С.	192
Илюшин П. А.	29, 186	Сильчонок-Задьян С. С.	42
Исаев А. С.	138	Синицын В. А.	153
Кальнина М. А.	12	Смирнягина Д. А.	126
Карпов А. Д.	114	Смоленцева С. С.	36, 39
Кешишьян В.	93	Снетков А. Д.	160
Ким А. А.	158	Соловьёв А. В.	29, 186
Кириллов А. В.	179	Соломатова Ю. А.	225
Колачев И. О.	199	Старовойтов И.	48
Конопелькин М. Ю.	126	Суров М. Д.	280
Коноплев Ю. В.	231	Суровцев А. Е.	100
Корзун Я. А.	96	Сухов Т. М.	233, 237
Костиков А. К.	16	Терешенкова О. А.	158
Костин И. Д.	245	Толмачев А. С.	209
Кошелев П. Е.	209, 231	Тютюнников М. С.	72
Кошкар А. С.	192	Усынина Е. В.	68
Краснов А. С.	121	Фадеева Ю. В.	245
Кузнецов В. А.	256	Хаймович А. И.	20
Кучеренко М. А.	112	Ходосов В. В.	81

Храмова Д. А.	77	Шевчик А. А.	130
Хяникяйнен Э. Е.	222	Шибает А. А.	213, 276
Чаусовский А. И.	167	Шкурупий В. А.	170
Чубарев С. А.	100	Шония К. Н.	6
Чуйкин А. А.	6	Юденков В. Э.	52
Чунин С. А.	121	Юмаков А. В.	220
Шаронов Е. М.	9		

Подготовили к печати В. Е. Иванов, Д. М. Охочинский, М. Н. Охочинский

Подписано к печати 08.11.2022. Формат бумаги 60'84 1/8.
Бумага офсетная. Усл.-печ. л. 40.5. Тираж 150 экз. Заказ №
Балтийский государственный технический университет «Военмех»
Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская, дом 1