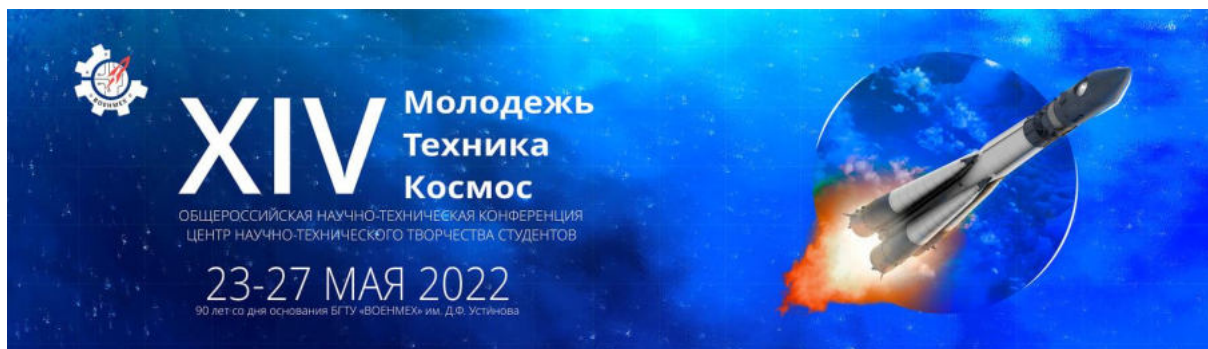


Министерство науки и образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»
Российская академия ракетных и артиллерийских наук (РАРАН)
Российская академия космонавтики им. К. Э. Циолковского (РАКЦ)
Санкт-Петербургское отделение



МОЛОДЕЖЬ. ТЕХНИКА. КОСМОС

Труды четырнадцатой общероссийской
молодежной научно-технической конференции

Том 3

Санкт-Петербург, Россия
23 – 27 мая 2022 года

Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 88

Санкт-Петербург
2022

УДК 629.78 : 623.4

M75

M75

Молодежь. Техника. Космос: труды четырнадцатой общерос. молодежн. науч.-техн. конф. В 4 т. Т. 3. СПб., Издательство Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 2022. – 137 с. – Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 89.

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 третий том сборника вошли материалы секций «Системы вооружения и военная техника», «Робототехника и мехатроника».

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. ЦНТТС *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

120-ММ МИНОМЕТНЫЙ КОМПЛЕКС НА МАЛОТОННАЖНОМ АВТОПРИЦЕПЕ.....	4
АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА КОНДЕНСАТОРОВ ПАРА	8
ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУРЫ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ ОБЪЕМНО-ДЕТЕНИРУЮЩИХ БОЕПРИПАСОВ.....	10
ДАТЧИК ОБОРОТОВ СНАРЯДА.....	15
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЗЕЛЬ-ЭФФЕКТА ПРИ СОЗДАНИИ МОЩНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ВИНТОВОК	19
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЖУХА ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ЖЕСТКОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СТВОЛА 115-ММ ОРУДИЯ.....	21
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБОВ МАРКИРОВКИ ИЗДЕЛИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАК ФАКТОР УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ.....	25
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА НА ОПЕРАЦИИ ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ.....	27
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОМД В ПРОГРАММЕ DEFORM-3D	30
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ДВУХСЕДЕЛЬНОГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА.....	34
ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ МАССЫ СТВОЛЬНЫХ ОРУДИЙ ПОЛЕВОЙ АРТИЛЛЕРИИ	36
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БОЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	39
ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, А ТАК ЖЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ ВОЕННЫХ ЛЕДОКОЛОВ.....	41
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМОДИФИКАТОРЫ.....	43
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРИТЕЛЯ МАССЫ. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ РЫНКА	46
РАСЧЁТ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ БОРЬБЫ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ.....	49
РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КРИОПАНЕЛЕЙ КРИОСОРБЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОТКАЧКИ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО КИСЛОРОДНО-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА.....	55
РЕАКТИВНО-РЕАКТИВНАЯ СХЕМА ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОТИВОТАНКОВОЙ ГРАНАТЫ ПГ-30	58
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТАКТИЧЕСКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КАК ЭЛЕМЕНТА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБРАЗЦОВ БРОНЕТЕХНИКИ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ.....	64
ТЕРМОПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ЛОПАТОК ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА.....	66
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СНАРЯДА НА СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ	69
ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ УЗЛА ПРОГРАММИРУЕМОГО ВЗРЫВАТЕЛЯ ДЛЯ 130-ММ КОРАБЕЛЬНЫХ СНАРЯДОВ.....	72
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОХОДИМОСТИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА	75
АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ЧАСТОТНО-ТОКОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	77
ВЫРАБОТКА УГЛА ПОВОРОТА ДЛЯ КАЖДОГО РОБОТА В ГРУППЕ	83
ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТИПА «ГЕКСАПОД» С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ	86
К ВОПРОСУ СОГЛАСОВАННОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ И ЗАДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ИНТЕРЕСАХ РЕАЛИЗАЦИИ КОЛЛАБОРАТИВНОГО ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ.....	90
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИРОПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПОДВИЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ	96
МОБИЛЬНЫЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ.....	99
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РАЗЛИЧНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ БАЛАНСИРУЮЩЕГО РОБОТА	103
НИЗКОУРОВНЕВОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ САМОХОДНОГО АВТОНОМНОГО РОБОТА С МАНИПУЛЯТОРОМ.....	107
ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ФОТООТВЕРЖДЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	111
ОБОСНОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПНЕВМОПРИВОДА В ЭКЗОСКЕЛЕТАХ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	114
ОПТИМИЗАЦИЯ «ПОСЛЕДНЕЙ МИЛИ» ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ В СЕБЯ БПЛА И СКЛАДСКУЮ РОБОТОТЕХНИКУ	117
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РЕЗОЛЬВЕРА В ПАКЕТЕ SIMINTECH	120
РАЗРАБОТКА КОЛЕСНОГО ШАССИ РОБОТА-ЛУНОХОДА	123
ТЕСТИРОВАНИЕ СПУТНИКОВ В ФОРМАТЕ CUBESAT С ПОМОЩЬЮ ЗАПУСКА ВЫСОТНОГО МЕТЕОЗОНДА.....	126
РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЕЛЬТА-РОБОТА	128
СОЗДАНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО РОБОТА ДЛЯ УЧЕБНЫХ ЦЕЛЕЙ	130
ТЕРМОВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ПРИВОДА ПЛАТФОРМЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	131

УДК 623.421.4.:629.332

120-ММ МИНОМЕТНЫЙ КОМПЛЕКС НА МАЛОТОННАЖНОМ АВТОПРИЦЕПЕ

Е.А. Коваленко

Волгоградский государственный технический университет

Ведение войсковых операций в современных условиях все чаще приобретают характер локальных конфликтов. Боевые действия происходят в городских условиях. Характерный ландшафт: относительно узкие улицы и расположенные в ряд здания – диктует использование малогабаритных автопоездов, обладающих хорошей мобильностью, управляемостью и маневренностью.

Наиболее эффективным средством поражения противника в городе или же в условиях сложных рельефов местности является – миномет.

Данный вид артиллерийского вооружения имеет ряд преимуществ по сравнению с гаубицами и пушками, например, таких, как: более крутая траектория ведения огня, обеспечивающие огибание рядом стоящих зданий, холмов, гор (рис. 1), высокая мобильность, скорострельность, малый вес орудия, лёгкость транспортировки [1].

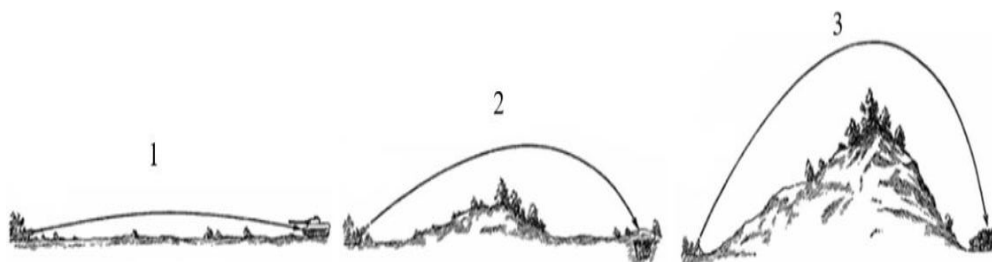


Рис. 1. Траектория полета снарядов
1 – пушка, 2 – гаубица, 3 – миномет.

Миномет (рис. 2) обеспечивает:

- уничтожение или подавление живой силы и огневых средств противника, расположенных открыто, в окопах, траншеях, на обратных скатах высот;
- ослепление (задымление) наблюдательных пунктов противника, организацию дымовых завес, освещение местности [2].

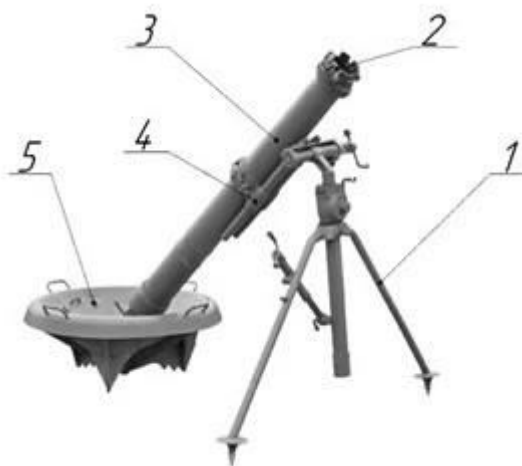


Рис. 2. Миномет

1 – лафет-двунога; 2 – предохранитель; 3 – труба; 4 – прицельное приспособление; 5 – опорная плита.

Стрельба из миномета ведется минами. Большая крутизна траектории мины и сравнительно малые габариты миномета в боевом положении позволяют располагать его в глубоких складках местности и за укрытиями, что исключает возможность поражения его настільным огнем противника.

В настоящее время транспортировка миномета может производиться:

- на колесном ходе за автомобилем

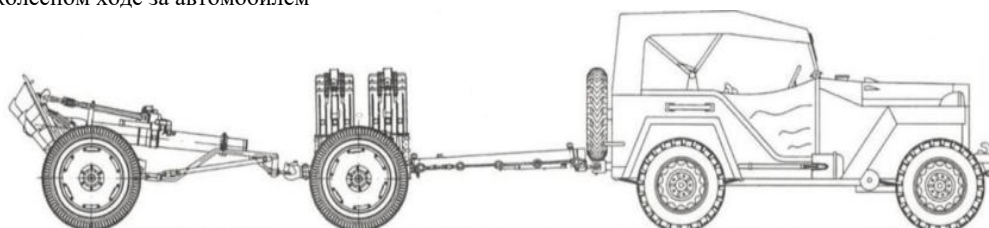


Рис. 3. Транспортировка миномета на механической тяге

– на колесном ходе вручную, усилием расчета (на короткое расстояние);



Рис. 4. Транспортировка миномета усилием расчета

– на неподдресоренном колесном ходе в кузове автомобиля, специально оборудованном для погрузки колесного хода с минометом и мин [3].

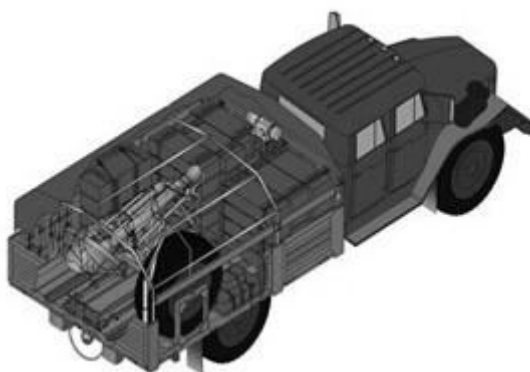


Рис. 5. Транспортировка миномета 2С12 в кузове автомобиля

Все приведенные варианты недостаточно мобильны при использовании в городских условиях.

Сочетание качеств вида вооружения и средства его передвижения приводит к естественному техническому решению о размещении 120-мм миномета вместе с боекомплектом на малотоннажном автоприцепе (МАП).

Один из вариантов минометного комплекса на базе прицепа был представлен в 2009 году в США. Сам миномет и боезапас смонтированы на одноосном прицепе М1101. Комплекс использует электрическую/гидравлическую систему для подъема, полностью собранного 200 кг. миномета в прицеп и из него. За три минуты артиллеристы успевают установить миномет (автоматически, по нажатию кнопки), сделать несколько выстрелов, свернуться и уехать.

В предлагаемом варианте за основу взят двухосный автоприцеп МЗСА 817730.012. Грузоподъемность прицепа, за счет использования торсионной подвески с гидроамортизаторами составляет 1750 килограмм, а полная масса – 2000 кг [4]. Автоприцеп может буксироваться легковым автомобилем, при этом орудийный расчет, состоящий из пяти человек, располагается в автомобиле-тягаче.

Прицеп позволяет перевозить до 10 боеукладок по 4 мины (рис. 6) в каждой и по три дополнительных заряда для каждой мины перевозимых в отдельных укупорках.

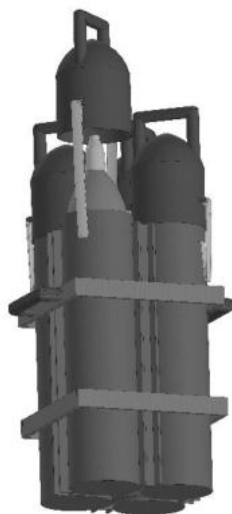


Рис. 6. Боеукладка

Боеукладки установлены вертикально, а мины расположены взрывателем вверх, боеукладки снабжены ручками для удобной выгрузки с прицепа и закреплены в основаниях ячеек с крепежной лентой для устойчивой

транспортировки, а также имеет крышки для защиты мин от воздействия внешней среды. Крышка имеет ручки и соединена с поддоном для удобного извлечения мины из боеукладки. Данный вариант транспортировки боекомплекта позволяет производить зарядание миномета прямо с прицепа, с любой из сторон, тем самым сократив время перевода в боевое положение и увеличив скорострельность.

На дышле прицепа располагается ящик с ЗИП для обслуживания или ремонта всего комплекса, так же прицеп снабжен тентом, защищающим кузов от дождя и грязи, шанцевым инструментом на бортах прицепа.

Использование МАП с управляемым сцепным устройством (рис. 7) для подруливания прицепа и осуществление движения задним ходом, позволяет создавать мобильные отряды быстрого реагирования, для выполнения боевых задач [5].

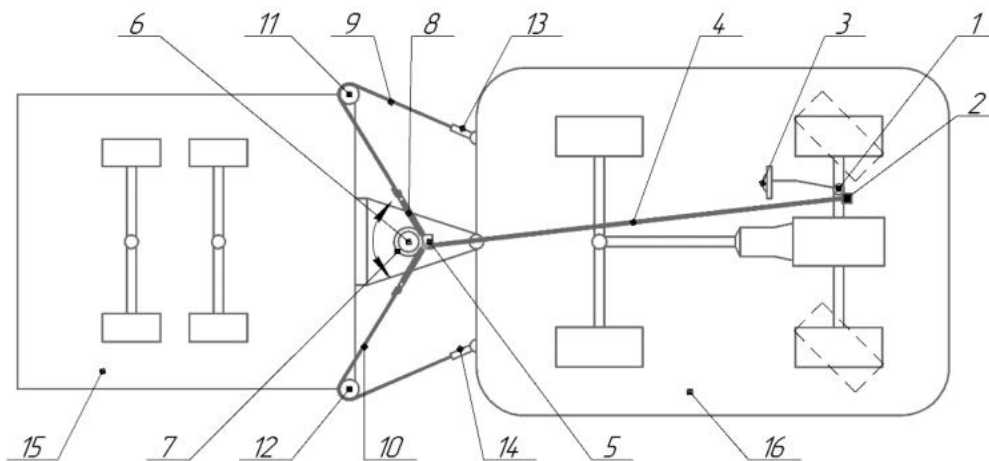


Рис. 7. Сцепное устройство с управляемой гибкой связью

- 1 – электро- или гидроусилитель руля;
 2 – блок управления усилителя руля; 3 – рулевое колесо автомобиля; 4 – кабель соединения блока управления усилителя руля с блоком управления электродвигателя прицепа; 5 – блок управления электродвигателем прицепа; 6 – электродвигатель (электроусилитель) прицепа; 7 – шкив зубчатый электродвигателя прицепа; 8 – цепь проходящая через шкив соединенная с тросом; 9, 10 – трос проходящий через ролики; 11, 12 – направляющие ролики; 13, 14 – регулятор длины троса; 15 – прицеп; 16 – автомобиль

Для стрельбы миномет сгружается с прицепа и устанавливается на грунт вручную, с помощью средств малой механизации, а именно крюка с пружиной (рис. 8), привода установщика с рукояткой (рис. 9) и установщика, для облегчения перевода из походного положения (рис. 10а) в боевое (рис. 10б) и обратно. Время операции установки миномета на грунт составляет 15 секунд. При необходимости миномет отсоединяется от установщика и выставляется на грунт с нужным количеством боеукладок с минами для длительной работы по целям или замаскироваться в тылу, при этом тягач с прицепом может уехать и пополнить боезапас.



Рис. 8. – Крюк подпружиненный

В качестве привода установщика был спроектирован одноступенчатый червячный редуктор со складывающейся рукояткой. Выбор червячного редуктора обусловлен его способностью к самоторможению и фиксации миномета в любом промежуточном положении, а также дешевизной и большим передаточным числом при малых габаритах.

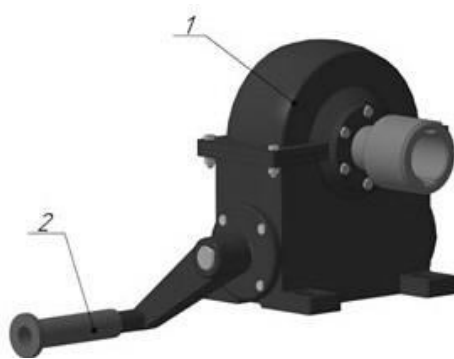


Рис. 9. – Привод установщика
1 – одноступенчатый червячный редуктор; 2 – складывающаяся рукоятка

Предлагаемое решение позволяет достичь, безопасности перевозки, простоту изготовления, не требует больших переделок автоприцепа, при сохранении прочности его конструкции. Обеспечивается быстрое развертывание миномета, а при необходимости быстрая смена огневой позиции для дальнейшей работы по цели [6].

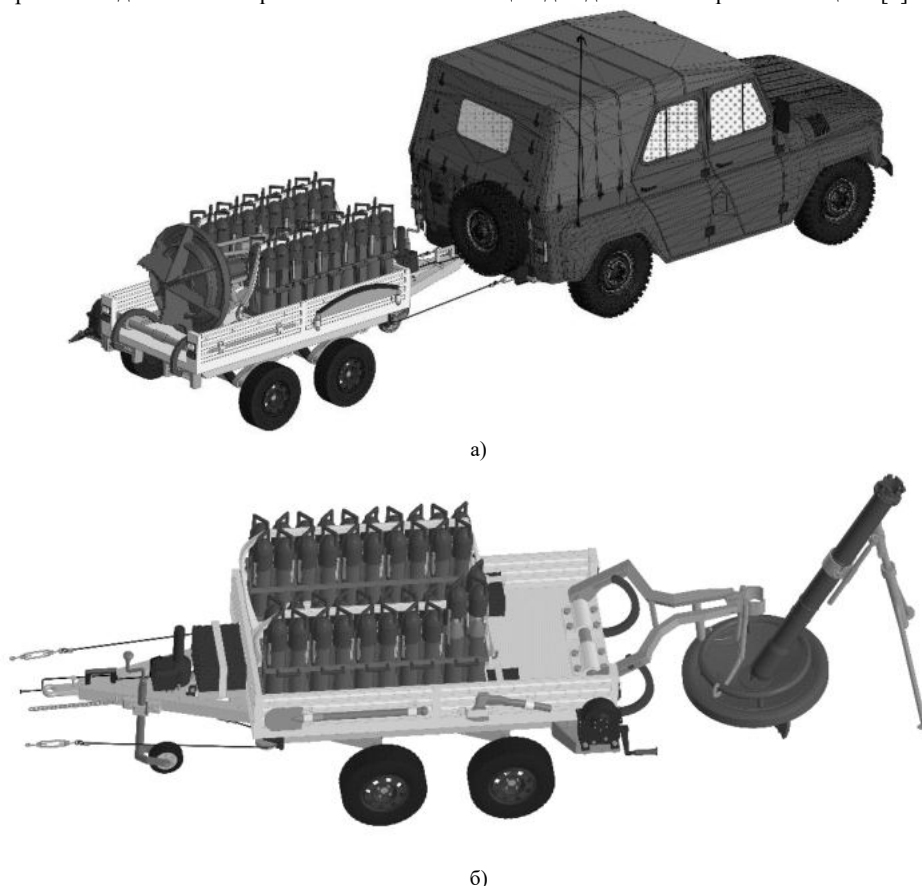


Рис. 10 Вариант создания 120-мм минометного комплекса: походное положение (а), боевое положение (б)

Библиографический список

1. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия. Часть I. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия: Учебник для вузов / Под ред. Чл.-кор. РАН А. А. Королева и чл.-кор. МАНПО В. Г. Кучерова; ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – 560 с.
2. 120-мм минометы обр. 1943 г и 1938 г. Руководство службы. 1946. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://arsenal-info.ru/b/book/2975772290/6>
3. Миномет 2Б11 комплекс 2С12 Сани [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://zen.yandex.ru/media/vjacheslav/minomet-2b11-kompleks-2s12-sani-5ba391145516df00a9d51057> (10.03.2022)
4. Прицеп двухосный МЗСА 817730.012 [Электронный ресурс] // Продажа легковых прицепов МЗСА Режим доступа: https://a-pricer.ru/catalog/pritsepy/mzsa_817730_012/
5. Михолап, Л. А. О некоторых особенностях оснащения глобальных групп при ведении боевых действий в городских условиях / Л. А. Михолап, Ю. Я. Комаров, В. А. Короляш, С. Р. Тывье // Научно технический сборник «Известия». - № 256, ч. 1.2. - М., 2015.
6. Коваленко Е.А. Размещение миномета среднего калибра на малотоннажном одноосном автоприцепе / Е.А. Коваленко, С.Е. Червонцев // Конкурс научно-исследовательских работ студентов ВолгГТУ – 2021. – С. 122-123.

АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА КОНДЕНСАТОРОВ ПАРА

О.О. Лебедев

АО «СПМБМ «Малахит»

Одним из основных составных единиц в системах и образцах техники с присутствием парового термодинамического цикла является конденсатор пара.

Конденсатор пара в современных паровых системах – крупногабаритный, объемный и металлоёмкий теплообменный аппарат по своим габаритам зачастую определяющий размеры помещений, в которых размещается.

В связи с этим актуальной задачей является задача исследования конструкции конденсатора пара и поиска путей оптимизации конструкции.

Традиционное техническое решение конструкции конденсатора пара, используемое в настоящее время – отработавший пар поступает на цилиндрический трубный пучок, состоящий из прямолинейных теплообменных трубок круглого сечения, внутри которых протекает охлаждающая вода. Пар движется от периферии к центру трубного пучка, взаимодействует с охлаждающей средой и конденсируется.

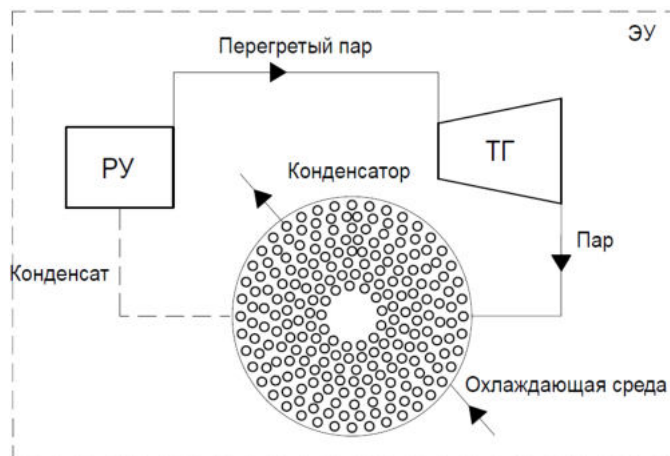


Рисунок 1. Традиционная конструкция конденсации

Одним из этапов исследования конструкции конденсатора пара является вопрос теплового расчета конденсатора как теплообменного аппарата.

Выполнение тепловых расчетов производится прежде всего для определения необходимой площади теплообменной поверхности и, соответственно, определения габаритов конструкции.

Теплообменная поверхность (её площадь) является одним из определяющих параметров в вопросе эффективности конструкции конденсатора пара. Расчет конденсатора пара заключается в определении необходимой площади поверхности теплообмена, обеспечивающей конденсацию заданного количества пара при определенных параметрах пара и охлаждающей воды.

Расчет площади теплообменной поверхности осуществляется по следующей зависимости:

$$Q_{конд} = k_t \cdot F_t \cdot \Delta t \quad (1),$$

где k_t – совокупный коэффициент теплообмена, F_t – площадь теплообменной поверхности, Δt – температурный напор.

При выполнении теплового расчета конденсатора величина $Q_{конд}$ является задаваемой в зависимости от параметров всей энергетической системы, величина Δt вычисляется в зависимости от параметров охлаждающей воды и параметров конденсации. Определяемым при расчета площади поверхности является коэффициент теплообмена k_t , зависящий от ряда факторов.

Существует несколько подходов к выполнению тепловых расчетов конденсаторов пара с разным набором входных параметров. Можно выделить следующие подходы:

1. Аналитический без разбивки пучка теплообменных трубок на зоны конденсации.

В разных технических источниках об исследовании и расчетах конденсаторов используются разные формулы расчета коэффициента k_t . В частности в книге О.О. Мильмана и Г.Г. Шкловера используется формула Л.Д. Бермана для определения коэффициента k_t [1]:

$$k = 4070 \cdot \alpha \cdot \Phi_\omega \Phi_t \Phi_\zeta \Phi_\delta \quad (2),$$

где α – коэффициент чистоты,

Φ – множители, учитывающие влияние скорости воды, её температуры на входе в конденсатор, число ходов по воде и удельной паровой нагрузки. Данная формула используется в руководящих указаниях по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций [2]. Применение данной формулы основывается на обобщенном опыте испытаний и эксплуатации конденсационных устройств. Положительной стороной используемой формулы является отсутствие большого количества переменных. В то же время недостатком её использования является её аналитический (общий) характер, не учитывающий физические свойства протекания процесса внутри трубного пучка конденсатора.

В том же источнике приводятся другие варианты расчета коэффициента теплообмена, используемые в зарубежных методиках. В основном они сводятся к поправке экспериментально полученного значения

коэффициента k_0 при помощи коэффициентов влияния в той или иной степени учитывающих параметры охлаждающей воды и тепловой нагрузки. К примеру формула, полученная во Франции для ТЭС:

$$k = 5800 \cdot x \cdot \omega_B^x \quad (3),$$

где $x=f(t_1)$ – функция, увеличивающаяся с ростом t_1 ; ω_B – скорость охлаждающей воды.

В том же источнике одним из вариантов расчета является вариант расчета коэффициента теплопередачи по классической схеме через расчет составляющих коэффициентов теплоотдачи охлаждающей воды, стенки теплообменных трубок и пара: $\alpha_B \alpha_{\text{ст}} \alpha_{\text{п}}$.

В данной методике расчета коэффициент теплообмена является постоянным для всего трубного пучка.

2. Позонный тепловой расчет.

В книге Алямовского М.И., Промыслова А.А. «Судовые конденсационные установки» рассмотрен метод позонного расчета с разбивкой конденсатора на секции с последующим определением средней арифметической температуры и составлением системы уравнений теплопередачи и баланса тепла.

Цель позонного теплового расчета – определение изменения воздухоудержания и удельной тепловой нагрузки в элементах (зонах) конденсации. Трубный пучок в данном случае разбивается на отдельные конечные участки (зоны) конденсации.

Основные этапы расчета:

- составление картины потока, то есть траектории движения паровоздушной смеси внутри трубного пучка;
- формирование зон конденсации на пути движения паровоздушной смеси;
- определение местных тепловых сопротивлений, т.е. коэффициентов теплообмена;
- определение местных тепловых нагрузок;
- расчет количества конденсирующегося пара в секциях;
- определение количества теплообменных трубок в секции, необходимого для конденсации пара в секции с учетом местных тепловых нагрузок;
- расчет суммарной тепловой нагрузки по пучку конденсатора и общего количества теплообменных трубок.

Позонный тепловой расчет является более трудоемким ввиду необходимости определения картины обтекания вокруг теплообменных трубок. Коэффициент теплообмена является переменным и вычисляется для каждой расчетной секции исходя из общей картины конденсации. Определенным недостатком позонного расчета является необходимость создания модели конденсации пара, что приводит к трудозатратам, но одновременно позволяет более точно определить параметры теплообмена.

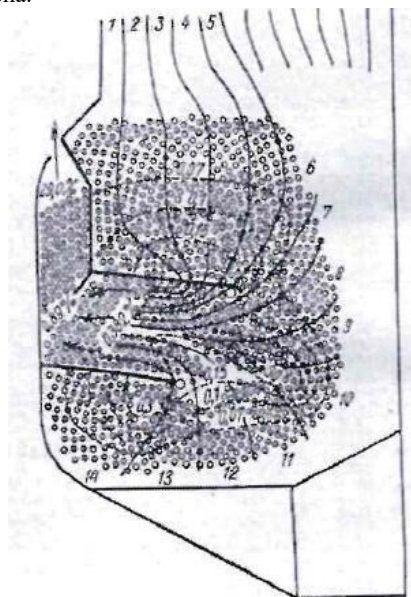


Рисунок 2. Схема обтекания

3. Послойный тепловой расчет.

Методика послойного теплового расчета является новым техническим предложением для выполнения теплогидравлических расчетов винтовых цилиндрических трубных пучков. Винтовой трубный пучок – новое техническое решение [4]. Способы формирования конструкции винтового конденсатора сводятся к следующему:

- теплообменные трубки закручены по винтовой траектории, что увеличивает теплообменную поверхность при сохранении общих габаритов трубного пучка;
- сечение теплообменных трубок - плоскоовальное с изменением степени овальности и направления оси овальности от периферии трубного пучка к центру для оптимизации значения скорости пара, причем в местах заделки труб в трудные доски сечение трубок имеет круглую форму.

В обеспечение проведения исследования и подтверждения эффективности предлагаемых технических решений разработана методика послойного теплогидравлического расчета [5].

Принцип послойного теплового расчета аналогичен принципу позонного расчета со следующим отличием – трубный пучок разбивается не на зоны конденсации, а на слои. Расчетный слой – ряд теплообменных трубок.

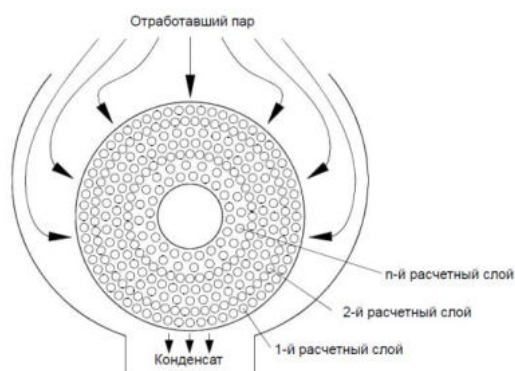


Рисунок 3 Цилиндрический трубный пучок

Алгоритм послойного теплового расчета винтового конденсатора заключается в следующем:

- трубный пучок конденсатора в поперечном сечении разбивается на слои, каждый из которых является рядом охлаждающих трубок на одном расчетном радиусе по направлению движения пара от периферии к центру трубного пучка;

- для каждого слоя (ряда трубок) производится тепловой расчет по схеме «охлаждающая вода – стенка трубки – паровоздушная смесь» («вода-стенка-пар»);

- на каждом слое определяются оптимальная конструкция охлаждающих трубок - овальность и угол закрутки, при которой обеспечивается отвод максимального количества тепла;

- после получения оптимальных параметров конструкции теплообменных трубок на слое производится переход на следующий (более нижний) слой, начальными параметрами расчета для которого являются значения, полученные на предыдущем слое. На основе алгоритма послойного теплового расчета разработано программа для ЭВМ [6].

Таким образом условно можно выделить три методики расчета трубных пучков конденсаторов пара:

	Тепловой расчет по Л. Д. Берману	Позонный тепловой расчет	Послойный теплогидравлический расчет
Коэффициент теплообмена kt	Постоянный	Переменный	Переменный
Необходимость определения модели конденсации	Нет	Да	Нет
Необходимость определения составляющих коэффициента kt -	Нет	Да	Да

Выводы:

1. Методика позонного теплового расчета обладает более высокой необходимой трудоемкостью выполнения в сравнении с методикой теплового расчета по Л.Д. Берману.

2. При проведении тепловых расчетов по методике послойного теплогидравлического расчета с использованием программы для ЭВМ для предварительного сравнения полученных результатов предпочтительным является сравнение с расчетом по методике Л.Д. Бермана.

Библиографический список

1. Шкловер Г.Г., Мильман О.О. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин. // М. Энергоатомиздат, 1985.
2. Руководящие указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций//М. Союзтехэнерго, 1982.
3. Алямовский М.И., Промыслов А.А. Судовые конденсационные установки.// Ленинград. Судпромгиз, 1962.
4. Лебедев О.О. Патент № 2725738 Трубный пучок конденсатора пара, 2020.
5. Лебедев О.О., Алгоритм расчета винтового конденсатора пара. // СПб. Судостроение № 5(852), 2020.
6. Лебедев О.О., Горбачев А.А., Конохов В.В. Свидетельство № 2022612204. Программа для ЭВМ. Теплогидравлический расчет трубного пучка конденсатора пара, 2022.

УДК 623.451.08

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУРЫ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ ОБЪЁМНО-ДЕТЕНИРУЮЩИХ БОЕПРИПАСОВ

Ф.В. Сирица, Д.И. Тирищук

АО «ГосМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка»

За последние пару десятилетий широкое распространение и применение нашли боеприпасы объёмного взрыва, отличающиеся от обычных повышенным уровнем фугасного и теплового поражения разнообразных мишеней. Опираясь на тактику последних вооружённых конфликтов современности, стоит отметить, что противоборствующие стороны стремятся к достижению контроля над населёнными пунктами, что неизбежно приводит к ведению городских боёв. В данных условиях осколочные и осколочно-фугасные боевые части демонстрируют низкую

эффективность ввиду склонности осколков к рикошету и к потере кинетической энергии при пробитии даже тонкой преграды. Наиболее эффективным является фугасное действие боевых частей, которое можно повысить путём замены классических конденсированных взрывчатых веществ на объёмно-детонирующие смеси.

Генетические алгоритмы – семейство поисковых алгоритмов, идеи которых подсказаны принципами эволюции в природе, они реализуют упрощённый вариант дарвиновской эволюции. Данные алгоритмы опираются на следующие принципы эволюционной теории Дарвина:

- изменчивость – признаки отдельных особей, входящих в состав популяции, могут изменяться;
- наследственность – некоторые свойства устойчиво передаются от особи к её потомкам;
- естественный отбор – особи, обладающие свойствами, лучше приспособленными к окружающей среде, более успешны в борьбе за выживание и приносят больше потомков в следующее поколение.

Важным механизмом эволюции является скрещивание (рекомбинация), т.е. приобретение потомком комбинации признаков своих родителей. Скрещивание помогает поддерживать разнообразие популяции и со временем закреплять лучшие признаки.

В любой момент времени генетический алгоритм хранит популяцию индивидуумов – набор потенциальных решений поставленной задачи, каждый из которых представлен набором хромосом. На каждой итерации алгоритма индивидуумы оцениваются с помощью функции приспособленности. Это делается один раз для начальной популяции, а затем для каждого нового поколения после применения операторов отбора, скрещивания и мутации [1].

Применительно к описываемой задаче оптимизации рецептуры состава энергоносителя:

- популяция – набор из нескольких вариантов энергоносителей;
- индивидуум – конкретный вариант энергоносителя;
- хромосома – отдельная характеристика энергоносителя;
- ген – значение ячейки хромосомы с известным положением;
- функция приспособленности – тротильный эквивалент массы энергоносителя, занимающей объём 1 м³.

После вычисления приспособленности всех индивидуумов в популяции начинается процесс отбора, определяющий, какие индивидуумы будут оставлены для создания потомков, образующих следующее поколение. Процесс отбора основан на оценке приспособленности индивидуумов. Отбор выполняется в начале каждой итерации цикла генетического алгоритма, чтобы выбрать из текущей популяции тех индивидуумов, которые станут родителями индивидуумов следующего поколения.

Оператор скрещивания (рекомбинации) соответствует биологическому скрещиванию при половом размножении. Он используется для комбинирования генетической информации двух индивидуумов, выступающих в роли родителей в процессе порождения потомков. Как правило, оператор скрещивания производится не всегда, а с некоторой вероятностью. Если скрещивание не применяется, то копии обоих родителей переходят в следующее поколение без изменения.

Оператор мутации – последний генетический оператор, применяемый при создании нового поколения. Он применяется к потомку, созданному в результате операций отбора и скрещивания. Операция мутации является недетерминированной, она выполняется с относительно низкой вероятностью, поскольку может ухудшить качество индивидуума, к которому применена.

Для решения поставленной задачи применяется метод турнирного отбора – из всей популяции отбираются в следующее поколение три индивидуума с наивысшим значением функции приспособленности. Такое число индивидуумов обусловлено с одной стороны повышением скорости определения приблизительного глобального экстремума функции приспособленности по сравнению с выбором одного или двух индивидуумов, с другой стороны ускоряет время выполнения расчёта ввиду повышения среднего значения хромосом следующего поколения индивидуумов.

Хромосома индивидуума представляет собой двоичную запись значения соответствующей характеристики смеси. Двоичная система счисления вместо десятичной выбрана в связи с большей скоростью сходимости результата, несмотря на скорость расчёта одной итерации, которая на 39% медленнее чем у алгоритма, основанного на десятичной системе счисления,

В алгоритме оптимизации используется одноточечное скрещивание, при котором в хромосомах обоих родителей случайным образом выбирается точка скрещивания. Гены одной хромосомы, расположенные справа от этой точки, обмениваются с точно так же расположенными генами аналогичной хромосомы другого индивидуума. Наглядно метод одноточечного скрещивания показан на рисунке 1, в данном случае точка скрещивания находится между 10 и 11 генами.

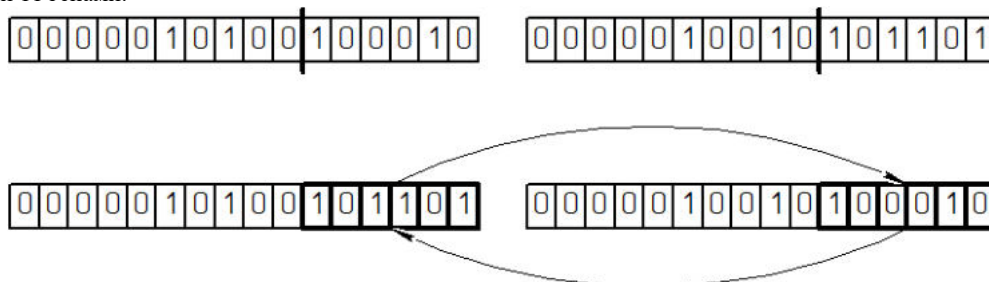


Рисунок 1 – Одноточечное скрещивание

Мутация осуществляется простым инвертированием случайного гена, принцип

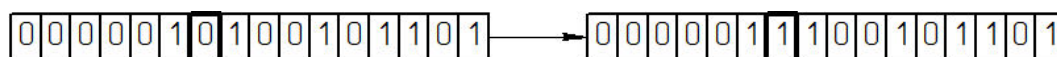


Рисунок 2 – Мутация инвертированием бита

Данный генетический алгоритм требует ввода следующих исходных данных:

- NKP_{min} – минимальное значение нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ);
- NKP_{max} – максимальное значение НКПВ;
- VKP_{min} – минимальное значение верхнего концентрационного предела воспламенения (ВКПВ);
- VKP_{max} – максимальное значение ВКПВ;
- P_S – количество индивидуумов в популяции;
- P_C – вероятность скрещивания;
- P_M – вероятность мутации;
- NG – максимальное количество поколений.

Граничные условия расчёта:

- расчёт прекращается по достижении максимального количества поколений NG ;
- значение НКПВ индивидуума должно удовлетворять условию $NKP_{min} \leq NKP_i \leq NKP_{max}$
- значение ВКПВ индивидуума должно удовлетворять условию $VKP_{min} \leq VKP_i \leq VKP_{max}$

Данный алгоритм воплощён в виде программы с графическим интерфейсом, окно которой представлено на рисунке 4.

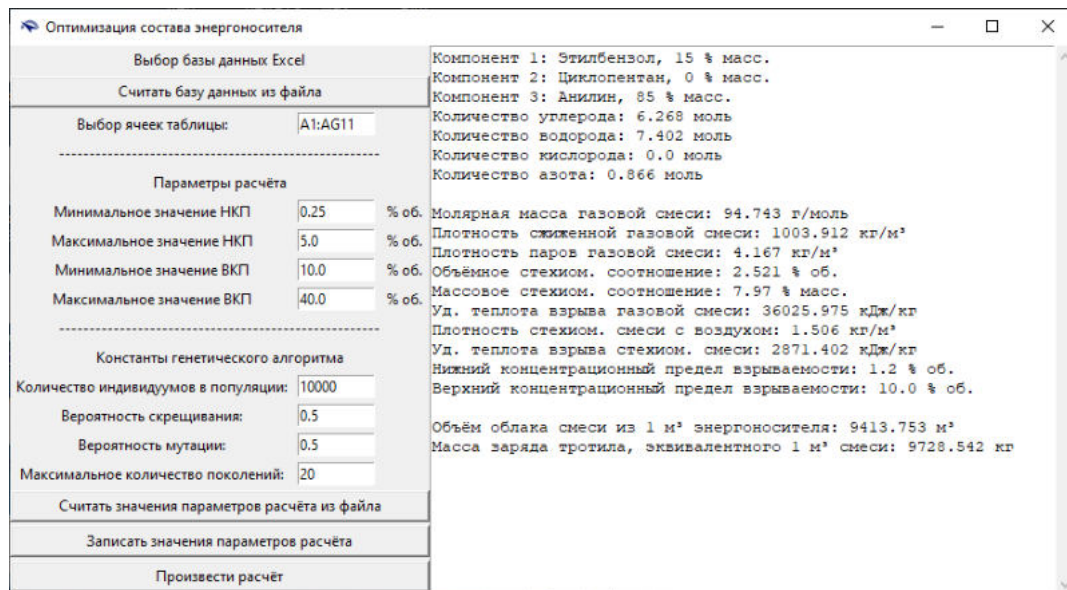


Рисунок 4 – Интерфейс программы с генетическим алгоритмом оптимизации

Оптимальный состав определяется как обладающий наибольшей массой эквивалентного заряда тротила для смеси в жидком агрегатном состоянии такой массы, которой она обладает при объёме 1 м^3 . Характеристики возможных компонентов состава (до трёх) заранее определены в базе данных, которой имеются значения таких характеристик возможных компонентов, как: a – количество углерода, моль; b – количество водорода, моль; c – количество кислорода, моль; d – количество азота, моль; RD_W – плотность по воде; RD_A – плотность паров компонента по воздуху; ΔH_0 – энтальпия образования; NKP – НКПВ; VKP – ВКПВ.

Каждый индивидуум представлен последовательностью из 5 хромосом различной длины, составленных из 29 генов, представленной на рисунке 5.

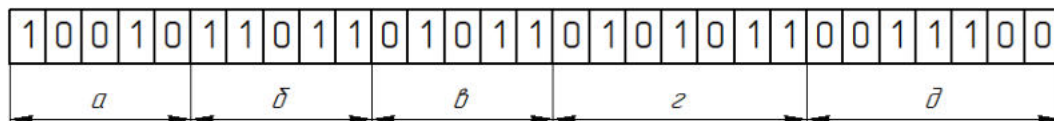


Рисунок 5 – Хромосомы индивидуума: a – индекс компонента 1, b – индекс компонента 2, c – индекс компонента 3 (из базы данных), z – массовая доля mk_1 компонента 1 в смеси, d – массовая доля mk_2 компонента 2 в смеси

Так, представленному индивидууму соответствует следующий состав:

- $10010_2 \rightarrow 18_{10}$, компонент 1 – нонан;
- $11011_2 \rightarrow 27_{10}$, компонент 2 – циклопентан;
- $01011_2 \rightarrow 11_{10}$, компонент 3 – метан;
- $0101011_2 \rightarrow 43_{10}$, содержание нонана составляет 43% масс.;
- $0011100_2 \rightarrow 28_{10}$, содержание циклопентана составляет 28% масс.;
- содержание метана, соответственно, $100 - 43 - 28 = 29\%$ масс.

Под значение массовой доли компонентов отведено 7 бит, таким образом, диапазон возможных значений составляет 0..127% масс. В случае, если значение компонента 1 находится в диапазоне $100 \leq mk_1 \leq 127$, то в таком случае расчёт производится для унитарного топлива, $mk_1 = 100$, $mk_2 = mk_3 = 0$. Если же $mk_1 < 100$, а $mk_2 > 100 - mk_1$, то $mk_3 = 0$, масса второго компонента $mk_2 = 100 - mk_1$, смесь становится двухкомпонентной. Наконец, если $mk_1 < 100$, $mk_2 < 100 - mk_1$, то $mk_3 = 100 - mk_1 - mk_2$, смесь трёхкомпонентная. Данный алгоритм наглядно показан в виде блок-схемы, изображённой на рисунке 6.

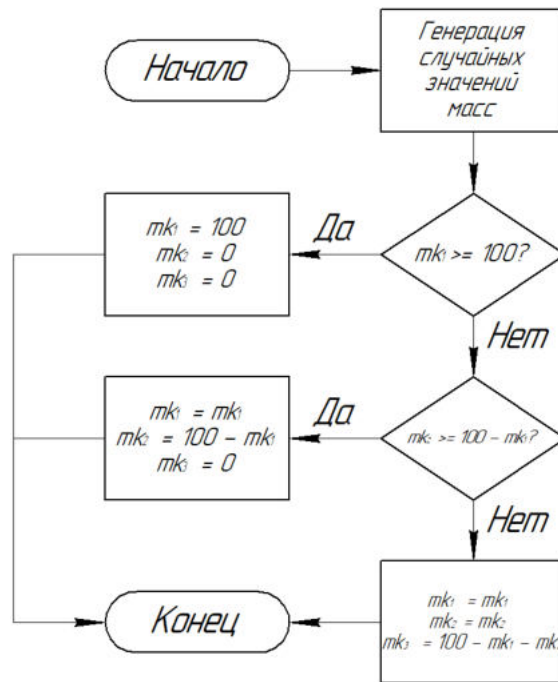


Рисунок 6 – Блок-схема расчёта массовых долей компонентов

Каждый компонент характеризуется информацией из базы данных, в которой содержатся исходные данные для 32 индивидуальных углеводородных топлив, количество определено длиной хромосомы, соответствующей индексу компонента в базе данных ($2^5 = 32$).

После считывания информации из базы данных программой производится расчёт по формулам (1) – (20). Расчёт производится для каждого индивидуума в каждом поколении, по результатам расчёта выбирается вариант рецептуры, обладающей наибольшим тротиловым эквивалентом по отношению к массе энергоносителя в жидком состоянии в объёме 1 м³.

Молярная масса каждого компонента [г/моль]:

$$\mu_i = 12 \cdot a + b + 16 \cdot c + 14 \cdot d \quad (1)$$

Количество каждого компонента [моль]:

$$g_i = \frac{mk_i}{\mu_i} \quad (2)$$

Мольная доля каждого компонента:

$$\mu d_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (3)$$

Количество молей углерода в смеси [моль]:

$$a_{см} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \mu d_i \quad (4)$$

Количество молей водорода в смеси [моль]:

$$b_{см} = \sum_{i=1}^n b_i \cdot \mu d_i \quad (5)$$

Количество молей кислорода в смеси [моль]:

$$c_{см} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \mu d_i \quad (6)$$

Количество молей азота в смеси [моль]:

$$d_{см} = \sum_{i=1}^n d_i \cdot \mu d_i \quad (7)$$

Плотность сжиженной газовой смеси [кг/м³]:

$$\rho_{сж} = \sum_{i=1}^n 997 \cdot RD_{W_i} \cdot \mu d_i \quad (8)$$

Плотность паров газовой смеси [кг/м³]:

$$\rho_{нап} = \sum_{i=1}^n 1,2754 \cdot RD_{A_i} \cdot \mu d_i \quad (9)$$

Значения НКПВ и ВКПВ смеси определяются согласно формуле Ле-Шателье [2]:

$$NKП_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{mk_i}{NKП_i}} \quad (10)$$

$$VKP_{cm} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{mk_i}{VKP_i}} \quad (11)$$

Молярная масса смеси [г/моль]:

$$\mu_{cm} = 12 \cdot a_{cm} + b_{cm} + 16 \cdot c_{cm} + 14 \cdot d_{cm} \quad (12)$$

Объёмное стехиометрическое соотношение смеси [% об.]:

$$C_{об.смх} = \frac{1}{1 + 2,381 \cdot (2 \cdot a_{cm} + 0,5 \cdot b_{cm} - c_{cm})} \quad (13)$$

Массовое стехиометрическое соотношение смеси [% масс.]:

$$C_{м.смх} = \frac{\mu_{cm}}{\mu_{cm} + 28,97 \cdot \frac{(2 \cdot a_{cm} + 0,5 \cdot b_{cm} - c_{cm})}{0,43}} \quad (14)$$

Энтальпия образования газовой смеси [Дж/моль]:

$$\Delta H_{0_{cm}} = \sum_{i=1}^n \mu d_i \cdot \Delta H_{0_i} \quad (15)$$

Удельная теплота сгорания газовой смеси [Дж/кг]:

$$Q = \frac{396900 \cdot a_{cm} + 121000 \cdot b_{cm} + \Delta H_{0_{cm}}}{\mu_{cm}} \quad (16)$$

где 396900 Дж/кг – теплота образования углекислого газа, 0,5·242000 – теплота образования водяного пара с учётом того, что в молекуле воды содержится два атома водорода.

Плотность стехиометрической смеси энергоносителя с воздухом [кг/м³]:

$$\rho_{смх} = C_{м.смх} \cdot \rho_{нар} + 1,2754 \cdot (1 - C_{м.смх}) \quad (17)$$

Удельная теплота сгорания стехиометрической смеси [Дж/кг]:

$$Q_{смх} = Q \cdot C_{м.смх} \quad (18)$$

Объём облака стехиометрической смеси из 1 м³ сжиженного энергоносителя:

$$V_0 = \frac{22,41 \cdot \rho_{сж}}{\mu_{cm} \cdot C_{об.смх}} \quad (19)$$

где 22,41 м³ – объём одного киломоля идеального газа.

Масса заряда тротила, эквивалентного энергии взрыва 1 м³ смеси [кг]:

$$m_T = \frac{\rho_{смх} \cdot V_0 \cdot Q_{смх}}{4184000} \quad (20)$$

где 4184000 Дж – теплота взрывчатого превращения 1 кг тротила [3].

При ограничениях НКПВ $NKP \in [0,25; 3,0]$ и ВКПВ $VKP \in [10,0; 40,0]$ близкой к оптимальной является рецептура, состоящая из 85% анилина C_6H_7N ГОСТ 5819-78 и 15% этилбензола C_8H_{10} ГОСТ 9385-2013, условная формула – $C_{6,268}H_{7,402}N_{0,866}$. Плотность рецептуры в жидком агрегатном состоянии составляет 1004 кг/м³, тротильный эквивалент смеси в объёме 1 м³ составляет 9728,5 кг. Пределы взрываемости – 1,2..10,0% об.

Сравнение оптимальной рецептуры энергоносителя с некоторыми унитарными аналогами энергоносителей представлено в таблице 1. Стоит учитывать, что представленные аналоги могут находиться в более узком диапазоне концентрационных пределов, заданным в граничных условиях, и вдобавок ко всему, оптимизированная рецептура обладает существенно большей энергией взрыва.

Таблица 1 – Сравнение оптимального энергоносителя с аналогами

Энергоноситель	Тротильный эквивалент массы энергоносителя в объёме 1 м ³ , кг	Отклонение от оптимизированного состава, %
Оксид этилена (оксиран)	5121,91	-47,35
Пропан	5160,42	-46,95
Метан	5969,63	-38,63
н-Гептан	6572,34	-32,43
Пиперилен	6736,47	-30,74
Толуол	7639,85	-21,46
Циклопентан	7712,12	-20,71

Таким образом, в работе подробно описан метод генетической оптимизации рецептуры энергоносителя для объёмно-детонирующих боеприпасов. Установлено, что новая рецептура обладает существенно большей энергией взрыва по сравнению с унитарными современными аналогами. В дальнейшем планируется адаптировать приведенный в работе метод для работы с большим количеством вариантов энергоносителей, а также провести сравнение времени решения задачи многокритериальной оптимизации с помощью различных методов с целью поиска наиболее эффективного с точки зрения затрат времени.

Библиографический список

1. Вирсански Э. Генетические алгоритмы на Python / пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 286 с.: илл.
2. Бабурин А.В., Бегитшев И.Р. Параметры взрывного горения пропан-бутановых смесей в окислительной среде кислорода и диоксида углерода. Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности". 2014 г., №3 (55). С. 1-10.
3. Гришкевич А.А., Маньковский Г.И. и др. Оценка мощности взрывов газопаровоздушных смесей при аварийных проливах сжиженного природного газа. Специализированный каталог «Пожарная безопасность», 2017. С. 46-52.

ДАТЧИК ОБОРОТОВ СНАРЯДА

В. А. Смекалов, Д. А. Кулиев

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

Появление «умных» снарядов воздушного подрыва АВМ (Air Burst Munition) дало новый толчок развитию малокалиберной артиллерии как за рубежом, так и в России. Сначала в Европе, а затем и в США были созданы артиллерийские снаряды с «интеллектуальной системой дистанционного подрыва» в калибре 25, 30, 35, 40 и 57 мм. Это дало возможность существенно повысить эффективность поражения воздушных, наземных и надводных целей. Особенно целесообразно их применение стало для борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами (БЛА), самолетами, вертолетами, противокорабельными ракетами, а также с малоразмерными быстроходными судами и пехотой [1].

Дистанция, на которой произойдет подрыв боеприпаса, как правило определяется определенным временным отрезком, который отсчитывается запрограммированным временным устройством. Начальная скорость боеприпаса при этом приравнивается к некоторому эталонному значению, хотя в реальности может значительно отличаться из-за износа канала ствола, отклонений массы метательного заряда и т.п. Возникает необходимость в устройствах, позволяющих измерить начальную скорость конкретного боеприпаса. При отклонении от номинальной скорости движения во взрыватель боеприпаса вносятся корректировки времени дистанционного действия, что теоретически приводит к уменьшению эллипса рассеивания подобных снарядов.

Такие иностранные разработки, как 35-мм артиллерийские боеприпасы AHEAD (Advanced Hit Efficiency And Destruction — «повышенная эффективность попадания и разрушения») и 40-мм осколочно-фугасные мины для автоматических гранатометов НТЕ309 [1], используют надульное устройство для измерения начальной скорости снаряда (рис. 1). Корректировка времени дистанционного действия передается во взрыватель при помощи индукционного программатора.

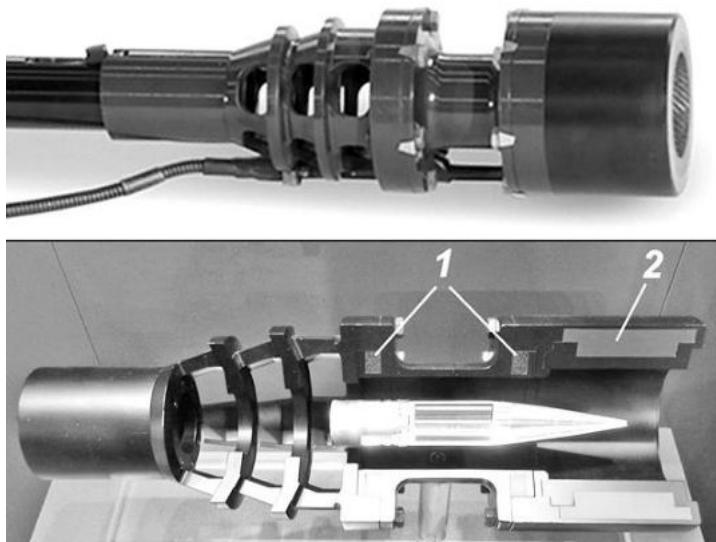


Рис. 1. Дульный тормоз с измерителем дульной скорости (1) и программатором подрыва снаряда (2) для пушки Oerlikon 35/1000

Новым шагом в развитии технологий программирования воздушного подрыва явилось создание 40-мм боеприпаса DM131. Для такого боеприпаса уже не требуется надульного индукционного программатора. Отличительной особенностью этого боеприпаса от других является то, что программирование времени подрыва осуществляется с помощью инфракрасного лазерного прожектора после вылета гранаты из ствола (рис. 2) [1].

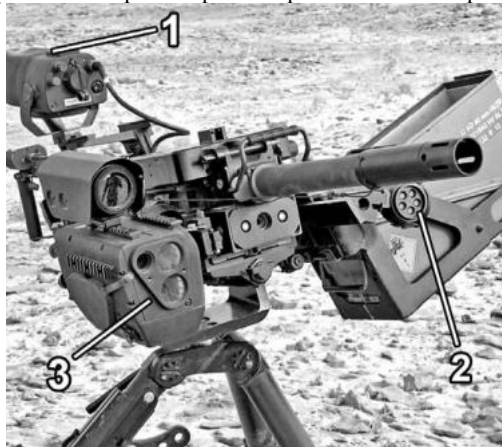


Рис. 2. 40-мм автоматический гранатомет НК GMG с системой Vingmate Advanced: 1 — дисплей; 2 — ИК-прожектор программатора; 3 — оптоэлектронная система с лазерным дальномером

Отдельного внимания заслуживает 30-мм программируемый боеприпас Mk310 PABM-T (Programmable Airburst Munition with Tracer – программируемый боеприпас воздушного подрыва с трассером). Отличительной особенностью системы воздушного подрыва боеприпасов Mk310 PABM-T компании ATK от боеприпасов ANEAD компании «Rheinmetall», является то, что измерение фактической начальной скорости и ее разброс учитываются не с помощью дульного измерителя скорости, установленного на стволе пушки, а на самом снаряде, косвенно по изменению угловой скорости вращения снаряда. Известно, что между начальной скоростью снаряда и частотой вращения, которые он приобретает, покидая ствол, существует прямая зависимость [2]. Таким образом, если после выстрела на снаряде измеряется угловая скорость его вращения, то можно достаточно точно определить его фактическую начальную скорость и далее скорректировать время подрыва [3].

Для измерения частоты вращения разработчики боеприпаса Mk310 PABM-T предлагают использовать магнитное поле Земли и магнитометр, размещаемый в корпусе снаряда. В качестве чувствительного элемента магнитометра можно использовать катушку индуктивности с сердечником, выполненным из электротехнической стали или из другого материала с высокой магнитной проницаемостью. Во время вращения снаряда при пересечении магнитометром силовых линий магнитного поля Земли в нем будет возникать переменная по величине электродвижущая сила (ЭДС), соответствующая угловой скорости вращения снаряда. Возникающая ЭДС усиливается и поступает в электронную схему сравнения во взрывателе. Используя полученную последовательность импульсов, электроника взрывателя подсчитывает накопленные обороты снаряда и, когда подсчитанные обороты совпадают с запрограммированными оборотами, вычисленными бортовой системой управления огнем и переданными на снаряд установщиком взрывателя, отправляет сигнал на подрыв детонатора [3].

Авторами статьи предложена структурная схема датчика оборотов для взрывателя 76-мм боеприпаса, основанная на магнитометре-катушке (рис. 3), проанализированы условия его работы в магнитном поле Земли, а также предложен вариант исполнения блока обработки сигналов с катушки-магнитометра.

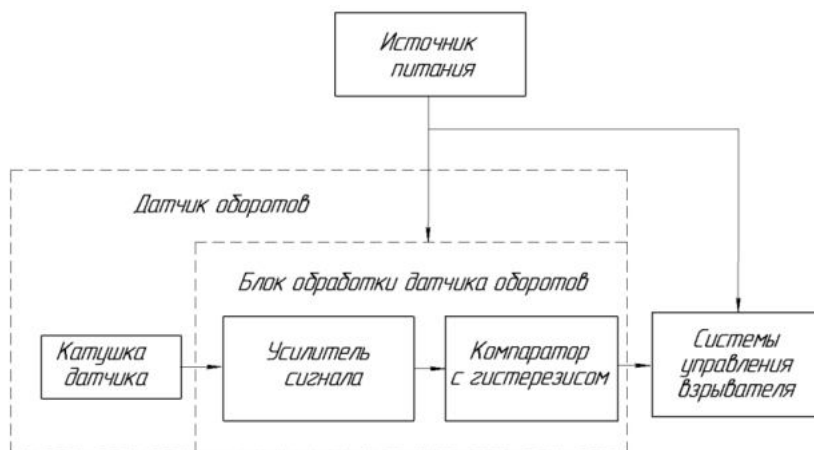


Рис. 3. Структурная схема датчика оборотов

Датчик оборотов можно условно разделить на две следующие части:

- Катушка-магнитометр датчика;
- Блок обработки сигнала с катушки.

Для определения уровня сигнала на катушке для оценки возможности его последующей обработки необходимо проанализировать условия работы датчика в магнитном поле Земли.

Условия работы датчика оборотов

Известно, что во вращающейся в магнитном поле катушке будет ЭДС, частота сигнала будет равна частоте вращения катушки [4]. ЭДС в общем виде будет определяться следующей формулой:

$$E = B \cdot \sin(\gamma) \cdot S \cdot N \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1)$$

где B – индукция магнитного поля, S – средняя площадь, охваченная одним витком катушки, γ – угол между линиями магнитной индукции и осью вращения катушки, N – число витков в катушке, ω – угловая частота вращения катушки.

Величина магнитного поля Земли колеблется между $(25 \div 65) \cdot 10^{-6}$ Тл (на широте 0° будет приблизительно $30 \cdot 10^{-6}$ Тл, а на широте 50° — $50 \cdot 10^{-6}$ Тл) [5]. Иными словами, индукция магнитного поля Земли возрастает при приближении к полюсам.

Ось вращения катушки и линии магнитной индукции образуют между собой угол γ , который зависит от направления стрельбы (в том числе угла возвышения ствола орудия) и от наклона линий магнитной индукции к поверхности Земли в конкретной ее точке (магнитного склонения). Магнитное склонение близко к нулю лишь в точках магнитного экватора и стремится к 90 градусам на магнитных полюсах [6]. Для упрощения расчетов примем допущение, что магнитный экватор и полюса совпадают с географическими. Тогда магнитное склонение на каждой широте можно считать приближенно равным этой широте.

Рассмотрим два пограничных случая условий работы датчика – стрельба в направлении параллели и в направлении меридиана.

Очевидно, что наилучшими условиями работы датчика является стрельба по параллели - в этом случае ось вращения катушки будет перпендикулярна линиям магнитного поля при любом угле возвышения ствола орудия. А амплитуда ЭДС на каждой широте будет максимальна и постоянна, ее значение будет определяться значением амплитуды магнитной индукции на конкретной широте.

В свою очередь стрельба по меридиана в сторону ближнего и дальнего полюсов для соответствующего полушария Земли имеет отличительные особенности, которые обозначены на рис. 4 и 5.

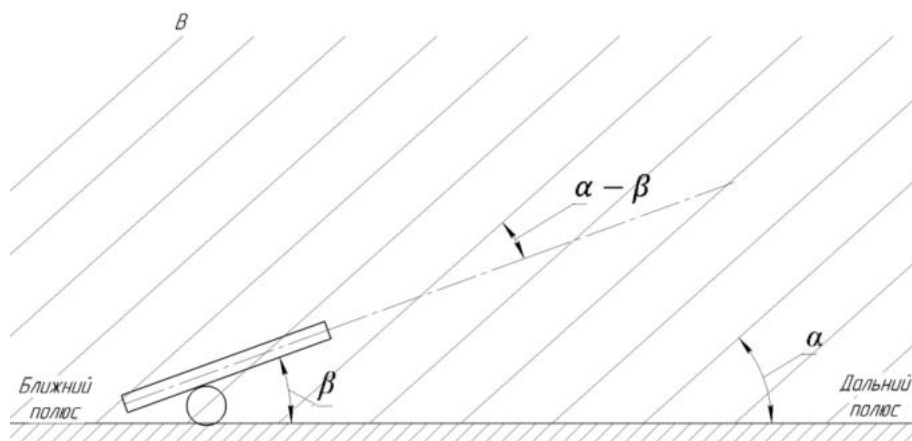


Рис. 4. Схема расположения ствола орудия в магнитном поле Земли при стрельбе по меридиану в сторону дальнего полюса (α – магнитное склонение, β – угол возвышения ствола орудия)

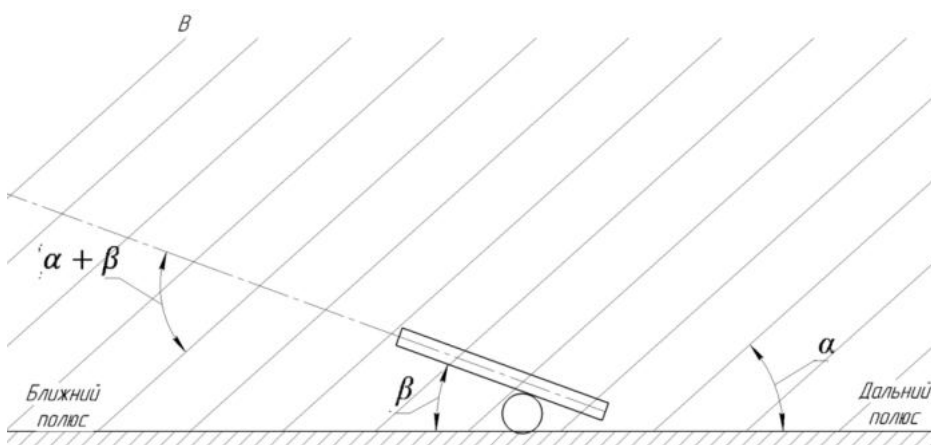


Рис. 5. Схема расположения ствола орудия в магнитном поле Земли при стрельбе по меридиану в сторону ближнего полюса (α – магнитное склонение, β – угол возвышения ствола орудия)

Рисунки наглядно демонстрируют, что ЭДС будет определяться направлением стрельбы, углом возвышения ствола орудия β и географическим положением орудия на Земле (от этого зависит амплитуда магнитной индукции и магнитное склонение).

На основании вышеизложенного формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$E = B_3 \cdot S \cdot N \cdot \omega_{\text{бп}} \cdot \sin(\omega_{\text{бп}} \cdot t) \cdot \begin{cases} |\sin(\alpha - \beta)|, \text{ при стрельбе в сторону дальнего полюса} \\ |\sin(\alpha + \beta)|, \text{ при стрельбе в сторону ближнего полюса} \\ 1, \text{ при стрельбе по параллели} \end{cases} \quad (2)$$

где B_3 – индукция магнитного поля Земли, S – средняя площадь, охваченная одним витком катушки, N – число витков катушки, $\omega_{\text{бп}}$ – угловая скорость вращения боеприпаса, α – широта (магнитное склонение), β – угол возвышения ствола орудия.

В табл. 1 представлены результаты рассчитанной по формуле (2) амплитуды ЭДС индукции на катушке со следующими параметрами:

- средняя площадь, охваченная одним витком катушки, $S=180 \text{ мм}^2$,
- число витков $N=2500$ (предполагается использовать провод малого сечения),
- угловая скорость $\omega_{\text{бп}}=3140 \text{ рад/с}$ (соответствует 30000 об/мин для 76-мм боеприпаса).

Табл. 1 – расчет амплитуды ЭДС в зависимости от положения катушки в пространстве

Широта (магнитное склонение) α	0°	30°	50°	90°
Индукция магнитного поля Земли, мкТл	30	45	50	65
Амплитуда ЭДС индукции в катушке при стрельбе в сторону ближнего / дальнего полюса по меридиану, мВ				
Угол возвышения ствола орудия β	30°	21,2 / 21,2	55,1 / 0,0	69,2 / 24,1
	45°	29,9 / 29,9	61,4 / 16,5	70,4 / 6,1
	60°	36,7 / 36,7	63,6 / 31,8	66,4 / 12,2
Стрельба по параллели		42,4	63,6	70,7
				91,9

Результаты расчета показывают, что при вращении в магнитном поле Земли катушки с выбранными параметрами на ней наводится достаточно сильный (от 6 до 90 мВ) сигнал, который может быть обработан. Тем не менее существует небольшая вероятность, когда сигнал будет практически нулевым.

Блок обработки датчика оборотов

В данном разделе рассмотрены варианты реализации составляющих блока обработки сигнала с катушки - усилителя сигналов и компаратора.

Усилитель сигнала может быть построен по любой «классической» схеме. В частности, в целях уменьшения габаритов конструкции, возможно использование усилителя с отрицательной обратной связью, построенного на операционном усилителе (ОУ). Схема такого усилителя представлена на рис. 6.

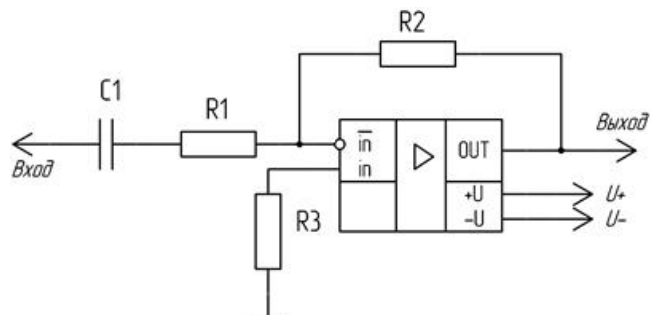


Рис. 6. Схема усилителя

Усилителем, а именно его коэффициентом усиления (КУ), определяется чувствительность датчика. Изменить КУ можно путем изменения отношения резисторов R1 и R2. Конденсатор C1 на входе усилителя обеспечивает усиление только переменной составляющей сигнала. Таким образом, постоянное напряжение через цепь усилителя не проходит.

Схема также обеспечивает частотную избирательность датчика за счет подавления нижних частот конденсатором C1. Подавление верхних частот обеспечивается инерционностью ОУ, за счет чего отпадает необходимость использовать дополнительные элементы.

Компаратор также может быть построен на базе ОУ. Это позволит использовать в конструкции датчика, например, сдвоенный ОУ, что позволит уменьшить занимаемое элементами место. Схема компаратора представлена на рис. 7.

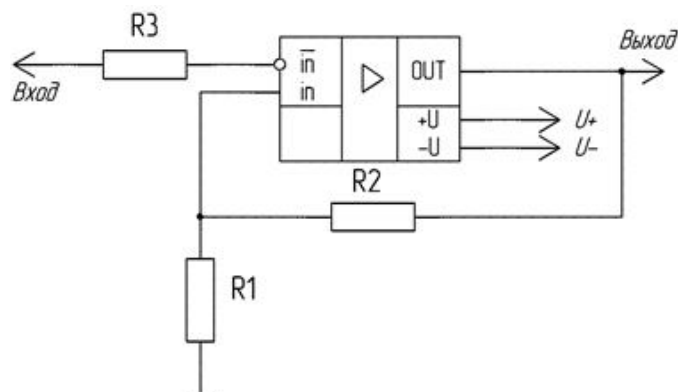


Рис. 7. Схема компаратора с гистерезисом

Данная схема представляет собой компаратор с гистерезисом. Гистерезис необходим для защиты от помех и настраивается отношением резисторов R1 и R2, это отношение в свою очередь влияет и на чувствительность датчика. Формула расчета пороговых значений напряжения компаратора с двухполярным симметричным питанием следующая:

$$U_{пор} = \frac{R1}{R1 + R2} \cdot U_{пит} \quad (3)$$

где $U_{пит}$ – напряжение питания компаратора.

Уровень полезного сигнала на входе компаратора за счет частотной избирательности усилителя будет значительно выше уровня помех. Использование компаратора с гистерезисом в таком случае приводит к тому, что помехи не влияют на сигнал на его выходе. Состояние компаратора переключается только под действием полезного сигнала.

На выходе компаратора образуются прямоугольные импульсы с частотой, равной частоте вращения датчика. Импульсы поступают в систему управления взрывателя и могут быть использованы для подсчета числа оборотов (подобно принципу работы изделия Mk310), корректировки времени дистанционного действия (путем пересчета угловой скорости в линейную с дальнейшим внесением поправочных коэффициентов) или в качестве датчика для телеметрии экспериментальных боеприпасов.

Библиографический список

1. Зубов В.Н. Перспективные европейские малокалиберные боеприпасы воздушного подрыва с программируемыми взрывателями // Известия РРАРАН. 2017. №4 (99).
2. Смирнов, А.П. Теоретические основы проектирования взрывателей. Ч.1. Силы и моменты в механизмах взрывателей при артиллерийском выстреле: учебное пособие / А.П. Смирнов, Е.Б. Грецова, С.А. Карпов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2019. – 156 с.
3. Зубов В.Н. Программируемые боеприпасы воздушного подрыва для американских малокалиберных пушек BUSHMASTER // По иностранному флоту. Журнал Военно-Морского Флота. Морской сборник № 1. 2019. С. 72 -79.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. –7-е изд., перераб. и доп. –М.: Высш. шк., 1978. –528с.
5. Л. Г. Касьяненко, А. Н. Пушков. Магнитное поле, океан и мы. Л., Гидрометеоиздат, 1987, 192 с.
6. Geomagnetism Frequently Asked Questions (англ.). [Электронный ресурс] // National Centers for Environmental Information (NCEI); URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>. (Дата обращения: 06 апреля 2022).

УДК 623.442

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЗЕЛЬ-ЭФФЕКТА ПРИ СОЗДАНИИ МОЩНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ВИНТОВОК

Антонова Н.В., Егоров В.В., Раикина Е.А., Тельминов В.В.

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Дизель эффект (оно же дизелирование) – один из способов повышения дульной энергии пневматического оружия. Отметим, что подобный способ применим только к пружинно-поршневым винтовкам с мощной пружиной, способной резко сжать воздух до температуры самовоспламенения масла.

Прежде чем рассматривать этот эффект в винтовке, обратимся к дизельному двигателю. Как известно, такой двигатель работает по принципу самовоспламенения распыленного топлива (керосина, мазута, масла) от воздействия газа (воздуха), разогретого при сжатии. В цилиндре происходит адиабатный процесс, то есть процесс, протекающий настолько быстро, что не осуществляется теплообмен с окружающей средой. Поршень сжимает газ, газ нагревается и воспламеняет горючее вещество. Тепловая энергия топлива преобразуется в механическую. В двигателе эта энергия необходима для возвратно-поступательного движения поршня, а в винтовке – для прохождения пули ствола и вылета из него с высокой начальной скоростью.

Дизелирование в пружинно-пневматическом оружии можно разделить на три вида:

1. Контролируемое.

Используется в спортивных пружинно-поршневых винтовках. Вспышка смазки происходит слабо и почти без вреда для винтовки (не сильно изнашивается манжета и почти не страдает пружина). Горючая смазка помещается в юбку пули непосредственно перед выстрелом (рис. 1.).

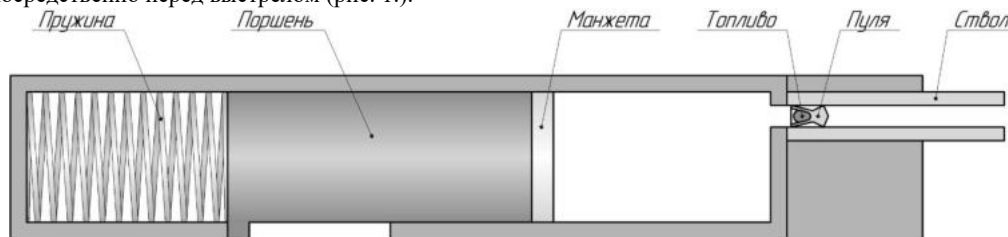


Рис. 1. Схема контролируемого дизелирования

2. Неконтролируемое.

Происходит воспламенение паров смазки в цилиндре мощных пружинно-поршневых винтовок. Такой эффект наблюдается, как правило, в мощных винтовках магнум и супермагнум классов или, как минимум, на тюнингovaných винтовках MP-512 и аналогичных. В винтовках мощностью до 7.5 Дж дизель эффект не столь значителен, чтобы вредить чему-то кроме пружины и, в ряде случаев, манжеты. При неконтролируемом дизелировании наблюдается пламя или искры из ствола, характерный запах горячей смазки и дым в стволе, повышенная отдача.

3. Непреднамеренное.

Проявляющееся при выгорании излишков смазки во время первых выстрелов после сборки винтовки. Так же этот эффект характерен для винтовок, у которых в объем компрессора открывается контакт с резиновыми уплотнителями, которые "пропитаны" смазкой. Даже после удаления всей смазки резина выделяет немного смазки при нагреве и создает легкий эффект дизеля. Это явление не опасно.

Как штатный режим работы оружия дизель эффект используется в мексиканских пневматических винтовках «Mendoza».

В винтовках «Mendoza» предусмотрен войлочный сальник, который устанавливается в кольцевую проточку. Это сальник пропитывается смазкой. Согласно информации от производителя, начальная скорость вылета пули варьируется в диапазоне от 250 м/с до 310 м/с при использовании пули «Crosman Premier 10,5» [1] (рис. 2).

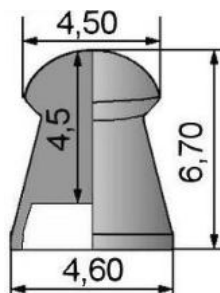


Рис. 2. Пуля с юбкой («Crosman Premier 10,5»)

Начальная скорость зависит от количества и характеристик смазки. Смазка добавляется через специальное отверстие (рис. 3) [2].

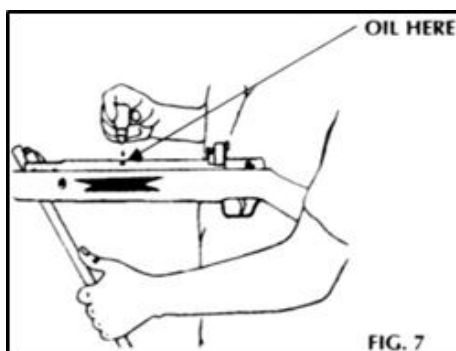


Рис. 3. Смазывание винтовки

Производитель рекомендует каждые 200 выстрелов смазывать винтовку, используя две капли специально изготовленного масла. Для пристрелки может понадобиться до 1000 пробных выстрелов.

При нежелании пользователя использовать дизель эффект, можно убрать сальник с поршня, в таком случае винтовка будет работать в обычном пружинно-поршневом режиме, и начальная скорость сократится до 210 м/с.

На рис. 4 и 5 представлены модели мексиканских винтовок фирмы «Mendoza», использующие дизелирование в качестве штатного режима, а характеристики в таблице [3, 4].



Рис. 4. Mendoza RM 2300



Рис. 5. Mendoza RM 600

Таблица – Характеристики винтовок Mendoza RM 600 и Mendoza RM 2300

Модель	Mendoza RM 600	Mendoza RM 2300
Тип пневматики	пружинно-поршневая	
Тип заряжания	переломом ствола	
Длина винтовки, мм	1150	1143
Длина ствола, мм	470	
Скорость пули, м/с (калибр 4,5мм / 5,5 мм)	290/-	304 / 259
Мощность, Дж (калибр 4,5мм / 5,5мм)	н/д	26,8 / 34,8
Тип ствола	н/д	нарезной
Количество нарезов	н/д	12
Материал ствола	сталь	
Материал ложа	орех	красное дерево
Наличие предохранителя	есть	
Тип предохранителя	автоматический	
Тип крепления оптики	ласточкин хвост, 11 мм	
Прицельные приспособления	целик, мушка	

Основные достоинства использования дизель-эффекта в пневматических винтовках заключается в:

- увеличении начальной скорости пули;
- и, соответственно, увеличении энергии выстрела.

Достоинства уравновешиваются значительным количеством недостатков при использовании:

1. При сгорании топлива образуются твёрдые вещества (сажа), которые оседают в канале ствола и на деталях в полости цилиндра (нагар). Загрязнение приводит к изменению характеристик винтовки и требует более частой чистки в сравнении с классическими пневматическими винтовками.

2. Невозможно сжигать строго одинаковое количество топлива, что приводит к большому разбросу начальной скорости пуль (может доходить до 20 м/с). Нагар и нестабильность начальной скорости приводят к снижению кучности стрельбы.

3. Во время дизелирования происходит резкое увеличение нагрузки на детали винтовки (приближаясь к нагрузкам в огнестрельном оружии), в основном на манжету, поршень и пружину, что может привести к поломке этих деталей.

4. При дизель-эффекте скорость пули малого веса может превышать скорость звука, что негативно влияет на предсказуемость траектории и стабильность полёта самой пули (так как большинство пуль для пневматического оружия рассчитано на дозвуковую скорость).

5. При излишнем использовании смазки может наблюдаться сильное повышение громкости выстрела, дым, искры и даже огонь из ствола оружия (неполное сгорание смазки).

Указанные недостатки дизелирования могут быть частично устранены.

Для повышения стабильности начальной скорости пули и, соответственно, увеличения кучности стрельбы необходимо избавиться от загрязнения ствола и механизмов винтовки, что возможно при своевременной чистке винтовки.

В процессе сгорания топлива (масла) образуется твёрдое вещество – сажа. Сажа – это продукт неполного сгорания топлива, который образуется при недостаточной температуре горения и/или недостатке кислорода. Правильное проектирование винтовки, изначально рассчитанное на дизелирование, позволит вероятно исключить (значительно уменьшить) эти факторы.

Нестабильность начальной скорости пули возникает вследствие невозможности точно отмерить одинаковое количество топлива при каждом выстреле, то единственный путь решения этой проблемы – дозированная подача горючего вещества.

В настоящее время самым оптимальным вариантом добавления смазки является нанесение её в малом количестве на юбку пули. В таком случае большая часть энергии, выделяемой при дизель-эффекте (сгорание за пульёй), идёт на увеличение кинетической энергии пули. При добавлении большого количества смазки в цилиндр происходит резкий рост давления в нём, что может привести даже к нарушению его целостности (раздуванию стенок). Помимо этого, энергия двигает поршень в обратную сторону, негативно воздействуя на пружину, вследствие этого её витки ближе прижимаются друг к другу и, таким образом, уменьшается количество запасённой в пружине энергии (снижается жёсткость пружины), а значит, снижается и мощность винтовки.

Излишняя громкость выстрела, дым и искры из ствола, а также скорое изнашивание элементов винтовки могут быть устранены, как правильным проектированием (достаточная длина ствола, рациональные соотношения параметров поршня, цилиндра, пружины и количества смазки), так и наддульными устройствами для снижения шума выстрела.

Библиографический список

1. Пули Crosman Premier 10,5 [Электронный ресурс] / Сайт сети оружейных магазинов «Airgun» – Режим доступа: https://www.air-gun.ru/social/readtopic/puli_crosman_premier_105_, свободный (дата обращения: 25.03.2022).
2. Mendoza rifles owner's manual [Электронный ресурс] Руководство пользователя винтовок серии Mendoza – Режим доступа: https://www.pyramydair.com/airgun-resources/manuals/Mendoza_Rifle_Manuals.pdf, свободный (дата обращения: 25.03.2022).
3. Пневматическая винтовка Mendoza RM 2300 [Электронный ресурс] / Клуб любителей пневматического оружия – Режим доступа: <http://pulek.net/?p=35>, свободный (дата обращения: 25.03.2022).
4. Пневматическая винтовка Mendoza RM 600 [Электронный ресурс] / Клуб любителей пневматического оружия – Режим доступа: <http://pulek.net/?p=24>, свободный (дата обращения: 25.03.2022).

УДК 623.51

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЖУХА ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ЖЕСТКОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СТВОЛА 115-ММ ОРУДИЯ

Н.Д. Козырев¹

Научный руководитель В.В. Егоров²

¹. АО «ЦНИИМ»

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

Качественным прорывом в развитии танковых пушек стало появление гладкоствольных орудий, позволявших значительно увеличить начальную скорость снаряда при меньшем весе самого орудия, хотя и отличавшихся значительным снижением точности при стрельбе на большие расстояния. В последнее время приоритет отдаётся именно таким орудиям.

Целью данной работы будет исследование влияния кожуха из алюминиевого сплава на прочностные и жесткостные параметры ствола 115-мм орудия.

Для кожуха из алюминиевого сплава был выбран участок ствола от начала конусной части до места среза материала так, чтобы сохранялась минимальная рекомендованная толщина стенки ствола. Через программу «КОМПАС» был срезан выбранный участок ствола и определена его масса. Мы заменили стальную часть на алюминиевый сплав, сохраняя ту же массу.

На полученном кожухе из алюминиевого сплава в начале конусной части нарастили фланец для дальнейшего скрепления (рис. 1). Скреплять будем со стальным кожухом, который находится на камерной части на длине от казенного среза до начала кожуха из алюминиевого сплава, то есть, до начала конусной части. Соответственно, нарастили фланец на стальном кожухе на месте скрепления с кожухом из алюминиевого сплава (рис. 2).



Рис. 1. Кожух из алюминиевого сплава с фланцем



Рис. 2. Стальной кожух с фланцем

В итоге получили сборку из ствола и двух кожухов для дальнейших расчётов (рис. 3). Также для проверки ствола на изгиб обрезали ствол со стороны камерной части до консоли (рис. 4). Для того, чтобы можно было сравнивать результаты – обрежем на ту же длину исходный ствол, на котором кожухов нет (рис. 5).



Рис. 3. Сборка ствола с кожухами

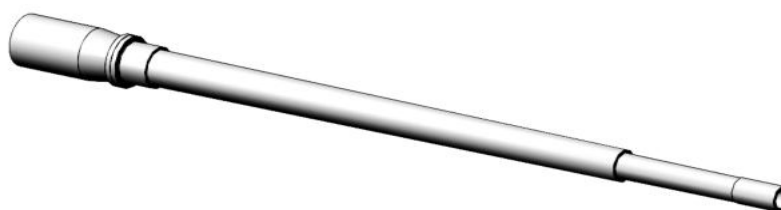


Рис. 4. Сборка ствола с кожухами, обрезанная до консольной части



Рис. 5. Исходный ствол, обрезанный до консольной части

Задав необходимые параметры в программе «ANSYS Workbench» (контакты, фиксацию и силу тяжести), проверили исходный ствол, обрезанный до консольной части и сборку ствола с кожухами, обрезанную до консольной части, на изгиб. Результаты между собой сильно не отличались – изгиб сборки примерно на 4% (0,14 мм) меньше, чем исходного ствола.

Также было посчитано напряжение в стволе для обоих случаев. Как и в случае с изгибом, результаты между собой практически не отличались.

Далее было необходимо определить тепловое состояние ствола. Для его определения, в программе «КОМПАС», разбив на равные отрезки (сектора) ствол от начала нарезной части до дульного среза, получили модели ствола-моноблока (рис. 6) и исходного ствола для сборки (рис. 7), с которым после произведем сборку (рис. 8).



Рис. 6. Ствол-моноблок, разделенный на сектора



Рис. 7. Исходный ствол, разделенный на сектора



Рис. 8. Сборка ствола, разделенного на сектора

При использовании программы «АРЕС» [6], которая позволяет рассчитать тепловое состояние после серии выстрелов, вносились данные по кривым давлений, посчитанные в работе по внутренней баллистике [1]. В результате чего были получены результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчёта нагрева в программе «АРЕС»

Перед выстрелом №	Внутренняя температура, С° (нарезы полн, гл)	Наружная температура, С° (нарезы полн, гл)	Внутренняя температура, С° (дул срез)	Наружная температура, С° (дул срез)
1	15,0	15,0	15,0	15,0
2	25,8	15,0	27,9	27,3
3	32,9	15,0	40,2	39,6
4	38,4	15,1	52,3	51,7
5	43,0	15,2	64,3	63,6
6	46,9	15,4	76,0	75,3
7	50,4	15,8	87,6	86,9
8	53,5	16,3	98,9	98,2
9	56,4	16,9	110,1	109,4
10	59,0	17,5	121,1	120,3
11	61,5	18,3	131,9	131,1
12	63,8	19,2	142,5	141,7
13	66,0	20,1	153,0	152,2
14	68,0	21,1	163,3	162,5
15	70,0	22,1	173,4	172,6
16	71,9	23,2	183,3	182,5
17	73,7	24,3	193,1	192,3
18	75,4	25,4	202,8	201,9
19	77,1	26,6	212,3	211,4
20	78,8	27,8	221,6	220,7
21	80,4	29,0	230,8	229,9
22	81,9	30,3	239,8	238,9
23	83,5	31,5	248,7	247,8
24	85,0	32,8	257,4	256,5

25	86,5	34,1	266,1	265,1
26	87,9	35,4	274,5	273,6
27	89,4	36,7	282,9	281,9
28	90,8	38,0	291,1	290,1
29	92,2	39,3	299,1	298,2
30	93,6	40,6	307,1	306,1
31	95,0	41,9	315,0	313,9
32	96,4	43,2	322,7	321,6
33	97,7	44,5	330,3	329,2
34	99,1	45,8	337,7	336,7
35	100,5	47,1	337,7	336,7
36	101,8	48,5	352,3	351,2
37	103,1	49,8	359,5	358,8
38	104,5	51,1	366,5	365,4

В программе «ANSYS» для сборки и исходного ствола мы смоделировали аналогичную ситуацию, задав тепловой поток, при котором за то же количество выстрелов будет аналогичная температура на соответствующих участках, как в табл. 1.

В итоге получим результаты расчёта нагрева для сборки и исходного ствола. Обратим внимание на сечение кожуха из алюминиевого сплава (рис. 9), а также приблизим аналогичный участок ствола-моноблока (рис. 10).

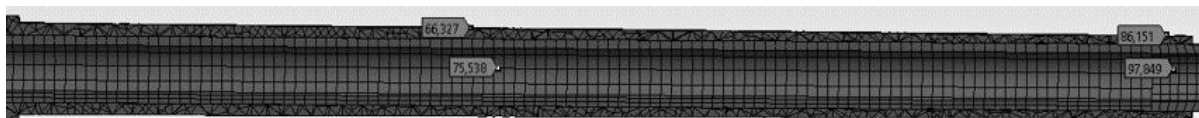


Рис. 9. Результаты расчёта нагрева для сборки

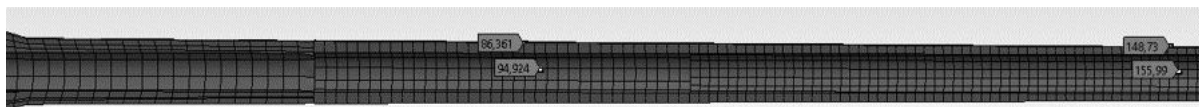


Рис. 10. Результаты расчёта нагрева для ствола-моноблока

Из рис. 9-10 видно, что температура кожуха из алюминиевого сплава и стальной трубы в нём в целом меньше, чем как если бы кожуха не было (табл. 2). Однако, температура на дульном утолщении остается такой же большой.

Таблица 2. Результаты расчёта нагрева в разных сечениях

	№ сечения	Внутренняя t, С°	Наружная t, С°
Сборка	1	75,5	66,3
Исходный ствол		95	86,3
Сборка	2	97,8	86,1
Исходный ствол		156	148,8

В перспективе же, эти данные можно будет использовать, как основание для дальнейшего исследования, которое приведет к повышению эффективности орудия. В дополнение, хочется заметить, что если решить вопрос с повышенной температурой на дульном утолщении, то можно добиться увеличения темпа стрельбы и/или повысить кучность за счет уменьшения тепловых деформаций, тем самым повысив боевую эффективность орудия.

Библиографический список

1. Зайцев А.С. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий: учебник. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 388 с.
2. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия. Под редакцией А.А. Королева и В.Г. Кучерова, Волгоград, Изд. «Политехник», 2003. 559с
3. Пояснительная записка к курсовой работе по внутренней баллистике / Автор Козырев Н.Д.
4. Белецкий В.М. 2005 Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение. 365 с.
5. 115-мм танковая пушка У-5ТС (2А20) – техническое описание и инструкция по эксплуатации.
6. Пакет прикладных программ «АРЕС», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Кафедра Е1.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБОВ МАРКИРОВКИ ИЗДЕЛИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАК ФАКТОР
УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ**

*Е.А. Еськова, Г.О. Акимин, Е.В. Костюк
Научный руководитель – П.М. Винник*

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

Боевые характеристики стрелкового оружия в целом во многом определяются качеством изготовления металлических элементов патронов (гильз и пуль), то есть величиной разброса геометрических характеристик и характеристик механических свойств.

Технологические процессы изготовления металлических элементов патронов ввиду массового характера производства предусматривают широкое использование холодноштамповочных операций, на которых производится формоизменение заготовки и формирование ее механических свойств.

Известно наличие качественной зависимости тактико-технических характеристик боеприпасов от величины доверительных интервалов геометрических размеров и характеристик механических свойств. Однако математическая модель зависимости отсутствует.

Разработка математической модели даст возможность, во-первых, прогнозировать степень повышения тактико-технических характеристик стрелкового оружия в зависимости от тех или других усовершенствований технологического процесса изготовления металлических элементов боеприпасов.

Создание математической модели на начальном этапе предполагает сбор экспериментальных данных путем отслеживания геометрических размеров каждого изделия (толщины стенки в определенных сечениях) выборочной партии после каждой формоизменяющей операции.

Моделирование процессов жизненного цикла изделий является важной и актуальной задачей, которую приходится решать при проведении научных исследований для совершенствования уже существующих технологических процессов, так и при проектировании новых технологических процессов военной отрасли. Поэтому в результате проведения исследований будет предложен переход от модели отслеживания изменений в технологическом процессе после фактического применения тех или иных нововведений, к комплексной модели, позволяющей заранее спрогнозировать степень повышения тактико-технических характеристик стрелкового оружия.

Перед тем как перейти к глобальной проблеме создания математической модели была рассмотрена проблема маркировки специальных изделий. Маркировка необходима для отслеживания изменений геометрических параметров и механических свойств каждого конкретного изделия с целью проведения анализа и сопоставления процессов формирования готового изделия и результатов проведения испытаний на тактико-технические характеристики выстрелов.

В конце эксперимента планируется получение готовых патронов для отстреливания с фиксацией результатов выстрела. Для обработки данных, позволяющих создать математическую модель, понадобится проведение испытаний изделий с фотофиксацией выстрелов партии. Предполагаемый порядок проведения испытаний: на мишени, краской отмечается порядок выстрелов, после собираются гильзы, снимается окалина, происходит осмотр маркировки изделия и сверка с протоколами, в которых записаны результаты измерения геометрических характеристик после каждой операции.

Итак, для создания математической модели, позволяющей провести оценку и прогнозирование значений тактико-технических характеристик специальных изделий, на начальном этапе, были рассмотрены следующие виды маркировки:

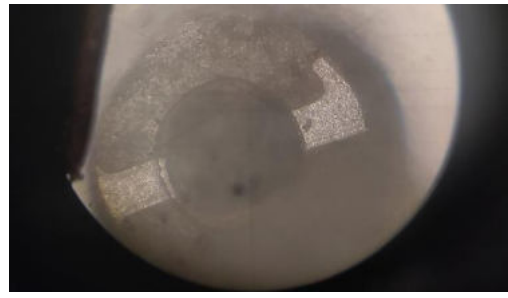
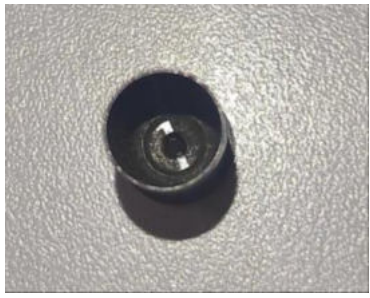
- нанесения идентификационного номера лазером (лазерная маркировка - нанесение идентификационных изображений на детали с использованием лазерного излучения) [1], [2];
- использование электроэрозионной «ручки» (электроэрозионная резка металлов - воздействие на металлы электрическими разрядами (импульсами), которые возникают между электродом и поверхностью заготовки, вследствие чего на материале и появляется необходимый идентификационный номер).

На рисунке 1 представлены гильзы с нанесением идентификационного номера с помощью лазера и «ручки».

Так как для получения заданных механических характеристик кроме формоизменяющих операций используются термические операции, что может привести к выгоранию наружного слоя металла, была необходима проверка возможности применения выбранных способов маркировки изделий специального назначения. Для этого выбрана термическая операция с максимальной температурой. Ниже приведены фотографии изделий после термообработки (Рис. 2).

По фотографиям видно, что верхний слой хоть выгорел, но все еще виден идентификационный номер. Таким образом, можно сделать вывод, что использование как лазерной обработки, так и электроэрозионной, возможно при научном исследовании в патронно-гильзовом производстве. Однако электроэрозионный способ обладает преимуществом в виду более простого и удобного нанесения и отсутствия силового воздействия на материал, т.е. можно без опасений обрабатывать тонкостенные изделия (гильза – полое тонкостенное изделие с массивным дном [3]).

Далее, для принятия окончательного решения, необходимы исследования влияния выбранного способа маркировки на механические характеристики выстрелов, и уже на основе этого будет принято решение какой из методов использовать для создания математической модели прогнозирования тактико-технических характеристик выстрелов.



а)



б)

Рисунок 1 – Промаркированные гильзы с помощью лазера и «ручки»: а) пистолетная гильза (вид сверху и под микроскопом); б) винтовочные гильзы



а)



б)

Рисунок 2 – Гильзы после проведения термообработки

Библиографический список

1. Лазерная маркировка в машиностроении / Д. А. Башмаков, А. Т. Галиакбаров, А. Т. Габдрахманов, А. Д. Самигуллин // Естественные и технические науки. – 2018. – № 11(125). – С. 298-300.
2. Кончус, Д. А. Особенности лазерной маркировки металлических изделий / Д. А. Кончус, А. В. Сивенков, Е. И. Пряхин // Информационно-технологический вестник. – 2020. – № 1(23). – С. 157-164.
3. Агеев Н.П., Зиновкин В.И., Масляев Н.М. Справочник по технологии патронного производства: в 2 т. Т.2 - СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2011. – 345 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА НА ОПЕРАЦИИ ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ

А.И. Олехвер, Е.Ю. Ремшев, Д.Е. Воеводина

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, ООО «НДПС», ООО «Технология Е-4»

Технологические процессы обработки металлов давлением сопровождаются неравномерностью деформации – непостоянством деформации по ширине, высоте и длине деформируемых изделий. Неравномерность деформации определяется рядом факторов: формой заготовки и инструмента, неоднородностью химического состава металла и температуры по объему тела, наличием трения на контактной поверхности, упругими деформациями инструмента и др. Степень неравномерности деформации существенным образом влияет на качество изделия после обработки. [1-3]

На операции вытяжка с утонением, которая широко применяется для изготовления изделий гражданского и специального назначения, имеет место неравномерного распределения степени деформации, который может приводить к неравномерности механических свойств по толщине стенки. [4] Этот эффект может иметь как положительные, так и отрицательные последствия, например, приводить к высокому уровню твердости материала поверхностного слоя, но к снижению запаса пластичности и при определенных условиях разрушению.

Анализ исследований в области неоднородности распределения степени деформации при вытяжке с утонением показывает, что основными факторами, влияющими на неравномерность деформации, являются геометрия рабочего инструмента (вытяжной матрицы) и трение на его рабочих поверхностях. [4-6]

Для оценки формирования при различных вариантах геометрии инструмента и трения рекомендуется применять метод компьютерного моделирования.

Авторским коллективом БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в работе [7] установлены следующие эффекты в очаге пластической деформации (ОПД), наблюдаемые в процессе деформирования материала:

- 1) наклон прямолинейного отрезка по направлению движения рабочего инструмента в зоне, примыкающей к ОПД;
- 2) изгиб в центральной части отрезка при сохранении прямолинейности краев в верхнем сечении конусной части матрицы;
- 3) дальнейший изгиб кривой в нижнем сечении конусной части матрицы;
- 4) наклон прямолинейной части отрезка, примыкающего к наружной поверхности полуфабриката, и формирование окончательной формы волокна, близкой к прямолинейному отрезку.

В работе делается вывод, что деформация в ОПД: во-первых, немонотонная, а во-вторых, предварительный наклон сетки (рисунок 3) указывает на наличие пластической деформации наружного слоя полуфабриката и заведомо большего перемещения материальных точек. Эти факторы могут быть технологически негативными – излишняя деформация наружного слоя может приводить к его последующее разрушению, или позитивными – открывая возможность формирования заведомо наружно-упрочненного корпуса, который будет иметь потенциально выгодные эксплуатационные характеристики в комбинации пластичность-прочность.

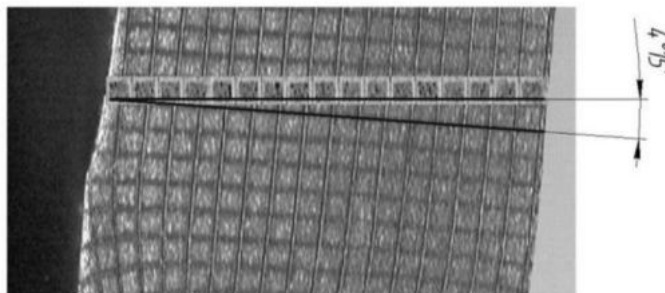


Рисунок 3 - Предварительный угол наклона делительной сетки в зоне, примыкающей к ОПД

Все эти особенности являются новыми элементами в существующем знании о формировании неравномерного деформированного состояния на операции вытяжка с утонением, описанном в работах авторов Ренне И.П. и др. [5,6]. Соответственно, можно сделать вывод о том, что основными факторами, влияющими на неравномерность деформации, являются геометрия рабочего инструмента и трение на его рабочих поверхностях.

Первым этапом, с целью верификации, проведено моделирование операции в соответствии с технологическими особенностями экспериментального исследования. На рисунке 4 изображена делительная сетка в ОПД по результатам экспериментального исследования и компьютерного моделирования, что убедительно подтверждает адекватность расчета деформированного состояния с помощью программного пакета.

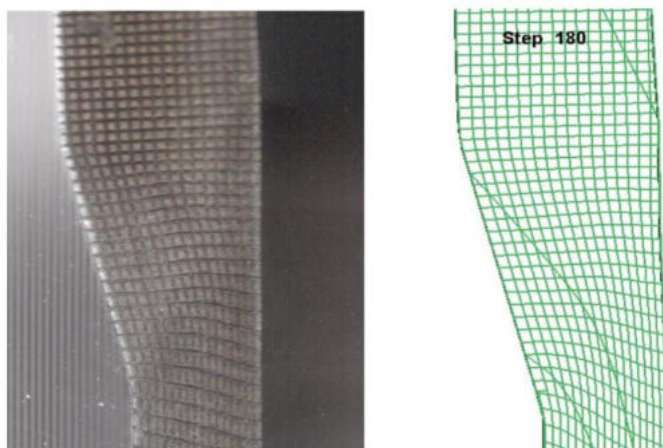


Рисунок 4- Делительная сетка в ОПД по результатам: а) экспериментального исследования, б) компьютерного моделирования

Проведены два комплекса вычислительных экспериментов с изменением I – угла конусности матрицы (оценка угла предварительного наклона), II – коэффициента трения на контактной поверхности матрицы и пуансона.

Произведен анализ процесса деформации материала в трех сечениях (рисунок 5) полуфабриката при деформировании с различными углами скатов матриц от 10 до 20 градусов. Полученные результаты приведены в таблице 1 и рисунке 6.

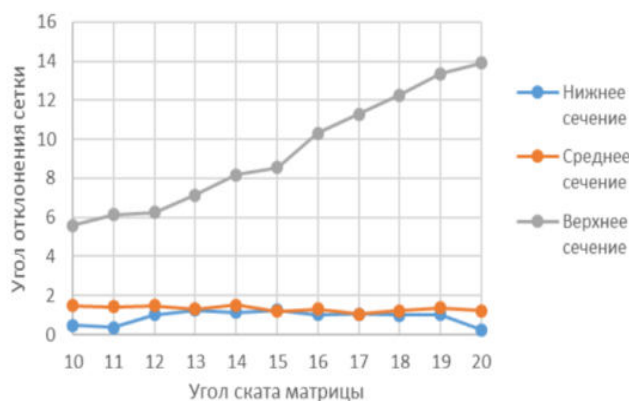


Рисунок 5 – Расположение расчетных сечений:: верхнее, среднее, нижнее

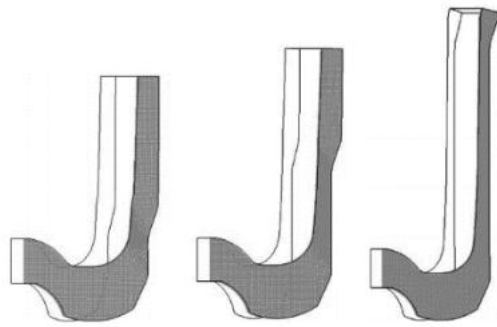
Таблица 1 – Результаты измерения «предварительных углов наклона» на операции вытяжка с утонением

Угол матрицы	Сечение		
	Нижнее	Среднее	Верхнее
10°	0°46′	1°47′	5°58′
11°	0°35′	1°41′	6°14′
12°	1°3′	1°48′	6°25′
13°	1°25′	1°31′	7°15′
14°	1°14′	1°51′	8°17′
15°	1°25′	1°19′	8°54′
16°	1°2′	1°31′	10°32′
17°	1°5′	1°5′	11°28′
18°	1°	1°22′	12°25′
19°	1°1′	1°37′	13°36′
20°	0°25′	1°22′	13°9′

Из полученных результатов можно сделать вывод, что в придонном и серединном сечении стакана течение металла происходит менее интенсивно, чем в верхнем, что может говорить о низких значениях деформаций. При больших «предварительных углах наклона» материал в верхнем сечении полуфабриката будет претерпевать гораздо большую деформацию, причем еще знакопеременную. Потенциально, это может быть причиной потери устойчивости материала и привести к поверхностным и внутренним дефектам, в том числе, распространённому производственному браку в виде обрыва сектора краевого участка полуфабриката.



а)



б)

Рисунок 6 – а) Зависимость угла наклона сетки от угла ската матрицы, б) эскизы полуфабрикатов на различных этапах деформирования

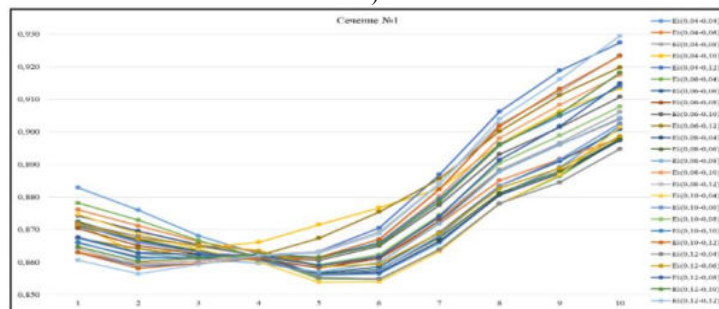
В таблице 2 представлена сетка вычислительного эксперимента с указанием соответствующих коэффициентов трения на матрице и пуансоне, применяемых для следующего вычислительного эксперимента.

Таблица 2 – Сетка вычислительного эксперимента

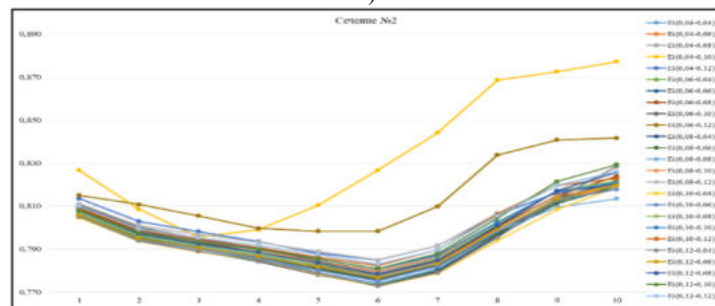
		Коэффициент трения матрицы				
		0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
Коэффициент трения пуансона	0,04	№1	№2	№3	№4	№5
	0,06	№6	№7	№8	№9	№10
	0,08	№11	№12	№13	№14	№15
	0,10	№16	№17	№18	№19	№20
	0,12	№21	№22	№23	№24	№25

На рисунке 7 представлены графики распределения интенсивности деформации от внутренней до наружной поверхности всех двадцати пяти экспериментов (в системе «пуансон-матрица») в различных сечениях полуфабриката (№1 – крайняя часть и №4 – придонная часть соответственно).

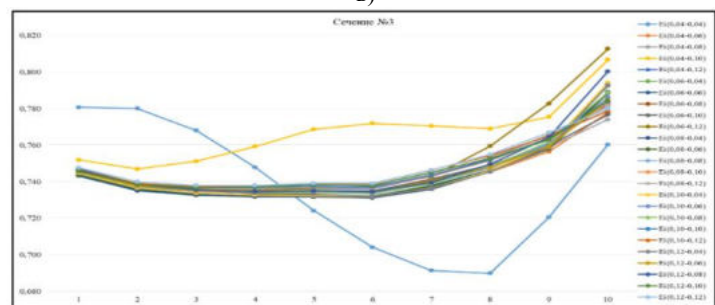
а)



б)



в)



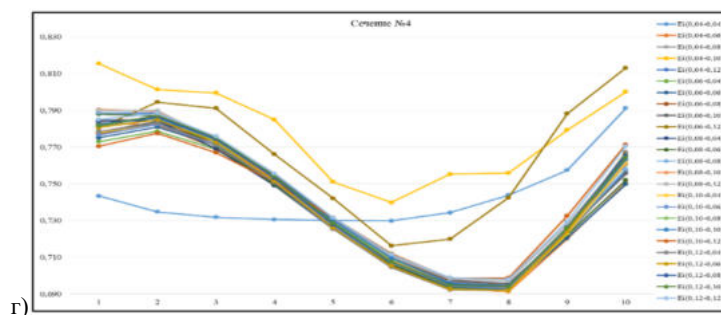


Рисунок 7 - Распределение интенсивности деформации от внутренней до наружной поверхности в: а) сечении №1, б) сечении №2, в) сечении №3 и г) сечении №4

Можно заключить, что практическое применение различных комбинаций трений (смазочных материалов) на пуансоне и матрице позволит изменять как качественные, так и количественные распределения степени деформации по толщине стенки вытягиваемого полуфабриката. Например, на комбинации трения 0,04-0,04 имеется характерный равномерный спад значений степени деформации к срединной поверхности полуфабриката во всех сечениях, что может открывать возможность удаления наружного слоя материала после вытяжных операций с целью компенсации «перенаклепа» наружного слоя и получения готового изделия с пластичной наружной поверхностью.

Дополнительно возникает вопрос о подобии формирования степени деформации по поясам вытягиваемого полуфабриката на различных материалах. С одной стороны, геометрия рабочего инструмента полностью определяет возможное окончательное формоизменение полуфабриката, с другой стороны, каждый отдельный материал имеет свои уникальные свойства пластичности.

Исследования проводятся в рамках выполнения проектов по договору №4432ГС1/72595 «Разработка прототипа программно-аппаратного комплекса для контроля давления срабатывания предохранительных мембран из нержавеющей стали методом акустической эмиссии» и №4431ГС1/72622 «Разработка прототипа аппаратного комплекса аэротермоакустической обработки материалов и изделий» Фонда Содействия Инновациям.

Заключение

1. Проведена оценка углов наклона материальных волокон в зоне полуфабриката, примыкающей к очагу пластической деформации на операции вытяжка с утонением. Установлено, что в придонном и срединном по высоте сечении эффект предварительного наклона минимален. Существенные углы отклонения делительной сетки наблюдаются в верхнем сечении полуфабриката и могут достигать 15°, что не учитывается в текущих технологических расчетах.

2. Проведена оценка влияния различных комбинаций трения на формируемую степень деформации в поперечном сечении стенки. На практике применение различных комбинаций трений (смазочных материалов) на пуансоне и матрице позволит изменять как качественные, так и количественные распределения степени деформации по толщине стенки вытягиваемого полуфабриката

Библиографический список

- 1 Агеев Н.П., Данилин Г.А., Огородников В. П. Технология производства патронов стрелкового оружия. В 3 ч. Ч. 2. Технологические основы проектирования патронов: учебное пособие; БГТУ – СПб., 2005. – 408 с.
- 2 Данилин Г.А., Огородников В.П., Заволокин А.Б. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию: учебное пособие. СПб.: Изд-во Балтийского гос. тех. ун-та, 2005. 374 с.
- 3 Агеев Н.П., Данилин Г.А., Огородников В. П. Технология производства патронов стрелкового оружия. В 3 ч. Ч. 1. Технологические основы проектирования патронов: учебное пособие; БГТУ – СПб., 2005. – 352 с.
- 4 Сафарянц, А.Р. Технология патронно-гильзового производства [Текст]: учебное пособие / А.Р. Сафарянц. – ЦНИИ, 1975. – 208 с.
- 5 Ренне, И.П. Неравномерность деформаций и механических свойств по толщине стенки при вытяжке с утонением [Текст]: научная статья / И.П. Ренне, Э.А. Иванов, В.П. Кузнецов. 1969. – 5 с.
- 6 Лобов, В.А. Технология изготовления полых фланцевых деталей ответственного назначения вытяжкой с утонением по внутреннему контуру [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.02.09 / В.А. Лобов. – СПб.: БГТУ, 2018. – 19 с.
- 7 Иванов К.М., Олехвер А.И., Винник П.М., Ремшев Е.Ю. ВОПРОСЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОБЛЕМАМ // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 4 (112). С. 62-69.

УДК 621.983

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОМД В ПРОГРАММЕ DEFORM-3D

А.В. Кулешиова, С.В. Гнатуша

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

Матрицы являются наиболее сложными и трудоемкими деталями штампового инструмента. Полости матриц отличаются разнообразием и имеют сложную конфигурацию рабочего профиля. Учитывая тот факт, что большое количество матриц основного производства имеют сквозные полости, целесообразным для их изготовления является применение сквозной облегчающей камеры. По схеме приложения сил и характеру течения материала заготовки применяют осевое выдавливание [1].

Осевое выдавливание (рисунок 1) осуществляется путем вдавливания пуансона, рабочая часть которого имеет форму полости готового изделия, в заготовку, помещенную в матрицу или свободно лежащую на столе прессы, и

характеризуется перемещением материала в процессе деформирования от центральной части заготовки и рабочей поверхности пуансона к периферии, преимущественно в направлении свободных поверхностей.

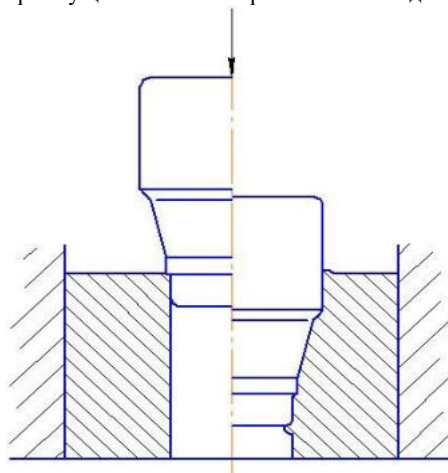


Рис. 1. Схема осевого выдавливания

На кафедре Е4 БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова проводят исследования матриц, полученных полузакрытым осевым выдавливанием. Матрицы изготавливали из стали У10А

Фотография штампа, заготовок, пуансонов и полуфабрикатов после выдавливания представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Фотография штампа, заготовок, пуансонов и полуфабрикатов после выдавливания

В данной работе используется программный пакет DEFORM 3D. Программа является системой конечно-элементного моделирования. Данная система позволяет прогнозировать характер формоизменения с высокой точностью и минимальными затратами на экспериментальные проверки.

Решение задачи с применением МКЭ состоит из следующих основных этапов:

1. Идентификация задачи, присвоение ей имени, создание чертежа конструкции.
2. Создание геометрии модели, пригодной для МКЭ.
3. Разбиение модели на сетку конечных элементов.
4. Определение граничных условий.
5. Численное решение системы уравнений.
6. Анализ результатов.

Исследовано напряженное состояние (НС) с использованием программы Deform-3D [1].

В качестве примера рассмотрены цилиндрические заготовки со сквозным отверстием. Для изучения предложены заготовки с наружным диаметром 25, 30, 35, 45 мм. Диаметр отверстия равен 5 мм. Высота заготовки составляет 15 мм [2].

Проведена оценка параметров НС с помощью компьютерного моделирования. Анализ позволяет утверждать возможность использования моделирования в научных исследованиях.

При моделировании были приняты следующие допущения:

1. Материал изотропный.
2. Процесс деформирования монотонный.
3. Рабочие инструменты являются абсолютно жесткими.
4. Температура не влияет на процесс моделирования.
5. Коэффициент трения принят равным 0,12 [3].

Распределения параметров напряженного состояния представлено на рисунке 3, в качестве примера рассмотрено 2 заготовки.

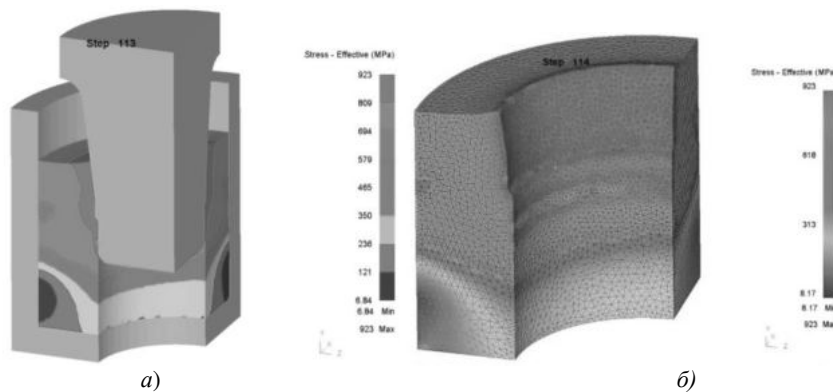


Рис. 3. Распределение интенсивности напряженного состояния исследуемых заготовок с различным внешним диаметром: 25 мм(а), 45мм(б)

По итогам расчета в двух характерных сечениях заготовки 1-1, 2-2 (рис. 4), построены графики распределения параметров напряженно-деформированного состояния (рис. 5-8). $a_1 = 13$ мм, $a_2 = 34$ мм.

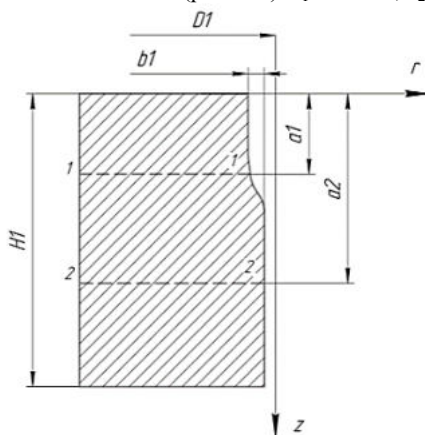


Рис.4. Вид заготовки после деформации: 1-1, 2-2 – сечения, в которых исследовано НДС

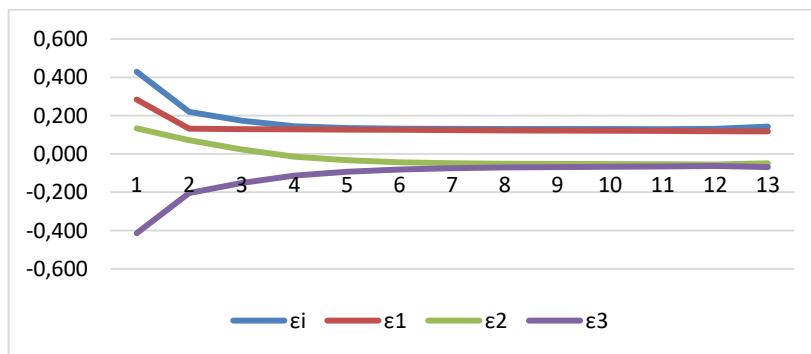


Рис.5. Изменение главных деформаций в сечении заготовки 1-1

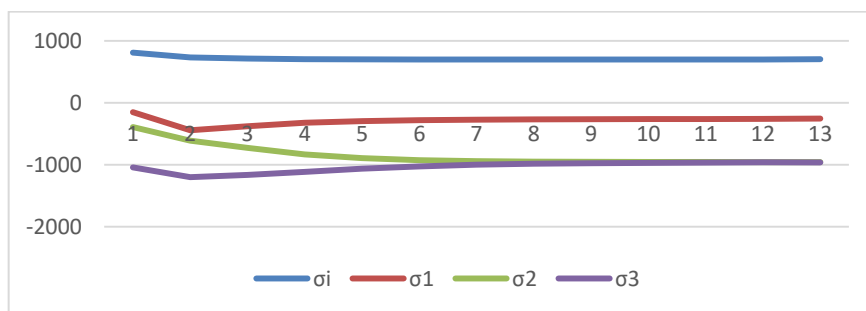


Рис.6. Изменение главных напряжений в сечении заготовки 1-1

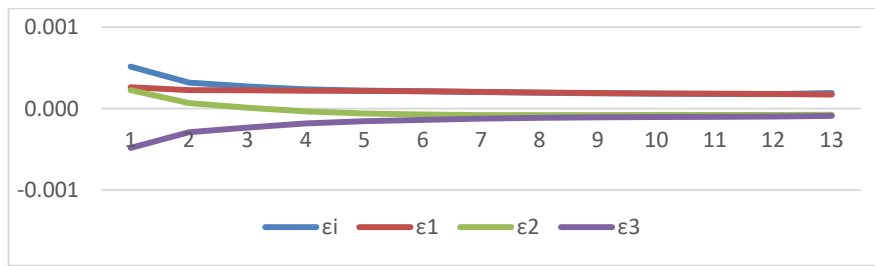


Рис.7. Изменение главных деформаций в сечении заготовки 2-2

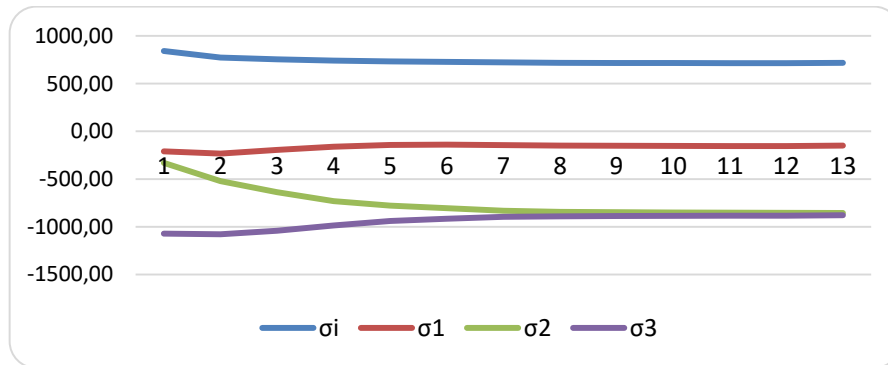


Рис.8. Изменение главных напряжений в сечении заготовки 2-2

Анализ результатов моделирования:

- 1) наибольшие напряжения находятся у центральной части (рядом с отверстием);
- 2) центральное отверстие меняется по длине заготовки;
- 3) формоизменение заготовки при моделировании в программе Deform 3d имеет сходства с формоизменением заготовки при экспериментальном исследовании;
- 4) максимальное значение силы при моделировании составляет 58 тонн (рис. 9);
- 5) значения усилия полученные в ходе моделирования коррелируют со значениями экспериментального исследования, но максимальное значение имеет явное отклонение, это может быть связано с силой трения.

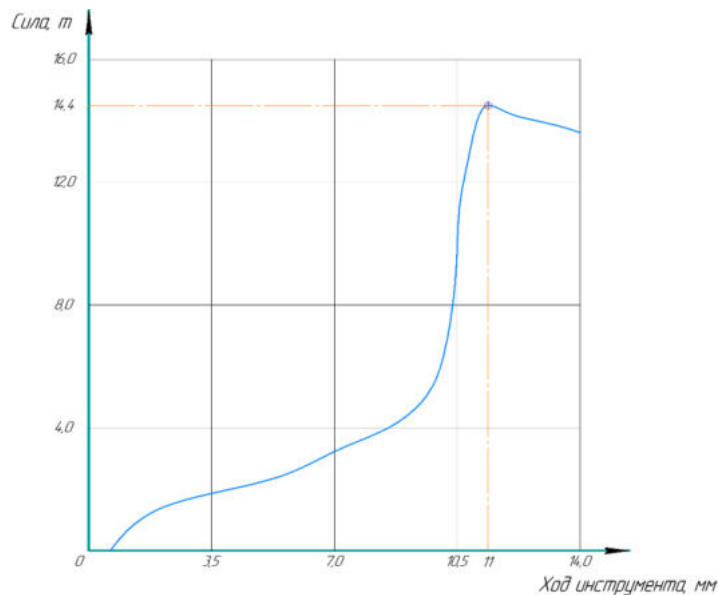


Рис. 9. Диаграмма усилия для четверти деформированной заготовки: Ø25мм

Библиографический список

1. Лясников, А.В. Образование полостей пресс – форм и штампов выдавливанием / А.В. Лясников. СПб.: Внешторгиздат. Санкт-Петербургское отделение, 1993. – С. 312.
2. Нестеров, Н.И. Определение размера заготовки при изготовлении радиальным обжатием матрицы с глухой полостью / Н.И. Нестеров, А.В. Старостенко // Актуальные вопросы ракетно-космической техники и систем вооружения: Сб. трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых БГТУ / - СПб.: Изд-во Балт.гос.техн.ун-та, 2008. – Вып.6 – С.113-115.
3. Кулешова, А.В. Совершенствование технологии изготовления матрицы обжима пульной оболочки / А.В. Кулешова, Н.И. Нестеров // Молодежь. Техника. Космос: труды X Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. Т.1 / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2018. – С. 393-396.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ДВУХСЕДЕЛЬНОГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА

Д.Е. Мотохов, В.В. Рыбалко

научный руководитель – доцент, к.т.н. Н.Р. Туркина

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

Предохранительным клапаном является изделие, которое используется в системе трубопроводов для предохранения и сбрасывания давления, защиты от механического разрушения. Установлено, что внедрение методов математического моделирования и анализа исключает необходимость в повторном создании опытных образцов и проведении их испытаний вследствие корректировки конструкции по результатам предыдущих испытаний [1-2].

В данной работе проводились статические расчеты предохранительного клапана от воздействия давления, расчеты на устойчивость от внешнего давления и действия температуры, расчет собственных частот и форм колебаний, воздействие ударной нагрузки. Были рассмотрены три варианта материала конструкций и проведен их расчет по определению напряжения по Мизесу, перемещению, относительной деформации и запаса прочности. Давление задавали по всем внутренним поверхностям корпуса, значение внутреннего давления составило 1 МПа.

На рисунке 1 показан результат расчетов напряжения для трех исследуемых материалов.

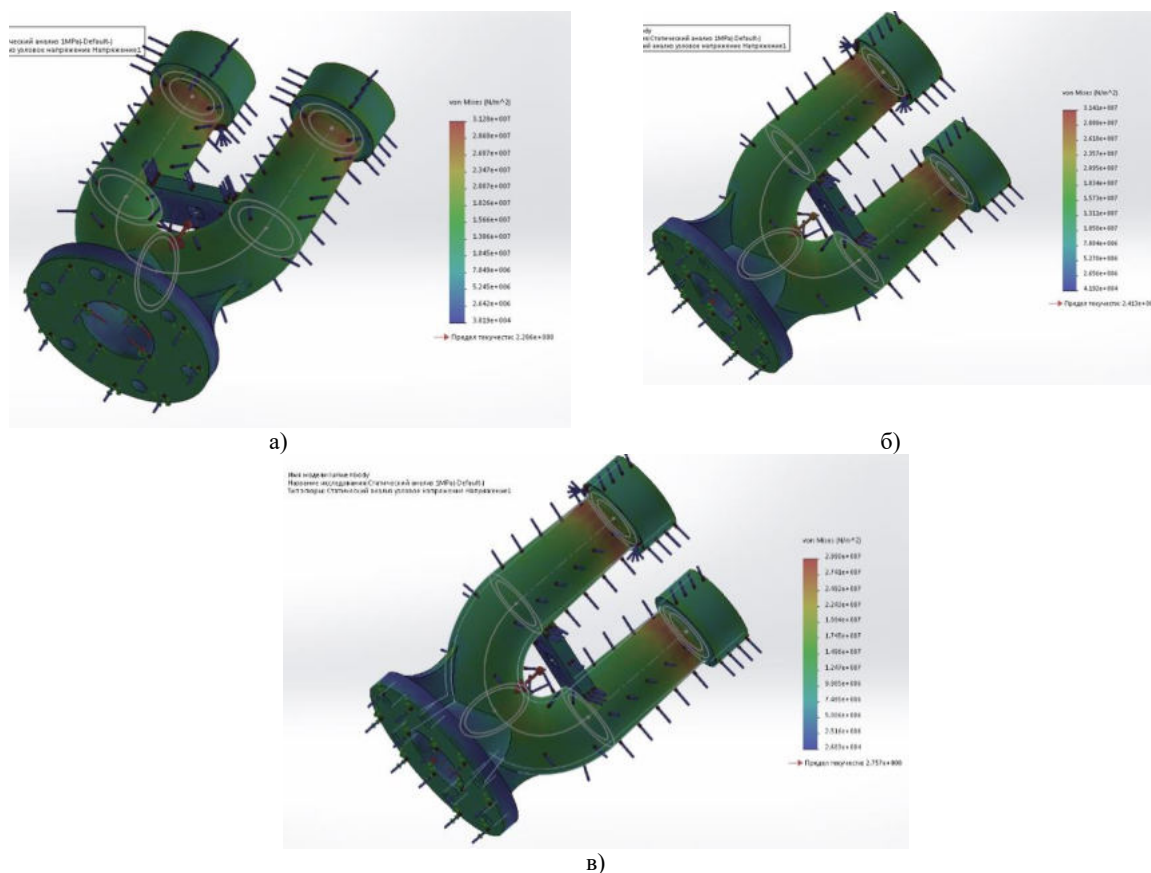


Рисунок 1 – Результат расчетов напряжения для выбранных материалов: а) простая углеродистая сталь марки 25Л; б) литая легированная сталь марки 20ГЛ; в) серый чугун марки СЧ20.

Результаты расчетов разных материалов клапана при условиях – давление 1МПа, температура 200°С представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов различных материалов клапана

Материал	25 Л	20 ГЛ	СЧ 20
Напряжения по Мизесу	31,28 МПа	31,41 МПа	29,9 МПа
Перемещение	0,001644 мм	0,001508 мм	0,00172 мм
Относительная деформация	0,0001109	0,0001212	0,0001193
Запас прочности	7,052	7,681	9,222

По результатам расчетов видно, что максимальные напряжения у стали марки 20ГЛ, минимальные – у чугуна марки СЧ20. Максимальные перемещения – у стали марки 20ГЛ, минимальные – у стали марки 25Л. Относительная деформация максимальна для стали марки 20ГЛ, минимальна – у стали марки 25Л. Однако, запас прочности оказался выше для чугуна марки СЧ20. Этот материал и был рассчитан на устойчивость при разных давлениях и температурах.

Расчет на потерю устойчивости был проведен с помощью метода конечных элементов, результат представлен на рисунке 2.

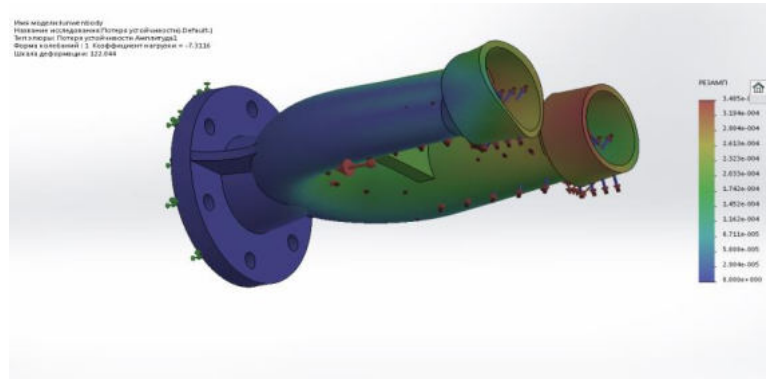


Рисунок 2 - Результат расчета на потерю устойчивости.

Как видно из рисунка, коэффициент запаса превышает 122 единицы, следовательно, потери устойчивости конструкции удастся избежать.

Также был проведен расчет при следующих начальных условиях: давление 4МПа, температура 20°С, материал – СЧ20. На рисунке 3 показан результат расчетов напряжения, которое составило 112,8 МПа, при пределе текучести 275,7 МПа.

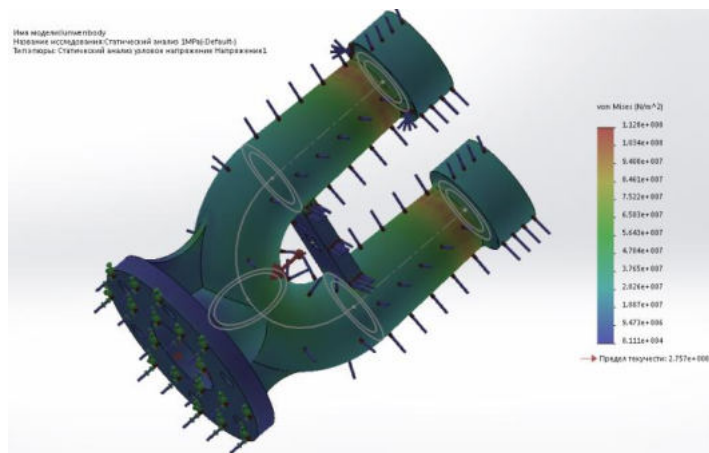


Рисунок 3 – Максимальное напряжение конструкции – 112,8 МПа (предел текучести выбранного материала – 275,7 МПа).

Перемещение при тех же условиях составило $\Delta=0,06258$ мм (62,6 мкм), относительная деформация при тех же условиях – 0,0003795.

На рисунке 4 представлен расчет запаса прочности при давлении 4МПа, величина коэффициента составила 2,445. Согласно требованиям ГОСТ 34233.1-2017 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования» коэффициент запаса прочности в рабочих условиях должен составлять не менее 2,4 [3]. Следовательно, использование материала марки СЧ20 целесообразно проводить при давлениях менее 4 МПа.

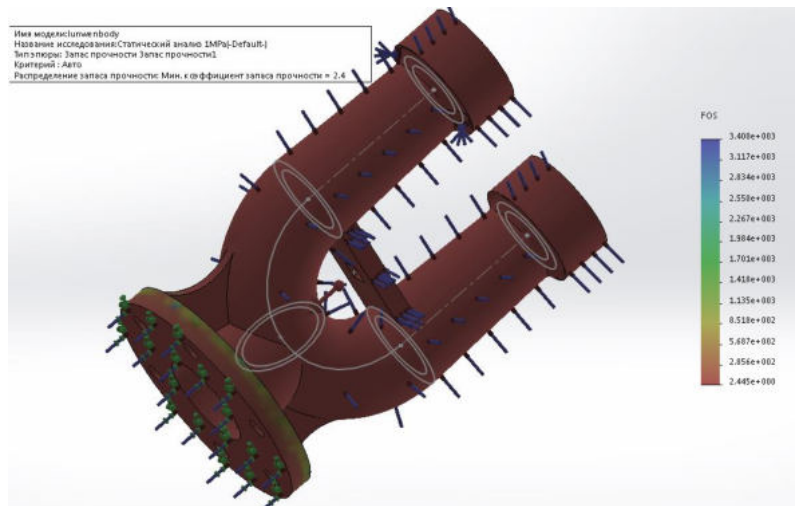


Рисунок 4 – Расчет запаса прочности для чугуна марки СЧ20.

Таким образом, при рассмотрении материалов конструкции клапана – простой углеродистой стали марки 25, литой легированной стали марки 20Г и серого чугуна марки СЧ20, был выбран материал марки СЧ20. Моделирование поведения клапана с выбранным материалом показало, что материал марки СЧ20 ограниченно подходит для условий давления 4 МПа и температуры 130°С. В целом, предлагаемая конструкция клапана является надежной под воздействием эксплуатационных нагрузок и температур.

Библиографический список

1. Красильников А.З., Рак А.А., Туркина Н.Р. // Повышение эффективности термодинамических и прочностных баллистических расчетов: сб. статей. – МОЛОДЕЖЬ. ТЕХНИКА. КОСМОС Труды XI Общероссийской молодежной научно-технической конференции. Сер. "Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 57, 2019. С.258-261.
2. Бильдок Н.А., Каратушин С.И., Малышев Г.Д. Детали машин. Учебник / под общ. ред. В. Н. Ражикова. – СПб: Политехника, 2015. – 695 с.
3. ГОСТ 34233.1-2017 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования».

УДК 623.413

ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ МАССЫ СТВОЛЬНЫХ ОРУДИЙ ПОЛЕВОЙ АРТИЛЛЕРИИ

Владимиров К.Е., Егоров В.В.

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

«Артиллерия сегодня – это высокоэффективное средство вооруженной борьбы. Она способна решать задачи огневого поражения противника в любых условиях природного ландшафта, в любое время суток и время года, в любую погоду. При этом артиллерийский снаряд, в отличие, например, от ракеты, более устойчив к действию помех, создаваемых средствами противодействия противника», – генеральный директор «ЦНИИ «Буревестник» Георгий Закаменных [1].

Современное развитие артиллерийских систем ставит перед конструкторами ряд новых практических задач, связанных с повышением боевых и эксплуатационных характеристик систем различного назначения. Дальнейшее повышение боевой эффективности современных полевых артиллерийских систем выдвигает проблему уменьшения их массы, что должно увеличить такие характеристики как маневренность, подвижность, проходимость, авиатранспортабельность, и др.

Конструктивные решения улучшения массовых характеристик условно можно разделить на три группы (рис. 1).



Рис. 1. Конструктивные решения для снижения массы ствольных орудий полевой артиллерии

Рассмотри каждую группу подробнее.

1. Опытное финское противотанковое орудие 75 К/44 (PstK 57-76) (рис. 4) может являться хорошим примером буксируемого орудия нестандартной компоновки [2]. Данное орудие имеет расположение ствола по уровню колесного хода, что дает ему преимущество в устойчивости во время выстрела (это позволяет уменьшить массу лафета), а также позволяет добиться силуэта ниже чем у ближайших аналогов, что позволяет снизить заметность на поле боя. К минусам данной конструкторской идеи можно отнести неудобство перемещения орудия по пересеченной местности ввиду низкого положения ствола и его длины.



Рис. 2. Опытное финское противотанковое орудие 75 К/44 (PstK 57-76)

Еще одним способом изменение компоновки может быть САУ «Объект 327» (рис. 3). Орудие у «Объекта 327» было вынесено за пределы башни, что существенно позволило уменьшить броневой объём и увеличить боекомплект [3].

2. На примере гаубицы M777 (рис. 4) разработанной английской компанией BAE Systems можно выделить, как при создании конструкции из сплавов алюминия и титана, была существенно уменьшена масса и тем самым увеличены возможности транспортировки данной системы по воздуху. Так, M777 весит 4,2 тонны, а ее ближайший по характеристикам отечественный аналог Мста-Б весит 7 тонн. К недостаткам данной идеи можно отнести высокую цену производства за единицу вооружения при использовании большого количества сплавов титана и алюминия.



Рис. 3. САУ «Объект 327»

Примером использования сплавов алюминия при создании самоходных орудий может служить орудие M56 (рис. 5). Даная САУ создана для десантных войск, поэтому обладает малыми габаритами, весом (в 7130 кг), высокой проходимостью и могуществом орудия (для периода принятия на вооружение), корпус выполнен из алюминия, благодаря чему давление на грунт составляет $0,29 \text{ кг/см}^2$ (к примеру, у АСУ-57 $0,35 \text{ кг/см}^2$).



Рис. 4. Гаубица M777



Рис. 5. САУ M56

3. Одним из примеров объединения функций узлов и агрегатов может являться 75-мм немецкое противотанковое орудие РАК 41 (рис.2) [4], где несущий щит заменяет одновременно и верхний станок, и лобовую коробку орудия. Данная схема также была реализована в советской 76-миллиметровой полковой пушке М-3-1, а на ее базе была создана опытная 45-мм противотанковая пушка М-5, представляющая более компактное и легкое орудие по сравнению с пушками классической компоновки (рис. 7).



Рис. 6. 75-мм противотанковая пушка РАК.41

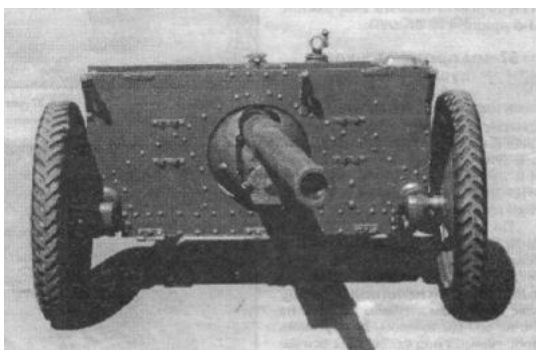


Рис. 7. Опытная 45-мм противотанковая пушка М-5

В качестве примера использование способа снижения массы за счёт объединения функций в самоходных орудиях рассмотрим FV4401 (рис. 8). FV4401 (Великобритания) – это легкая самоходная артиллерийская установка, особенностью конструкции которой заключается в том, что наведение в горизонтальной и вертикальной плоскостях производится с помощью доворота корпуса и изменения угла подвески соответственно (рис. 8). Точное наведение осуществлялось с помощью механизмов вертикального и горизонтального наведения.



Рис. 8. САУ FV4401 при разных углах возвышения (склонения) орудия

Решения, связанные с использованием лёгких сплавов в конструкции и объединением функций узлов и агрегатов, часто приводит к необходимости изменения компоновки орудия, поэтому не всегда возможно четко классифицировать один способ относительно другого.

Важно отметить, что общее развитие техники и технологий позволяет актуализировать многие технические решения, отброшенные ранее, поэтому необходимо постоянно анализировать оригинальные идеи в области конструкции артиллерийских орудий.

Библиографический список

1. Азанов, Р. Оружие сокрушительной мощи. О российской артиллерии будущего и современных роботах [Электронный ресурс] / Сайт информационного агентства ТАСС – Режим доступа: <https://tass.ru/armiya-i-opk/8872643>, свободный (дата обращения: 02.04.2022).

2. Опытное финское противотанковое орудие 75 К/44 (PstK 57-76), 1944 год [Электронный ресурс] СМИ «Военное обозрение» – Режим доступа: <https://topwar.ru/17713-opytnoe-finskoje-protivotankovoe-orudie-75-k44-pstk-57-76-1944g.html>, свободный (дата обращения: 02.04.2022).
3. Какой могла стать САУ «Мста-С» или конструктор об Объекте 326 он же САУ «Шайба» [Электронный ресурс] Сайт «Альтернативная история» – Режим доступа: <http://alternathistory.com/kakoj-mogla-stat-sau-msta-s-ili-konstruktor-ob-obekte-326-on-zhe-sau-shajba/>, свободный (дата обращения: 02.04.2022).
4. Широкоград, А. Б. Бог войны Третьего рейха. – М.: "АСТ". 2003. 576 с.

УДК 623.4.012

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БОЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.Л. Зайнуллина

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

В настоящее время происходит стремительный рывок в развитии информационных технологий, а также в мире технических новинок. Робототехника, цифровизация, нанотехнологии в сферах искусства, медицины, строительства, космоса, авиации, военного дела и во многих других видах деятельности. И многие другие научные достижения в скором будущем станут обыденной реальностью. Переосмысление научного прорыва будет напрямую касаться не только человека, но и окружающей среды.

Объектом исследования данной статьи является беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Широкий спектр применения беспилотники получили совсем недавно, так как в начале своего жизненного пути БПЛА использовались только в военном деле, что привело к значительным изменениям ведения боевых действий. Свой путь к широкому распространению он начал ещё при физике и инженерере Никола Тесла, который придумал первый радиоуправляемый кораблик в 1889 году. После было ещё пару предложений, как можно усовершенствовать данный продукт, но ни один из них не был реализован. Лишь спустя чуть больше 20 лет американский военный инженер Чарльз Кеттерин предложил создать такой БПЛА, который будет в заданное время сбрасывать крылья и падать на противника [1]. Но и данный проект не был реализован. Через некоторое время многие страны переняли на себя данное изобретение и старались усовершенствовать конструкцию. Так, к 40-ым годам 20 века Великобритания успешно начала применять свои разработки в качестве разведывательных самолетов, а ВМФ США использовали беспилотники в качестве учений. Позже беспилотные летательные аппараты стояли на вооружении у таких стран, как КНР, Южная Корея и Германия.

В качестве гражданской продукции БПЛА начали набирать популярность примерно около 20-30 лет назад. Изначально их использовали для фотосъемок с воздушного пространства, чтобы получать картографические материалы высокого разрешения. Но это было лишь их началом в техническом пути. Создаваемые БПЛА решили применять для научных исследований в суровых климатических условиях; для мониторинга объектов, которые могут находиться в зоне повышенной опасности; для сельского хозяйства, в качестве опрыскиваний и распылений небольших гранул для подкормки растений, а также для обработки от вредителей. БПЛА могут так же использоваться и в нефтегазовой отрасли. Для нефтяников БПЛА отслеживают состояния трубопроводов, дистанционное зондирование перспективных участков, где могут быть залежи углеводорода, совершать геодезические съёмки. Широкий спектр применения БПЛА получили в практике спасательных работ. Так, к примеру в Нидерландах появился БПЛА скорой помощи, который получил название «AmbulanceDrone». Он представляет собой универсальный медицинский беспилотный летательный аппарат, который может быть запущен в чрезвычайных ситуациях. До прибытия медицинских работников БПЛА способен доставить необходимые медикаменты в место, где произошло происшествие. Кроме необходимых медикаментов, в беспилотном летательном аппарате могут находиться дефибриллятор, кислородные маски, а также все прочие медикаменты, которые могут понадобиться для оказания первой медицинской помощи. Также беспилотник снабжен камерой и громкоговорителем, которые помогут тем людям, которые будут оказывать медицинскую помощь, в качестве инструкции и дистанционным отслеживанием за правильным проведением операции по оказанию первой медицинской помощи. Студенты Стэнфордского университета разработали БПЛА для противопожарных мер. Данные беспилотники производят обзор горящего здания, и в случае замечания в нем людей, сигнал поступает пожарным, и происходит план эвакуации. Беспилотные летательные аппараты используются в научных интересах не только для суровых условий труда, но и для защиты окружающей среды, в том числе для осмотра диких животных, находящихся на территориях заповедников, национальных парков и т.п. Так же с помощью данных летательных аппаратов (ЛА) можно отслеживать и вылавливать браконьеров. В Дубае беспилотником нашли применение в качестве патрульных, другими словами – беспилотник – полицейский, который должен следить за отсутствием мусора в общественных местах, местах отдыха и пустыне. Преступников вычисляют по фотографиям, которые приходят власти. Так же в Америке БПЛА набирают в курьерской службе. Они доставляют в различные пункты небольшие посылки, а также задействованы в качестве доставки еды многих ресторанов. Но многие жители городов относятся к этой идее довольно-таки скептически из-за опасных ситуаций, которые могут возникнуть в случае падения такого беспилотника в густонаселённых районах [2]. Исходя из вышенаписанного можно подытожить наиболее перспективные направления применения беспилотных летательных аппаратов:

- * Видео, фотосъёмки;
- * Оценка экологической обстановки в различных штатных и нештатных ситуациях, а также в особых климатических условиях;
- * Применение в нефтегазовой отрасли (для поиска залежей и проверки работоспособности оборудования);
- * Использование в сельскохозяйственной отрасли;
- * Спасательные работы в виде доставки предметов первой необходимости;
- * Охрана окружающей среды;
- * Охрана порядка (борьба с правонарушителями);

* Курьерская служба.

Беспилотники данных направлений не набирают такую популярность в России. Поэтому широкий спектр применения БПЛА получили в отрасли оборонного промышленного комплекса (ОПК). В военной промышленности беспилотники называют дронами-камикадзе или просто дронами. На территории страны есть огромное количество предприятий, заводов-изготовителей, которые занимаются разработкой и проектированием не только конструкции беспилотников, но также и их программным обеспечением. Можно выделить несколько таких предприятий [4].

1) Компания ООО «Беспилотные системы», находящаяся на территории города Калуга, занимается проектированием и производством беспилотных авиационных комплексов, технических средств полезной нагрузки БПЛА для военного авиастроения.

2) Компания «Коптер Экспресс» находится в городе Москва и направлена на разработку и производство беспилотников и их программного обеспечения не только для ОПК, но также и для образовательных организаций.

3) Компания «Aerodyne Teach», расположенная в городе Санкт-Петербург, занимается производством БПЛА высокой грузоподъемности, водонепроницаемых арктических беспилотников, подводных беспилотников, соосных октокоптеров, а также дронов дальнего видеонаблюдения для ОПК.

4) Компания АО «АЭРОСКОН» на базе Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ) находится на территории Московской области в городе Жуковский и ведёт производство в сфере авиационной промышленности. Также предприятие нацелено на производство БПЛА военного назначения. Один из последних и удачных изобретений стал сверхлегкий БПЛА «ИНСПЕКТОР» дистанционного зондирования для ведения воздушной разведки.

5) Группа компаний ZALA AERO, входящая в АО Концерн «Калашников», находится в городе Ижевск и является одним из ведущих российских разработчиков и производителей беспилотных воздушных систем, способных осуществлять разведку и далее пикировать в назначенную цель путем прямого наведения.

За последние пару лет российская промышленность не стояла на месте и в рядах ОПК появился новый беспилотный летательный аппарат военного назначения – барражирующий боеприпас (ББ) «Ланцет». Барражирующий боеприпас – это беспилотный летательный аппарат, который способен находиться определенное время в воздухе для поиска цели и дальнейшего уничтожения её путем совершения атаки и подрывом боевой части (БЧ). Барражирующий боеприпас синонимичен к понятию дрона-камикадзе. Плюсы таких дронов в том, что они стоят гораздо дешевле обычных ракет, цена которых может превышать миллионы долларов, и они должны быть малогабаритны. Такие дроны стоят на вооружении у многих стран. Ведущей страной производителем считается Израиль, который один из первых поставил на вооружение свои дроны-камикадзе. Они изготавливают их не только для своей армии, но также пользуются огромным спросом у иностранных заказчиков. Одним из перспективных типов израильских беспилотников является семейство IAI Harpy. Несмотря на то, что Израиль является ведущим производителем ББ, такие боеприпасы находятся на вооружении Великобритании, США, КНР, Южной Кореи, Польши, Германии, Азербайджана и многих других стран. В таблице 1 приведены примеры ББ различных стран с некоторыми ТТХ (все данные, занесённые в таблицу, являются примерными).

Таблица 1

	ББ Mini Harpy	IAI Harop	Ланцет 3	Green Dragon	Hero-30	Kargu
Страна производитель	Израиль	Израиль	Россия	Израиль	Израиль	Турция
Масса взлётная, кг	45	135	12	*	3	15
Масса БЧ, кг	8		3	3	0,5-1	До 1,5
Дальность полёта, км	До 100	1000	*	40	До 40	До 10
Время в полёте, ч	До 2	6	40 мин	1,5	0,5	*
Размах крыльев, м	*	3	24	*	*	*
Длина, м	*	2,5	12	*	*	*
Размах крыльев, м	*	3	*	*	*	*
Максимальная скорость полёта, км/ч	*	*	80-110	*	До 200	До 150

* – данные не известны

Так как ББ представляют собой дрон одноразового действия, который требует минимальных экономических затрат, то вариантов по совершенствованию данных беспилотников можно придумать бесконечное количество. Варьируемые параметры БПЛА данного типа будут определять его будущий облик, изменяющийся в зависимости от назначения.

При проведении анализа существующих дронов-камикадзе можно выделить барражирующий боеприпас российского происхождения «Ланцет 3», являющийся разработкой компании ZALA AERO концерна «Калашников». «Ланцет» создавался по прототипу ББ «Куб» и в нем были учтены и исправлены все ошибки и замечания предшественника. Конструктивно «Ланцет 3» представляет собой беспилотный летательный аппарат с удлинённым фюзеляжем и в качестве управления оснащен двойным набором крестообразных крыльев. Для удобства транспортировки – крылья складываются и разворачиваются перед запуском. Российские военные пытались отойти от тяжелых беспилотников, стараясь при этом оптимизировать данное устройство, а именно его тактико-технические характеристики (ТТХ). Поэтому, одним из главных параметров была масса самого летательного аппарата. Важно было сохранить достоинства предыдущего барражирующего боеприпаса, но при этом уменьшить его взлётный вес. «Ланцет-3» массой в 12 кг несет в себе осколочно-фугасную боевую часть в 3 кг. Так как беспилотник не многоразового действия, то возвращение после обнаружения цели не предусмотрено. Для нахождения цели и наведения на неё осуществляется с помощью оптико-электронной системы наведения, которая в то же время выполняет функцию самонаведения. Также у «Ланцета-3» имеются средства спутниковой навигации. Процесс управления беспилотником происходит за счёт некоторых автономных функций, но основное управление осуществляется дистанционно по радиоканалу. Двигательная установка представляет собой электрический двигатель с толкающим воздушным винтом. Время барражирования достигает 40 минут, а его скорость варьируется

в диапазоне от 80 до 110 км/ч. Запуск данного беспилотника осуществляется с рельсовой направляющей [5]. Главными преимуществами «Ланцета-3» являются обеспечение высокоточного метода наведения и эффективность применения с гарантированным поражением цели. Из недостатков – это динамический облик самого беспилотника, который не предусматривает решение уникальных задач (например, движущиеся цели, военные базы и т.п.).

Так как опыт в боевом применении у «Ланцетов» небольшой, следовательно они нуждаются во многих доработках в конструкторских решениях, а также усовершенствования методов наведения. Вследствие этого потенциал барражирующих боеприпасов требует постоянных практик и внедрения новых идей. Одним из таких решений может послужить увеличение времени барражирования за счёт улучшения двигательной установки и увеличения эффективности поражения назначенной цели, а также оптимизации его масса-габаритных характеристик. Отличие данного ББ от имеющегося «Ланцета» в том, что его конструкция будет состоять из отдельных частей: головная часть, состоящая из сменных БЧ, бортовая аппаратура, корпус с двойным Х-образным оперением, несколько аккумуляторных блоков разной мощности и стартового ускорителя. Следовательно, оптимизируя двигательную установку, мы сможем увеличить летно-технические характеристики (ЛТХ). Облик, рассматриваемый в данном решении, будет определяться, как было сказано выше, от назначения ББ. Если назначение беспилотника поразить цель на дальних дистанциях, выходящих за пределы времени барражирования с обычной аккумуляторной батареей, то необходимо увеличить мощность аккумулятора, тем самым дать беспилотнику возможность находиться в полёте более длительное время. Чтобы оценить на каком расстоянии находится цель, оператору ББ будут поступать сигналы от разведывательного БПЛА. Как известно, запуск «Ланцета» производится с помощью пусковой установки (ПУ), которая имеет большие габариты. Данную проблему можно решить с помощью замены метода старта. Для этого предлагается на боеприпас установить стартовый ускоритель, благодаря которому обеспечиваются необходимые параметры начала маршевого участка и уменьшаются размеры ПУ. Поскольку данный боеприпас имеет сборную конструкцию, то переноска дрона с пусковыми направляющими может осуществляться по примеру переноски противотанкового ракетного комплекса 9К14М («Малютка») [6]. Для перевода в боевую готовность из походного положения конструкция барражирующего боеприпаса собирается несколькими бойцами: одни отвечают за чемодан-рюкзак с самим дроном, другой отвечает за пульт управления. Вид БЧ также зависит от назначения барражирующего боеприпаса. В случае, если назначенная цель легкобронированная или живая сила – то можно ограничиться осколочно-фугасной БЧ. Однако, когда цель представляет собой тяжелобронированную военную технику, например, танки и броневики – необходимо использовать БЧ с кумулятивной струёй, способной поразить объект. Следовательно, имея несколько вариантов исходов событий, конечные облики ЛА могут быть следующими:

1) Если цель тяжелобронированная и находится на определённом расстоянии: вид БЧ – кумулятивная струя, аккумулятор берется той мощностью, время которого хватит для барражирования и пикирования на цель; если расстояние уменьшается или увеличивается, то аккумулятор подбирается исходя из полученных данных от разведывательного БПЛА;

2) Если цель легкобронированная или живая сила и находится на определённом расстоянии: вид БЧ – осколочно-фугасная, вид аккумулятора определяется так же, как в пункте 1.

Результативность и эффективность данных дронов будет определяться вероятностью поражения цели с учётом её разнотипности.

На территории России ведутся активные разработки дронов-камикадзе. Пока у производителей есть все шансы получить оптимистичные прогнозы, чтобы представить вооружённым силам новые, более перспективные барражирующие боеприпасы для улучшения ведения боевых действий.

Библиографический список

1. История беспилотных летательных аппаратов: [Электронный ресурс] // URL: <https://www.fern-flower.org/ru/articles/istoriya-bespilotnyh-letatelnykh-apparatov> (дата обращения: 15.03.2022).
2. Коннова Л.А., Бончук Г.И. Об истории беспилотных летательных аппаратов и перспективах их использования в практике спасательных работ: [Электронный ресурс] // URL: <https://russiadrone.ru/publications/ob-istorii-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov-i-perspektivakh-ikh-ispolzovaniya-v-praktike-spatatelnykh-razvedyvatelnykh-bppla/> (дата обращения: 16.03.2022).
3. Производство беспилотных летательных аппаратов: [Электронный ресурс] // URL: <https://manufacturers.ru/companies/proizvodstvo-bezpilotnykh-letatelnykh-apparatov> (дата обращения: 18.03.2022).
4. Рябов К., Потенциал барражирующих боеприпасов семейства «Ланцет»: [Электронный ресурс] // URL: <https://topwar.ru/184397-potencial-barrazhirujuschih-boeprispasov-semejstva-lancet.html> (дата обращения: 18.03.2022).
5. Ельцин С.Н., Противотанковый ракетный комплекс 9К14М («Малютка»): учебное пособие /Балт. гос. техн. Ун-т – СПб., 2016 – 42 с.

УДК 629.561.5

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, А ТАК ЖЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ ВОЕННЫХ ЛЕДОКОЛОВ

С.А. Поляков, Б.Г. Иванов, А.А. Тельнов, Р.А. Поляков

Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Создание полномасштабного ледокольного флота в нашей стране относится к 70-м годам XX века, когда в целях регулярного судоходства по Северному морскому пути (СМП) были созданы суда арктического плавания, инфраструктура, а также построена серия атомных ледоколов, что явилось выдающимся национальным и мировым достижением XX века. И сегодня Российская Федерация является лидером в области постройки и эксплуатации ледоколов. Это лидерство необходимо для защиты национальных интересов нашей страны, и удержать его можно только при условии скорейшего обновления ледокольного флота.

Всего в СССР и РФ было построено 10 атомных ледоколов и атомных судов ледового класса (таблица 1). Из них в строю сегодня остаются четыре ледокола и атомный ледокольный лихтеровоз «Севморпуть».

Таблица 1 – Атомные ледоколы СССР и РФ

Название	Ввод	Ресурс	Завод	Проект	Тип	Класс	Дополнительно
Ленин	1959	-	Адмиралтейский ССЗ	92М	Ледокол	Ленин	Корабль-музей.
Арктика	1975	2008	Балтийский ССЗ	1052	Ледокол	Арктика	Ждет утилизацию
Сибирь	1977	-	Балтийский ССЗ	1052	Ледокол	Арктика	Утилизация
Россия	1985	2018	Балтийский ССЗ	10521	Ледокол	Арктика	Ждет утилизацию
Севморпуть	1988	2020	Керченский ССЗ	10081	Лихтеровоз	Севморпуть	В строю.
Таймыр	1989	2021	Wärtsilä (Финляндия)	10580	Ледокол	Таймыр	В строю.
Советский Союз	1990	2020	Балтийский завод	10521	Ледокол	Арктика	В отстое.
Вайгач	1990	2019	Wärtsilä (Финляндия)	10580	Ледокол	Таймыр	В строю.
Ямал	1993	2022	Балтийский ССЗ	10521	Ледокол	Арктика	В строю.
50 лет Победы	2007	-	Балтийский ССЗ	10521	Ледокол	Арктика	В строю
Находятся в постройке							
Арктика 2	2019	-	Балтийский ССЗ	22220	Ледокол	ЛК-60Я	Постройка
Сибирь 2	2020	-	Балтийский ССЗ	22220	Ледокол	ЛК-60Я	Постройка
Урал	2022	-	Балтийский ССЗ	22220	Ледокол	ЛК-60Я	Постройка
Лидер	-	-	ССЗ Звезда	10510	Ледокол	ЛК-120Я	Проект

Не смотря на то, что ледокол, как самостоятельный тип судна вполне сформировался, возможности его совершенствования еще не исчерпаны. При этом совершенствование перспективного ледокола может быть связано в первую очередь с выбором типа его энергетической установки, а также с разработкой устройств и систем повышающих его ледоходимость. Особенностям проектирования ледокола посвящена данная статья.

Нужно отметить, что не все страны рассматривают в качестве перспективной ледокольной энергетической установки атомную (АЭУ). Так США, не смотря на имеющиеся технические и правовые возможности по использованию АЭУ, на своем ледокольном флоте используют дизельные ЭУ. С целью оценки типов ЭУ ледокола, проведено сравнение характеристик ледокольного флота РФ и американских ледоколов (таблица 1).

Таблица 2 – Сравнительные характеристики ледоколов России и США.

Характеристика	«Арктика»	«Таймыр»	Пр. 22220 ЛК-60	«Polar Sea» / «Polar Star»	«Healy»
Длина, [м]	150,0	150,0	173,3	122,0	128,0
Ширина, [м]	30,0	29,2	34,0	25,48	25,0
Осадка, [м]	11,0	8,1	10,5 / 8,5	10,6	8,9
Водоизмещение, [м]	23 625	20 791	33 530 / 25540	13 842	16000
Турбины, [кВт]	2 x 27 960	2 x 18 400	2 x 36 000	3 x 18 350 / 6 x 2 200	4 x 8 640
Мощность на валу	54 000	35 000	60 000	55 000 / 44 130	22 000
Скорость, [узлов]	20,8	20,2	22	17,5	17,0
Толщина льда, [м]	2,25	1,7	2,8-2,9	1,8	1,37
Экипаж, [чел]	107	91	53	146	85

Осадка. Тяжелый дизельный ледокол «Polar Sea» не способен работать на мелководных участках, аналогичных реке Енисей. В то же время легкий ледокол «Healy», имеющий меньшую осадку, не способен выполнять задачи, сходные решаемым ледоколами типа «Таймыр» или ЛК-60Я, из-за недостаточной мощности. Более значительная осадка дизельных ледоколов обусловлена весом органического топлива при полной загрузке.

Ледоходимость. Водоизмещение ледокола «Polar Sea» почти вдвое меньше, чем у ледокола типа «Арктика». Следовательно, ледоколы США не рассчитаны на работу во льду толщиной выше 1,3 метра. Они не смогут выполнять ледокольные операции в условиях, подобных восточному сектору Арктики, где толщина льда достигает 2 м. В целом характеристики ледокола «Polar Sea» сопоставимы с характеристиками ледокола «Капитан Драницын», паспортная ледоходимость которого составляет 1,3 метра из-за малого водоизмещения. Заявленная ледоходимость ледокола «Polar Sea» (1,8 м) сомнительна в реальных условиях – массы ледокола не хватит для разрушения льда такой толщины. Также надо отметить, что с израсходованием органического топлива будут уменьшаться вес и осадка дизельного ледокола, это постепенно приведет к снижению его ледоходимости за счет недостаточной массы, которая у «Polar Sea» практически в два раза меньше, чем у ледокола типа «Арктика».

Мощность. Самый мощный ледокол флота США «Polar Sea», сопоставим по мощности с атомным ледоколом типа «Арктика» (55 МВт). Однако это справедливо только при форсированном режиме, поддерживать который более двух-трех часов до перегрева двигателя судно не сможет. Расход топлива и износ двигателя при таком режиме существенно растут: расход топлива в форсированном режиме составляет до 16 т/ч.

Автономность. У атомного ледокола автономность ограничена запасом продовольствия (около 7 месяцев), перезарядка реактора происходит раз в пять лет, (на ледоколах ЛК60 по заданию – раз в семь лет). Автономность ледокола «Polar Sea» заявлена в 3 месяца. По топливу автономности этого ледокола не должна превышать 60 суток при обычной интенсивности работы (из опыта эксплуатации неатомных ледоколов РФ).

Экологичность. При движении на форсированной мощности дизельный ледокол выбрасывает продукты сгорания от 300 тонн органического топлива в день. У атомного ледокола такие выбросы отсутствуют.

Таким образом, налицо превосходство атомной ЭУ для ледоколов.

На ряде проектов применяются носовые гребные винты. Они появились во второй половине XIX в. в Северной Америке. Преимуществом такой конструкции явилась возможность размыва не смерзшихся ледяных образований. Это связано с тем, что гребные винты образуют поток воды, который снижает сопротивление за счет уменьшения трения льда о корпус судна. Недостаток носового расположения гребных винтов – невозможность в то время обеспечить достаточную прочность лопастей гребных винтов и валопровода. Тем не менее, во второй

половине XX в. был построен и долго эксплуатировался целый ряд ледоколов, оснащенных носовыми двигателями. Это ледоколы типа «Капитан Белоусов» и «Василий Прончищев» в СССР, типа «Войма», «Карху» и «Тармо» в Финляндии, «Эльбьерн» и «Данбьерн» в Дании. Ледоколы типа «Капитан Белоусов» и «Василий Прончищев» носовой винт не использовался. Опыт эксплуатации таких ледоколов показал, что они наиболее эффективны в условиях стесненных фарватеров, набитых тертым льдом и шугой. В работе [5] проведено теоретическое обоснование снижения сопротивления при движении задним ходом. Результаты расчета представлены на рисунке 4. Из анализа результатов следует, что при работе носовых двигателей (движение задним ходом) ледовое сопротивление уменьшается в 1,6–1,8 раза.

У современных судов двойного действия (например, типа «Василий Динков» или типа «Норильский никель») носовая оконечность имеет ледокольную или умеренно ледокольную форму, что позволяет этим судам работать как носом, так и кормой вперед.

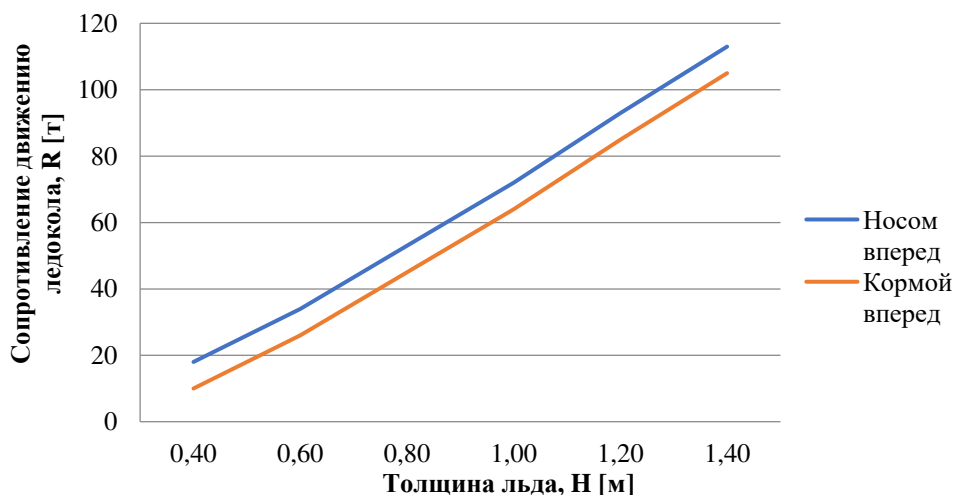


Рисунок 1 – Сравнение сопротивления движению судна во льду носом и кормой вперед

Указанные суда уже несколько лет эксплуатируются в полярных морях, и этот факт является обоснованием возможности применения технологии двойного действия в Арктике. Опыт показал, что наиболее эффективно в этом случае применение двигатель-рулевых комплексов типа «Азипод», так как при движении задним ходом обычные гребные винты фиксированного шага при реверсе развивают не более 70 % тяги переднего хода. Использование же винто-рулевых колонок, позволяет развивать на заднем ходу тяговые усилия, сравнимые по величине с тягой переднего хода.

Идея судна двойного действия была реализована в небольшом количестве проектов, например, танкера типа «Tempeta» и «Mastera», эксплуатирующиеся во льдах Финского залива. Эти суда достаточно хорошо себя зарекомендовали при движении в набитых и слегка смерзшихся ледяных каналах. В арктических условиях эти суда не применялись.

Выводы:

Атомная энергетика остается единственным приемлемым решением для ледокольного флота РФ, так как обеспечивает два ключевых показателя работы: мощность и автономность. Кроме того дизельные ледоколы имеют большую осадку относительно мощности, что обусловлено весом органического топлива при полной загрузке;

Значительный интерес представляет оснащение перспективных ледоколов носовыми двигатель-рулевыми комплексами (ДРК) типа «Азипод». Преимуществом такой конструкции является возможность размытия не смерзшихся ледяных образований. Это связано с тем, что носовые гребные винты образуют поток воды, который снижает сопротивление за счет уменьшения трения льда о корпус судна. При этом необходимо будет предусмотреть ледовую защиту ДРК.

Библиографический список

1. Никипелов А.В. Суперледоколы с сердцем от АЭМ. М.: Вестник АЭМ №11 (76) ноябрь 2018 г., стр. 01 – 04;
2. Рукша В. В. Атомный ледокольный флот как ключевое звено инфраструктуры Северного морского пути, «Наука и транспорт» № 2 2012, стр. 41-43;
3. Универсальный атомный ледокол. Спецификация. 2220.360060.130.2, ОАО «ЦКБ «Айсберг», 2009.

УДК 67.05

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМОДИФИКАТОРЫ

Д.В. Алимова, К.И. Кононов

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

При механической обработке металлов в зоне контакта инструмента с заготовкой действуют силы трения и выделяется большое количество тепла. Это приводит к ухудшению качества поверхностей, ускоренному износу инструмента и оборудования, изменению свойств и структуры обрабатываемого металла из-за перегрева. Чтобы избежать этих негативных последствий, а также для уменьшения изнашивания контактирующих поверхностей режущего инструмента и снижения сил трения при разрушении резанием материалов необходимо применение

смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Большинство современных технологических процессов металлообработки в промышленности невозможны без использования смазочно-охлаждающих жидкостей, которые способствуют значительно увеличению срока службы инструмента, повышению производительности и качества обработки.

СОЖ, применяемые в обработке резанием, должны гарантированно разделять контактирующие поверхности инструмента и обрабатываемого материала. Кроме того, для СОЖ, применяемых при обработке резанием, необходимым условием является: хорошая охлаждающая способность, существенное снижение трения между режущей кромкой и обрабатываемым материалом, предупреждение сцепления (адгезии) контактирующих поверхностей, а также «расклинивающее действие» при разрушении материала обрабатываемой заготовки и пассирующее действие по отношению к поверхности режущего инструмента.

При токарной обработке эффективные СОЖ уменьшают площадь контакта стружки с передней поверхностью резца, снижают силу трения и адгезии, а неэффективные – могут повышать площадь контакта. Например, при резании свинца со скоростью 0,2 м/с эмульсия снижает длину контакта стружки с передней поверхностью резца в 2 раза при толщине среза 0,03 – 0,05 мм и в 1,4 раза при толщине среза 0,4 – 0,5 мм, а четыреххлористый углерод увеличивает длину контакта до 5 раз.

С ростом толщины среза и скорости резания влияние СОЖ падает. Улучшение смазывающих свойств СОЖ практически не влияет на средние контактные касательные напряжения на передней поверхности резца и увеличивает средние нормальные напряжения в результате уменьшения площади контакта стружки с инструментом. Наиболее сильно СОЖ снижает силу трения у режущей кромки на первой четверти длины зоны контакта стружки с передней поверхностью. С увеличением расстояния от режущей кромки смазывающее действие СОЖ уменьшается.

Анализируя проблемы выбора и применения добавок необходимо опираться на существующие их классификации по механизму действия. Добавки разделяют на четыре класса:

- 1 – добавки, изменяющие растворимость системы твердения и не вступающие с ней в химическое взаимодействие;
- 2 – добавки, реагирующие с системой твердения с образованием труднорастворимых или малодиссоциирующих соединений;
- 3 – добавки, готовые центры кристаллизации;
- 4 – добавки, адсорбирующиеся на зернах твердого вещества.

Данную классификацию добавок целесообразно уточнить, разделяя их и по размерному признаку на наноразмерные, ультрадисперсные и микродисперсные (показано на рисунке 1).

№ п/п	Тип систем	Название и химический состав	Размер частиц и морфология частиц	Механизм действия
1	Наноразмерные	Наноразмерный кремнезем $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$\varnothing = 5 - 10$ нм шарообразные частицы	1) Непосредственное химическое участие наноразмерных частиц (НРЧ) в гетерогенных процессах фазообразования гидратных соединений; 2) каталитическая роль НРЧ как центров кристаллизации (роста новой фазы)
2		Золь $\text{Fe}(\text{OH})_3$	$\varnothing = 5 - 10$ нм, шарообразные частицы	
3		Золь $\text{Al}(\text{OH})_3$	$\varnothing = 30 - 50$ нм, шарообразные частицы	
4		Монтмориллонит – синтетический $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$\sim 5 - 10$ нм гексагональные пластинки	
5		Нанотрубки хризотила $[\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$	$\varnothing = 25 - 50$ нм, $l = 100 - 700$ нм трубчатое строение	
6		Углеродные нанотрубки фуллероидного типа, содержание углерода $\sim 99\%$	$\varnothing = 2$ нм; $l = 200$ нм трубки из графитового полотна	
7		Цеолитный золь – цеолит типа NaX, соотношение Si/Al = 1,3...1,5	$\varnothing = 0,8 - 1,2$ нм сетчатая структура	
8	Ультра-дисперсные	«Астрален – С» водорастворимый аналог фуллерена Содержание углерода $\sim 99\%$	средний размер кластеров 300 нм трубчатое строение	1) Повышение плотности упаковки системы слоения дисперсных частиц; 2) зонирование структуры пористости материала
9		Микрокремнезем $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$\sim 100 - 300$ нм	
10	Микро-дисперсные	Монтмориллонит – природный $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	< 1 мкм слоистая, листовая структура	Зонирование структуры твердения
11		Шунгит – С 60 – 70 %; зола 30 – 40 %; $\text{SiO}_2 - 35 - 50\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 10 - 25\%$	0,1 – 10 мкм графитоподобные глобулы	
12		Трепел – $\text{SiO}_2 - 70 - 85\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 5 - 13\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2 - 5\%$ и др.	0,01 – 0,001 мм сферические округлые опаловые глобулы кремнезема	

Рис. 1. Модификаторы nano-, ультра-, микроразмерного уровня дисперсности и механизм их действия

Следует отметить, что многие добавки из тех, что указаны на рисунке 1, уже стали предметом исследований в работах по созданию наноматериалов и наномодификации структуры.

За счет структурирования СОЖ добавкой нанопорошка снижаются трибодеструктивные явления в поверхностном смазочном слое, что способствует повышению антиоксидантных свойств и влияет на долговечность режущей кромки инструмента, а это, в свою очередь, положительно сказывается на качестве обрабатываемой поверхности.

Основными условиями повышения эффективности использования наномодификаторов в качестве добавок могут быть их сорбционная активность, термостойкость и повышенная тепло- и электропроводность.

При создании нанофазных и нанокомпозитных материалов используется широкий спектр нанопорошков. К ним относятся [1]:

- фуллерены и структуры, подобные фуллеренам, ультрадисперсные металлы, полученные термическим разложением прекурсоров, химическим восстановлением, вакуумным катодным распылением;
- продукты детонационного синтеза - наноалмазы и ультрадисперсный графит типа алмаза - наполнитель;

– оксиды металлов, образующихся при термическом восстановлении, имплантации.

Фуллерены – это недавно открытая природная форма углерода, существующая наряду с уже хорошо известными – графитом, алмазом и карбином. Фуллерены представляют собой полые внутри кластеры, замкнутая поверхность которых образована правильными многогранниками из атомов углерода. В молекулах фуллеренов атомы углерода расположены в вершинах правильных шести- и пятиугольников, из которых составлена поверхность сферы или эллипсоида (рисунок 2).

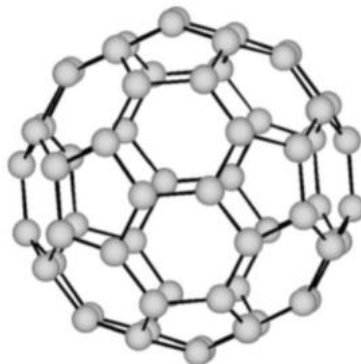


Рис. 2. Модель молекулы фуллерена

После создания технологии получения фуллеренов было обнаружено, что в результате термического распыления графитового анода в электрической дуге наряду с молекулами, принадлежащими к семейству фуллеренов, образуются также протяженные структуры, представляющие собой свернутые в однослойную или многослойную трубку графитовые слои. Длина таких образований, получивших название «нанотрубок», достигает сотен нанометров и на несколько порядков превышает их диаметр, составляющий обычно от одного до нескольких нанометров.

В отличие от фуллеренов, которые осаждаются вместе с сажей на стенках газоразрядной камеры, нанотрубки находятся преимущественно на поверхности катода, обращенной к межэлектродному промежутку.

Углеродные нанотрубки – это протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей и заканчивающиеся обычно полусферической головкой, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена (рисунок 3).

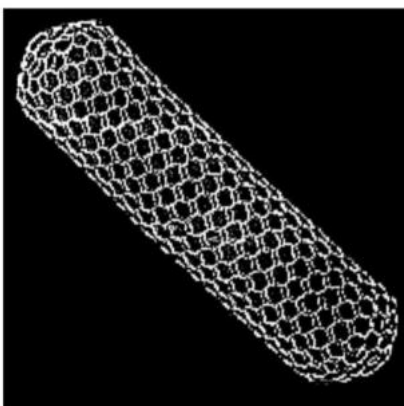


Рис. 3. Схематическое изображение углеродной нанотрубки

Углеродные нанотрубки сочетают в себе свойства молекул и твердого тела и могут рассматриваться как промежуточное состояние вещества. Эта особенность привлекает к себе постоянное внимание исследователей, изучающих фундаментальные особенности поведения столь экзотического объекта в различных условиях.

Углеродные нанотрубки стоят в ряду наиболее перспективных наноматериалов благодаря своим уникальным свойствам, обеспечивающим возможность их применения в различных областях науки и техники. В настоящее время проводятся интенсивные исследования как по изучению физико-химических свойств нанотрубок, так и по поиску областей их применения.

На сегодняшний день при разработке основных составов наномодификаторов для смазок обозначились следующие направления [2]:

- добавление углеродсодержащих соединений с высокой адсорбционной активностью, способствующих формированию контактных слоёв из упорядоченных структур, которые при воздействии высоких температур и напряжений сдвига проявляют устойчивость к распаду;

- включение нанокластерных структур на базе углеродных металлосодержащих элементов, способствующих осуществлению микрорезания, удалению повреждённого слоя на поверхности трения и образованию ювенильных поверхностей с их последующей пассивацией;

- использование нанопорошков, изменяющих свои трибологические свойства при воздействии эксплуатационных факторов вследствие сопутствующих химических превращений.

Существенным недостатком при использовании нанопорошков в качестве модификаторов СОЖ могут являться сложности стабилизации и равномерного распределения в объёме смазочного материала из-за высокой

поверхностной энергии (агрегатирования). Существует множество различных методов, направленных на предотвращение этого обстоятельства, а именно пассивация, стабилизация коллоидными растворами, использование инкапсулирующих веществ (конвертов) и т. д. Таким образом, исходя из полученных данных, использование наноструктурированных СОЖ с фуллероидальными наномодификаторами позволяет примерно вдвое снизить износ инструмента и шероховатость обрабатываемой поверхности [3].

Долматов В.Ю. рассмотрел очень перспективный метод модификации смазок ультрадисперсными алмазно-графитовыми порошками. Введенные в материалы наноалмазы (НА) играют роль мощного структурообразователя, обеспечивая дисперсное упрочнение композиции. Включение наноалмазов в смазочно-охлаждающие жидкости способствовало значительному снижению силы резания [4].

Таким образом при резке использование СОЖ с добавлением активных частиц способствует появлению защитной пленки на лезвии инструмента. Положительным фактором такой среды является ее пластифицирующее действие при обработке металлов. Снижается поверхностная энергия обрабатываемого металла. Напряжение сдвига поверхностного слоя уменьшается, а значит, снижаются сила трения и температура обработки.

Дальнейшие исследования и внедрение наномодификаторов позволят как минимум избавиться от СОЖ с вредными компонентами при резке труднообрабатываемых материалов, максимально - для повышения эффективности режущего инструмента, что, в свою очередь, приведет к снижению стоимости готовой продукции.

В статье рассмотрена классификация углеродных наномодификаторов для смазочно-охлаждающей жидкости, определены их преимущества и недостатки. Установлено, что нанопорошки обладают собственными уникальными свойствами, которые можно использовать для повышения качества и производительности металлообработки.

Библиографический список

1. Поляков С.А. Нанотехника в трибологии // 2006. № 1. С. 42– 51.
2. Образцов Л.Н. Наноалмазы в смазочных композициях // Вестник Полоцкого государственного университета. 2010. С. 83 – 91.
3. Петров В.М., Сойту Н.Ю., Петров Ю.В. Результаты испытаний наноструктурированных СОЖ, содержащих активные фуллероидные наномодификаторы, на операциях сверления конструкционных материалов, применяемых в машиностроении // Вестник СГТУ. 2010. №3 (46). С. 49-55.
4. Долматов В.Ю. Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и применение // Успехи химии. 2007. № 4. С. 375 – 397.

УДК 623.428; 347.774

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРИТЕЛЯ МАССЫ. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ РЫНКА

А.В. Круглов, С. С. Христов

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

Современные аналоги технических устройств уже давно не стоят на месте. Повсеместно в мире изобретаются новые технические системы и комплексы. Именно об одном из таких устройств, основанного на разработке электромагнитного ускорителя массы, и его возможного спроса на российском рынке, пойдет речь в данной публикации. Электромагнитный ускоритель массы – это устройство для придания металлическому телу начальной энергии, за счет его притяжения коротким импульсом электромагнитного поля. Данный принцип работы изображен на Рис. 1.

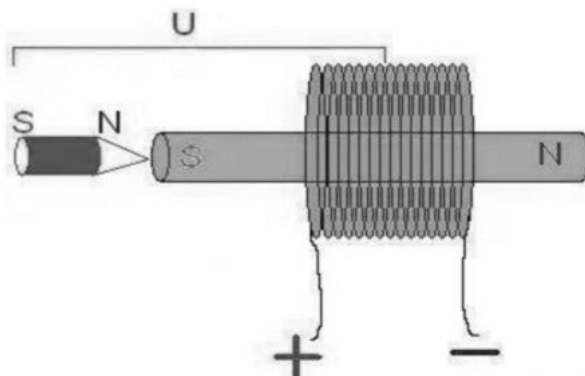


Рис. 1. Принципиальное устройство работы

Целью нашей работы заключается в нахождение применения в различных отраслях промышленности в частности транспорте, перемещении складских грузов. Второй целью проекта является создание научно-технического стенда для изучения электромагнитной индукции.

Первым создателем подобного устройства ускорителя массы был немецкий физик Карл Иоганн Гаусс, благодаря чему ускоритель имеет второе название более известное, как ускоритель Гаусса. Но Карл Гаусс является далеко не последним изобретателем в своей отрасли. Его разработки продолжили многие изобретатели и ученые продолжили его работу. Из иностранных ученых работавших над проектом ускорителя стоит отметить Франца Оскара Лео-Эльдара Фон Гафта. Максимальная скорость тела его изобретения достигала порядка 53 м/с при массе снаряда 1 кг. Еще одним иностранцем, работающим в данной отрасли, был французский изобретатель Андре Луи Октав Фашин Велепле. Он создал модель электромагнитного ускорителя способного разогнать снаряд в 50 г в 200 м/с. Но не стоит думать, что разработками электромагнитных ускорителей занимались исключительно за рубежом. В 1915 г русские инженеры Н. Подольский и М. Ямпольский создали проект магнитно-фугального ускорителя большой мощности. Расчетная длина ускорителя и скорость снаряда планировалась около 50 м и 915 м/с, но из-

событий революции проект не был воплощен в жизнь. Пожалуй, наибольшими успехами в данной отрасли может похвастаться техасский инженер Виджел Регсби его модель электромагнитного ускорителя представлена на Рис. 2.

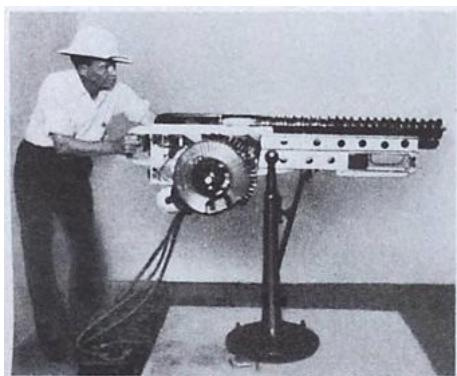


Рис. 2. Электромагнитный ускоритель В. Регсби

Он достиг скорости цилиндрического тела в 121 м/с при массе снаряда 10 г. Однако все вышеперечисленные имели небольшой недостаток, им требовалось огромное количество электроэнергии. На столько большое, что им требовалась маленькая переездная электростанция. Именно по этой причине, в 70-е года прошлого века разработки остановились. Но сейчас, с изобретением литиевых аккумуляторов, пусть еще и не достаточных для эффективной долгой работы легких переносных установок, и полупроводниковых систем способных коммутировать большую мощность и огромные токи, появилась возможность создания компактных электромагнитных ускорителей массы. В ходе проведенного анализа информационных баз данных было выяснено, что сфера современного развития отрасли строения электромагнитных ускорителей находится в упадке.

Сейчас из доступных запатентованных образцов на рынке в свободной продаже имеется лишь два образца. Обе модели ускорителя Гаусса являются творением компании Arcflash Labs. Стоит отметить, что американский стартап является монополистом, что на мировом, что на отечественном рынке. На данный момент компания имеет два промышленных образца в своем ассортименте. Первый образец IMI-01B представлен на рис. 3 и ориентирован на индустрию развлечений. Стартап Arcflash Labs в своем проекте добился скорости полета тела 46 м/с при массе снаряда 4,6 г. С более подробных характеристик можно ознакомиться в Табл. 1. Вторая модель GR-1 представлена на рис. 4. В этом прототипе компания добилась скорости тела 75 м/с при диаметре пули в 12 мм и массе 32,8 г.



Рис. 3. Гаусс ускоритель IMG-01B



Рис. 4. Гаусс ускоритель GR-1

Также стоит отметить, недавнюю демонстрацию ускорителя Гаусса китайскими изобретателями. К сожалению, из-за малого срока времени прошедшего с момента презентации (21.11.2021) известно крайне мало сведений, поэтому на данный момент невозможно оценить в полной мере эффективность орудия. На данный момент из официальных сведений точно известно, что достигнутая скорость тела будет достигать 150 м/с при массе пули 3 г. Китайский ускоритель Гаусса будет полностью анонсирован в январе следующего года.

Для более точного сравнения эффективности абсолютно разных образцов ускорителей стоит использовать удельное соотношение начальной энергии тела к его массе и удельное отношение начальной скорости тела к его массе.

Ситуация на американском и мировом рынке обстоит так, что, сравнивая по вышеперечисленным критериям, можно сделать вывод, что более успешной установкой с точки зрения проектирования оказывается вторая модель GR-1. После анализа российского сегмента электромагнитных ускорителей мы пришли к выводу, что данный продукт почти полностью отсутствует в отечественном сегменте экономике. С целью сравнения успешности своего прототипа мною был выбран самый лучший из всех российских непрофессиональных проектов электромагнитного ускорителя массы. Ускоритель Гаусса COBRA представлена на рис.5.

Табл. 1.

Характеристики запатентованных аналогов ускорителя гаусса		
Модель	IMG-01B	GR-1 «Наковальня»
Характеристики		
Емкость конденсатора	330 мкФ	2200 мкФ
Рабочее напряжение	450 В	450 В
Вес тела	4,6 г	32,8 г
Начальная скорость	46 м/с	75 м/с
Энергия на выходе из разгонного трека	4,8 Дж	До 100 Дж
КПД	6,7%	2,8%
Общий вес установки.	4 кг	10 кг
Цена покупки установки	1 075\$ (77 400 руб.)	3 375 \$ (243 000 руб.)
Удельное соотношение Дж/г	1,04	3,04
Удельное соотношение м/с /г	1,45	2,2



Рис. 5. Гаусс ускоритель COBRA

Авторы сконструировали десяти ступенчатый электромагнитный ускоритель массы, который достигает скорости в 61 м/с. Прототип, разработанный в БГТУ «Военмех» достигает приблизительно похожих скоростей уже на 6 ступени при большем КПД. Более подробный анализ приведен в Табл. 2.

Табл. 2

Российские аналоги пушки Гаусса.

Модель	Собра	Прототип Разработанный в СКБ БГТУ «Военмех»
Характеристики		
Емкость конденсатора	2200 мкФ	1000 мкФ
Рабочее напряжение	400 В	400 В
Вес тела	13,63 г	7,72 г
Начальная скорость	61 м/с	60 м/с
Энергия на выходе из разгонного трека	24 Дж	15 Дж
КПД	15,4%	17,4 %
Общий вес установки.	3 кг	2,4 кг
Себестоимость производства 1 шт.	32 000 руб.	15 000 руб. (по предварительным расчетам)
Удельное соотношение Дж/г	1,6	1,94
Удельное соотношение м/с /г	4,47	7,51

Анализируя Табл. 1 и Табл. 2 и сравнивая через удельное отношение модели гаусс пушек, наш прототип проигрывает только в удельном соотношении переданной энергии на грамм веса пули, эту проблему можно разрешить путем рекуперации, возврата, энергии в систему тем самым повысить мощность установки и сократить энергитические затраты. Что касается остальных параметров, то по ним наш проект выигрывает зарубежные образцы и российские не запатентованные аналоги.

Также, стоит отметить, что проект можно применить в различных отраслях промышленности. К примеру, анализ рынка показал, что современные роботизированные системы сортировки почтовых отправлений и складских грузов крайне дорогие и сложные в производстве и обслуживании. Аналоги вакуумной транспортировки мелких грузов вполне можно увидеть на любой кассе продуктового магазина. Однако подобный тип туннелей имеет ряд недостатков. Во-первых, невозможность прохождения по туннелю двух поездов, идущих в разных направлениях. Во-вторых, необходимость герметизации. В-третьих, большие энергитические затраты, в следствии поддержания вакуума. Также электромагнитный ускоритель по сравнению с вакуумными системами отличается более простым техническим устройством.

Третьим применением применение по праву может считаться транспортная сфера. На данный момент активно развиваются вакуумные поезда. Самым знаменитым на сегодняшний день вакуумным поездом является туннель HYPER LOOP изображенный на рис. 6.



Рис. 6. Туннель HYPER LOOP В Лос-Анжелесе

И последней областью применения является создание экспериментального обучающего стенда для старших школ и университетов. Ускоритель может использоваться для наглядной демонстрации силы ампера. Подобного оборудования не производит никто в мире. С помощью электромагнитного ускорителя также можно более наглядно объяснить взаимосвязь параметров электромагнитного поля влияющих на ускорение тела в магнитном поле. Создание стенда поможет изучать электромагнитное поле и индуцированные наведенные токи не через эффект Холла, который требует соответствующего оборудования, а путем измерения скорости снаряда и проведении дальнейших расчетов. Также с помощью установки возможно изучение явления серийного откола тела.

Научный руководитель – старший преподаватель БГТУ «ВОЕНМЕХ» кафедры А1 Ракетостроение Чириков С. А.

Библиографический список

1. Наука и техника [электронный ресурс]. – URL: <https://naukatehnika.com/elektromagnitnoe-oruzhie.html> (Дата обращения 13.02.2022)
2. South Morning China Post [электронный ресурс]. – URL: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3158522/chinese-researchers-turn-artificial-intelligence-build> (Дата обращения 13.02.2022)
3. Arcflash Labs [электронный ресурс]. – URL: <https://arcflashlabs.com/product/emg-01b/> (Дата обращения 13.02.2022)
4. Arcflash Labs [электронный ресурс]. – URL: <https://arcflashlabs.com/product/gr-1-anvil/> (Дата обращения 13.02.2022)
5. Hubr [электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/company/selectel/blog/563318/> (Дата обращения 13.02.2022)
6. Pikabu [электронный ресурс]. – URL: https://pikabu.ru/story/pushka_gaussa_gauss_gun_cobra_6614852 (Дата обращения 13.02.2022)

УДК 623.468.082.5

РАСЧЁТ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ БОРЬБЫ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Михайлов Е.А., Иванов В.Е.

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

В современных условиях ведения боевых действий беспилотные летательный аппараты становятся все более серьезной угрозой для союзной инфраструктуры, живой силы и техники. Особенно выделяются дешёвые ударные беспилотники, созданные из гражданских комплектующих и способные изготавливаться в полевых условиях. Например, события в ночь с 5 на 6 января 2018 года в Сирии, на авиабазе Хмеймим, показали степень угроз и уровень ущерба от налета таких БПЛА. Как результат, к разрабатываемым средствам противодействия выдвигаются особые требования, такие как низкая себестоимость и техническая простота.

Существующие средства вооружения РФ способны бороться с БПЛА, которые описаны выше, однако, к недостаткам можно отнести 2 фактора:

1) стоимость существующих средств (ракеты комплексов 9К330 «Тор» и 9К6Б «Панцирь» стоят от нескольких десятков миллионов рублей)

2) осколочная часть ранее обозначенных ракет рассчитана для поражения крупных целей, что достигается путём увеличения размера каждого осколка, но приводит к снижению плотности осколочного поля.

В данной статье рассмотрены моделирование и расчёт боевой части ракеты для поражения беспилотный летательных аппаратов. Предлагаемая боевая часть является частью ракетной системы «новой» концепции (неуправляемые ракеты, отличающиеся дешевизной и технической простотой) и одновременно устраняет недостатки существующих БЧ. Это достигается путём использования готовых осколков - дроби, что снижает стоимость производства, а также повышает плотность осколочного поля путём использования большого количества этих самых осколков (ввиду их малых размеров).

Производится расчет необходимого количества поражающих элементов (дроби). Предположим, что для уничтожения БПЛА любого вида достаточно поразить $10 \times 10 \text{ см}^2$ его площади. Таким образом, при попадании хотя бы одной дробины в $0,01 \text{ м}^2$ площади вероятность поражения равна 100%. Министерство обороны РФ принимает на вооружение изделия, которые гарантируют поражение цели с вероятностью 95%. Поэтому принятая для расчетов доверительная вероятность равна 96%, в таком случае необходимая для «покрытия» площадь несколько увеличится:

$$\frac{0,01}{x} = \frac{96\%}{100\%} \Rightarrow x = 0,01 * 100 / 96 = 0,0104 \text{ м}^2$$

Идея заключается в том, что зона поражения представляется в виде сферы, с определенным радиусом. Формула площади поверхности сферы:

$$S = 4 * \pi * R^2, \text{ где } R - \text{ радиус сферы}$$

Зная площадь поверхности сферы, можно определить, сколько поражающих элементов необходимо для покрытия зоны с заданным уровнем вероятности, идея представлена на рисунке 1.

Формула необходимого числа поражающих элементов:

$$N = \frac{4 * \pi * R^2}{x}, \text{ где } x - \text{ площадь необходимого покрытия}$$

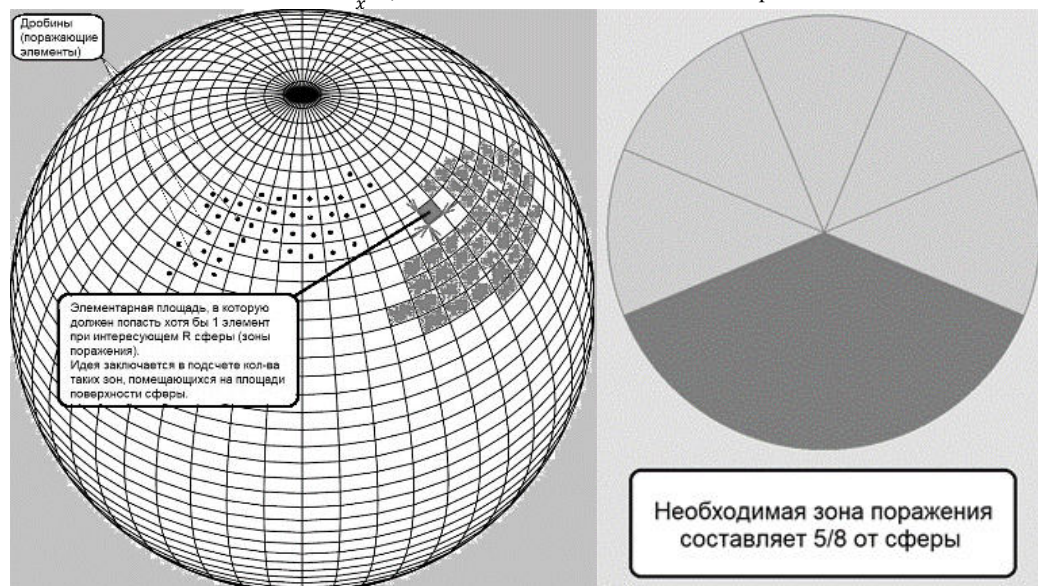


Рис.1 – Сфера с отображенными площадками (зона поражения) и доля от сферы, влияющая на расход дроби (выделена светлым)

Зона поражения не может быть сферой так как боевую часть несет корпус ракеты, следовательно необходимая площадь поверхности покрытия является некоторой долей от полной площади поверхности сферы, например доля 5/8, рисунок 1. С помощью пакета Microsoft Excel сформирована таблица 1 с расчетами необходимой массы поражающих элементов, для покрытия элементарных площадок размером 0,01 м². При этом учитывается, что зона поражения составляет 5/8 от площади поверхности сферы, а вероятность поражения равна 96%.

Таб. 1 – Необходимая масса поражающих элементов в граммах (Вероятность поражения 96%, элементарные площадки размером 10см*10 см)

	Диаметр дроби, мм	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,6	6,2
	Масса одной дробины, грамм	0,049	0,093	0,161	0,256	0,371	0,555	0,74	1,032	1,401
Радиус поражения, м	1	37	70	121	193	280	418	558	778	1 056
	2	148	280	485	772	1 118	1 673	2 231	3 111	4 223
	3	332	631	1 092	1 736	2 516	3 764	5 019	6 999	9 502
	4	591	1 121	1 941	3 087	4 473	6 692	8 923	12 443	16 893
	5	923	1 752	3 033	4 823	6 990	10 456	13 942	19 443	26 395
	6	1 329	2 523	4 368	6 945	10 065	15 057	20 076	27 998	38 009
	7	1 809	3 434	5 945	9 453	13 700	20 494	27 326	38 108	51 734
	8	2 363	4 485	7 765	12 347	17 893	26 768	35 690	49 774	67 571
	9	2 991	5 677	9 828	15 627	22 646	33 878	45 171	62 995	85 519
	10	3 693	7 008	12 133	19 292	27 959	41 825	55 766	77 772	105 579

Для большей наглядности данные из таблицы представлены в виде поверхности с соответствующими пояснениями, рисунок 2. Для построения поверхности использовался Microsoft Excel.

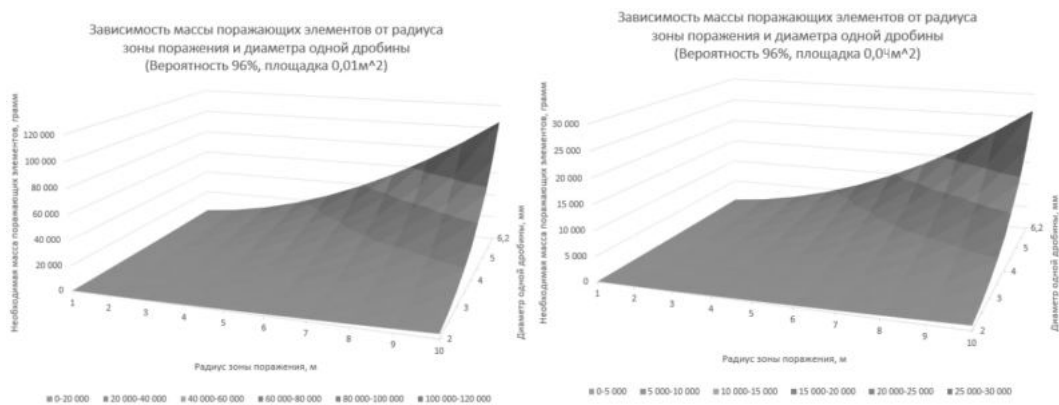


Рис.2 – Поверхности, построенные по результатам расчётов при разных размерах поражаемой площадки

Представленные таблицы содержат информацию о полной массе поражающих элементов (дробин) различных диаметров и масс, при различных доверительных вероятностях поражения и различных элементарных площадках, при попадании в которые гарантируется уничтожение.

При этом, полученные данные позволяют оценить соотношения параметров БЧ, при которых боевая часть абсолютно не подходит для решаемой задачи. Например, масса поражающих элементов = 300 кг приближает ракету к классу баллистических – это явное расхождение с главной идеей исследуемого средства вооружения.

С целью выявления массы поражающих элементов, которая будет удовлетворять идее разрабатываемого комплекса таблица была дополнена. А именно, добавлена строка, содержащая информацию о размере элементарной площади в таблице 2.

Таб. 2 – Актуализированная таблица полной массы поражающих элементов для 96% вероятности поражения ракетой

	Сторона элементарного квадрата, см	2	4	6	10	10	12	12	16	20
	Диаметр дроби, мм	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,6	6,2
	Масса одной дробины, грамм	0,049	0,093	0,161	0,256	0,371	0,555	0,74	1,032	1,401
Радиус поражения, м	1	923	438	337	193	280	290	387	304	264
	2	3 693	1 752	1 348	772	1 118	1 162	1 549	1 215	1 056
	3	8 308	3 942	3 033	1 736	2 516	2 614	3 485	2 734	2 376
	4	14 771	7 008	5 392	3 087	4 473	4 647	6 196	4 861	4 223
	5	23 079	10 951	8 426	4 823	6 990	7 261	9 682	7 595	6 599
	6	33 234	15 769	12 133	6 945	10 065	10 456	13 942	10 937	9 502
	7	45 235	21 463	16 514	9 453	13 700	14 232	18 976	14 886	12 933
	8	59 082	28 034	21 570	12 347	17 893	18 589	24 785	19 443	16 893
	9	74 776	35 480	27 299	15 627	22 646	23 526	31 369	24 607	21 380
	10	92 316	43 803	33 703	19 292	27 959	29 045	38 727	30 380	26 395

Полученные данные позволяют выявить наиболее актуальные и «интересные» варианты полной массы поражающих элементов. А также демонстрируют один из методов анализа, позволяющего менять характеристики боевой части и получать другую конструктивно-компоновочную схему ракеты.

Таким образом, для дальнейшего расчета выбраны следующие характеристики:

1. Вероятность поражения БПЛА = 96 %.
2. Элементарная площадка, гарантирующая уничтожение БПЛА = 4см*4см.
3. Радиус зоны поражения = 3 метра.
4. Диаметр дроби = 2,5 миллиметра.
5. Масса одной дробины = 0,093 грамма.
6. Полная масса поражающих элементов = 3942 грамма.

Приблизительной скоростью, которой должны достичь дробины после подрыва БЧ на расстоянии 3 метра от точки подрыва (радиус гарантированной зоны поражения), может выступать скорость дроби при выстреле из огнестрельного ружья. Дробины достаточно эффективно уничтожают БПЛА, квадрокоптеры и дроны. Главное, чтобы БПЛА находился близко к стрелку, иначе дробь просто не попадет в дрон.

Расстояние от стрелка до БПЛА, в момент уничтожения, равно 10 м, следовательно, скорости дроби при выстреле из огнестрельного ружья достаточно, чтобы уничтожить дрон [5]. В открытых источниках содержится множество информации о скорости дроби после выстрела, которые занесены в таблицу 3.

Таб. 3 – Падение скорости дроби при выстреле (нач. скор. $V_0 = 375$ м/с)

Диаметр дроби в мм	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	8,0
№ дроби	10	9	8	7	6	5	3	1	0000	Картечь	
Дистанция в м	Скорость дроби в м/сек										
5	332	337	341	344	346	348	352	354	356	358	361
10	285	293	300	306	311	315	321	326	333	338	345
15	248	259	269	276	283	288	297	304	316	322	332
20	218	231	242	251	259	266	277	285	298	308	320
25	196	209	220	230	239	246	258	268	284	296	311
30	174	187	199	210	221	230	245	256	271	283	300
35	156	170	183	194	204	213	228	240	258	272	290
40	139	154	167	178	189	199	215	228	248	261	281
50	106	125	140	153	164	174	191	205	227	243	264
60	86	102	116	129	141	151	168	183	208	225	248

Для решения данной задачи воспользуемся формулами, приведенными в лабораторном практикуме дисциплин «Поражающее действие» и «Эффективность ракетных систем» С. Н. Ельцина, необходимые формулы приведены ниже:

$$1. V_p = 0.5D \sqrt{\frac{\varphi_1 \alpha}{2 + 4\alpha/\varphi}} - \text{начальная скорость разлета осколков, где } D - \text{ скорость детонации взрывчатого вещества,}$$

φ - коэффициент, учитывающий форму боевой части ($\varphi = 3.33$ для сферической формы), φ_1 - коэффициент, учитывающий потери энергии, идущей на разрушение оболочки или на прорыв продуктов детонации в зазоры готовых фрагментов и передаваемый осколками воздуху в момент разлета ($\varphi_1 = 0.95$ для разрабатываемой БЧ).

2. $\alpha = \frac{m_{BVi}}{m_M}$ - коэффициент, где m_{BVi} - масса взрывчатого вещества, приходящегося на осколки i -го пояса, m_M - масса осколков в i -м поясе.

3. $V_R = V_0 \exp\left(-C_x \frac{\rho S_{cp} R}{2m}\right)$ - скорость осколка на расстоянии R от точки подрыва, где C_x - коэф. аэродин. сопротивления осколка, ρ - плотность воздуха, S_{cp} - характерная площадь осколка.

Для начала посчитаем, какая должна быть начальная скорость осколка, чтобы скорость на расстоянии 3 метра равнялась 300 м/с. Для решения используется код, написанный в MatLab:

```
R=3; %расстояние от точки подрыва (радиус зоны поражения), м
r=(2.5/2)/1000; %радиус дробины, м
S=pi*r^2; %характерная площадь дробины
rho=1.23; %плотность атмосферы, кг/м^3
Cx=0.4; %аэродинамический коэффициент для шара
m=0.093/1000; %масса одной дробины, кг
Vr=300; %необходимая скорость на границе зоны поражения, м/с    V0 =

V0=Vr/exp((-Cx*p*S*R)/(2*m));                                     311.9166
```

Для дальнейших расчетов необходимая начальная скорость осколка (дробины) принимается = 312 м/с. Основной задачей данного раздела является нахождение необходимой массы взрывчатого вещества в боевой части разрабатываемой ракеты. Анализируя метод, применяемый в лабораторном практикуме, можно рассчитать всё необходимое. Данные, необходимые для расчета, приведены в таблице 4.

Таб. 4 – Скорости детонации взрывчатых веществ.

Взрывчатые вещества	Скорость детонации, м/с
Дымный порох	400
Пироксилин (с 13% N)	6300
Нитроглицерин	7450
Гремучий студень	7800
Гурдинамит (с 75% нитроглицерина)	6650
Гремучая ртуть	6500
Пикриновая кислота	7100
Тринитротолуол	6700
Тринитробензол	7000
Тринитрокрезол	6850
Тетрил	7200
Аммонал	5400

Из вышеперечисленных формул 1 и 2 выводим следующую формулу для расчёта массы ВВ:

$$m_{BVi} = \frac{2 \left(\frac{V_p}{0.5D} \right) \varphi m_M}{\varphi_1 \varphi - 4 \left(\frac{V_p}{0.5D} \right)^2}$$

Для автоматизации расчёта создаём код расчёта в MatLab:

```

%СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ТВЕРДЫХ ВВ
D1=400; %дымный порох, м/с
D2=5400; %аммонал, м/с
D3=6300; %пироксилин, м/с
D4=7000; %тротил, м/с
D5=7200; %тетрил, м/с
D6=7800; %гремучий студень, м/с

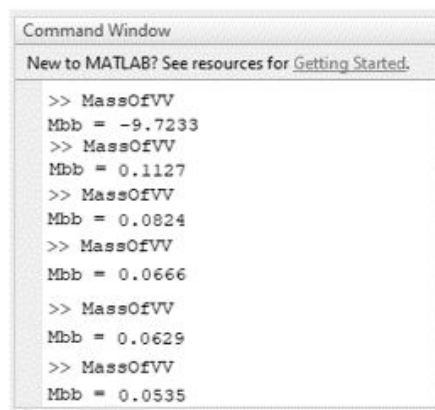
%ОСТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ
Mm=3942/1000; %полная масса осколков, кг
Fi1=0.95; %коэф. потерь энергии на прорыв оболочки
F1=3.33; %коэф. формы БЧ (сфера)
Vp=312; %потребная скорость осколков, м/с

%РАСЧЕТНАЯ ФОРМУЛА ПОЛНОЙ МАССЫ ВВ

Skobka=Vp/(0.5*D6);
Chislitel=2*F1*Mm*Skobka^2;
Znamenatel=Fi1*Fi - (4*(Skobka^2));

Mbb=Chislitel/Znamenatel;

```



Mbb

В таблице 5 приведены необходимые массы взрывчатых веществ различных видов (твердое агрегатное состояние). Стоит отметить, что, используя дымный порох, невозможно добиться желаемого результата.

Таб. 5 – Потребная масса ВВ для ракеты

Название твердого ВВ	Необходимая нач. скорость осколков	Полная масса осколков	Потребная масса взрывчатого вещества, грамм
Дымный порох	312 м/с	3942 грамм	-
Аммонал			113
Пироксилин			83
Тротил			67
Тетрил			63
Гремучий студень			53

Уточняющие расчеты боевой части разрабатываемой ракеты.

Полученные ранее результаты потребовали уточнения и с этой целью использовался другой теоретический материал. Также принято решение о выборе массы ВВ равной 200 граммам, чтобы компенсировать принятые допущения, например, при расчетах не учитываются потери на прорыв оболочки боевой части. Если начальная скорость будет больше ранее обозначенной эффективность не уменьшится.

Вводится понятие коэффициента наполнения боеприпаса, который показывает соотношение массы взрывчатого вещества и полной массы боеприпаса.

$$\alpha = \frac{\omega}{m} = \frac{\omega}{n + \omega}$$

- α – коэффициент наполнения
- ω – масса взрывчатого вещества, кг
- m – полная масса боеприпаса, кг
- n – масса поражающих элементов, кг

Становится возможным рассчитать местный коэффициент наполнения ξ , который учитывает бесполезную массу. В упрощенном виде бесполезной массой, с точки зрения образования осколков, является масса взрывательного устройства.

$$\xi = \frac{\alpha}{1 - \mu} = \frac{\alpha}{1 - \frac{m_{\text{ВУ}}}{m}}$$

$m_{\text{ВУ}}$ – масса взрывательного устройства, кг

Теперь можно вычислить начальную скорость разлета осколков (дробин/картечи) по формуле:

$$v_0 = \frac{D}{2} * \sqrt{\frac{\xi}{2 - \alpha}}$$

- v_0 – начальная скорость осколка, м/с
- D – скорость детонации заряда ВВ, м/с

Ранее выявленные закономерности показывают, что потребная начальная скорость осколка должна быть не менее 375 м/с. Для дополнительной гарантии примем потребную скорость равной 400 м/с.

Основной задачей, в нашем случае, является расчет потребной массы взрывчатого вещества. Поэтому используемые формулы нужно несколько преобразовать.

$$v_0 = \frac{D}{2} * \sqrt{\frac{\xi}{2 - \alpha}} = \frac{D}{2} * \sqrt{\frac{\frac{\alpha}{1 - \frac{m_{\text{ВУ}}}{m}}}{2 - \alpha}} = \frac{D}{2} * \sqrt{\frac{\omega}{\left(1 - \frac{m_{\text{ВУ}}}{n + \omega}\right) * \left(2 - \frac{\omega}{n + \omega}\right) * (n + \omega)}}$$

v_0 – начальная скорость осколка, м/с
 D – скорость детонации заряда ВВ, м/с
 ω – масса взрывчатого вещества, кг
 $m_{\text{ВУ}}$ – масса взрывательного устройства, кг
 n – масса поражающих элементов, кг

Для упрощения расчётов используем код, написанный в MatLab:

```

%Расчет боевой части
D1 = 400; %скорость детонации дымного пороха, м/с
D2 = 6300; %скорость детонации пироксилина, м/с
D3 = 7450; %скорость детонации нитроглицерина, м/с
D4 = 7100; %скорость детонации пикриновой кислоты, м/с
D5 = 6700; %скорость детонации тринитротолуола, м/с
D6 = 7000; %скорость детонации тринитробензола, м/с
D7 = 6850; %скорость детонации тринитрокрезола, м/с
D8 = 7200; %скорость детонации тетрила, м/с
D9 = 5400; %скорость детонации аммонала, м/с

Omega = 0.2; %масса взрывчатого вещества, кг
n = 3.98; %масса поражающих элементов, кг
mvu = 0.1; %масса взрывательного устройства, кг

M_Full = n + Omega; %полная масса боеприпаса, кг
Alpha = Omega / M_Full; %коэффициент наполнения
Nyu = mvu / M_Full; %коэффициент бесполезной массы
Ksi = Alpha / (1-Nyu); %местный коэффициент наполнения

V1 = (D1/2) * sqrt(Ksi/(2 - Alpha)) %начальная скорость разлета осколков, м/с
V2 = (D2/2) * sqrt(Ksi/(2 - Alpha)) %начальная скорость разлета осколков, м/с
V3 = (D3/2) * sqrt(Ksi/(2 - Alpha)) %начальная скорость разлета осколков, м/с
V4 = (D4/2) * sqrt(Ksi/(2 - Alpha)) %начальная скорость разлета осколков, м/с
V5 = (D5/2) * sqrt(Ksi/(2 - Alpha)) %начальная скорость разлета осколков, м/с
V6 = (D6/2) * sqrt(Ksi/(2 - Alpha)) %начальная скорость разлета осколков, м/с
V7 = (D7/2) * sqrt(Ksi/(2 - Alpha)) %начальная скорость разлета осколков, м/с
V8 = (D8/2) * sqrt(Ksi/(2 - Alpha)) %начальная скорость разлета осколков, м/с
V9 = (D9/2) * sqrt(Ksi/(2 - Alpha)) %начальная скорость разлета осколков, м/с
  
```

Name	Value
Alpha	0.0478
D1	400
D2	6300
D3	7450
D4	7100
D5	6700
D6	7000
D7	6850
D8	7200
D9	5400
Ksi	0.0490
M_Full	4.1800
mvu	0.1000
n	3.9800
Nyu	0.0239
Omega	0.2000
V1	31.6926
V2	499.1586
V3	590.2748
V4	562.5438
V5	530.8512
V6	554.6206
V7	542.7359
V8	570.4669
V9	427.8502

Ниже представлена таблица 6 с начальными данными и результатом расчёта.

Взрывчатые вещества	Скорость детонации, м/с	Выбранная масса взрывчатого вещества, грамм	Начальная скорость разлёта осколков, м/с
			Расчётная
Дымный порох	400	200	31.69
Пироксилин (с 13% N)	6300		499.16
Нитроглицерин	7450		590.27
Пикриновая кислота	7100		562.54
Тринитротолуол	6700		530.85
Тринитробензол	7000		554.62
Тринитрокрезол	6850		542.73
Тетрил	7200		570.47
Аммонал	5400		427.85

Таб. 6. Результат расчёта

Некоторые из расчётных ВВ применять в проектировании не целесообразно, так как: нитроглицерин очень чувствителен к удару, трению, высоким температурам, резкому нагреву; тринитрофенол обладает повышенной коррозионной активностью и чувствительностью; тринитробензол взрывоопасен; дымный порох не обладает необходимыми энергетическими характеристиками. Такие компоненты, как: тринитротолуол, тринитрокрезол, тетрил и аммонал – допустимы к использованию в изделиях данного типа. Дальнейший выбор одного из них идёт от целесообразности, что определяется условиями эксплуатации, технологическими особенностями имеющегося производства и понижением стоимости изготавливаемого изделия.

Данная работа демонстрирует метод расчета осколочной боевой части на основе дроби или картечи, позволяет выявить потребные варианты, а также показывает возможный алгоритм подбора необходимой массы взрывчатого вещества. Все допущения и погрешности методов могут быть приняты во внимание при более детальных расчетах. Цель данной статьи – демонстрация алгоритма, метода расчета осколочной боевой части средства вооружения, когда в качестве начальных данных выступает только облик объекта, который необходимо поразить.

Библиографический список

1. Взрывчатые вещества: учебное пособие / Ю.В. Генкин; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2007. – 114 с.
2. Эффективность ракетных систем: метод. указания к лаб. работам / С.Н. Ельцин; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2011. – 74 с.
3. Основы конструкции и расчета артиллерийских боеприпасов: учебное пособие / Е.А. Знаменский; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2016. – 57 с.
4. Справочник взрывчатых веществ, 2009 // Режим доступа: <https://studizba.com/files/show/pdf/61426-1-spravochnik-po-vv-i-pirostavam-html> (дата обращения: 04.01.2022)
5. «Сбили квадрокоптер из ружья». [видеозапись] // YouTube. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=Zjzm0buBass> (дата обращения: 08.12.2021)
6. «Стрельба по дронам». [видеозапись] // YouTube. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=jj79bZbDAzs> (дата обращения: 09.12.2021)
7. Налёт на Хмеймим: <https://centercigr.livejournal.com/80961.html> (дата обращения: 23.11.2021)

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КРИОПАНЕЛЕЙ КРИОСОРБЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОТКАЧКИ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО КИСЛОРОДНО-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА

Киселев И.А., Мокрушин Е.А.
БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова

Введение. Мощные непрерывные лазеры могут быть использованы для создания оружия направленного действия, которое имеет ряд преимуществ перед традиционными видами вооружений.

В настоящее время одними из наиболее мощных источников непрерывного лазерного излучения являются химические кислород-йодные лазеры (ХКИЛ). Длина волны излучения ХКИЛ ($\lambda=1,315$ мкм) приходится на окно прозрачности атмосферы, а также соответствует рабочему диапазону волоконной оптики. Это означает отсутствие ограничений на использование лазеров этого типа в различных атмосферных и внеатмосферных условиях. Короткая длина волны обеспечивает уменьшение дифракционного предела, а малая плотностью активной среды в резонаторной полости – высокое оптическое качество лазерного луча.

Именно на базе кислород-йодного лазера был создан самый мощный на сегодняшний день мобильный комплекс ABL (Airborne Laser, США) [1] мегаваттного класса, размещенный на борту самолета Boeing 747-400F и предназначенный для уничтожения баллистических ракет на дистанциях до 400км. Установленный мобильный комплекс ABL, размещенный на борту самолета Boeing 747-400F представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема мобильного комплекса ABL, размещенного на борту самолета Boeing 747-400F

Принципиальная схема ХКИЛ со струйным генератором синглетного кислорода (ГСК) представлена на рисунке 2 [2]. В ГСК осуществляется реакция щелочного раствора перекиси водорода (ЩРПВ) и газообразного хлора. В ходе газожидкостной реакции нарабатываются электронно-возбужденный синглетный кислород $O_2(^1\Delta)$, который разбавляется буферным газом (первичный азот). С выхода генератора газовый поток течет по тракту транспортировки к входу в сопловой блок. В сопловом блоке в поток, содержащий синглетный кислород, инжектируются пары молекулярного йода I_2 с несущим его буферным газом (вторичный азот). В проточной части резонатора молекулярный йод при взаимодействии с синглетным кислородом диссоциирует на атомы. Затем происходит квазирезонансная передача электронной энергии молекул синглетного кислорода атомам йода, которые переходят в верхнее возбужденное состояние $I(^2P_{1/2})$. Резонатор, как правило, располагают поперек потока. Излучение лазерного кванта происходит при спин-орбитальном переходе атома йода $I(^2P_{1/2}) \rightarrow I(^2P_{3/2})$ [3]. Отработанная смесь состоит из кислорода, паров воды, паров йода, буферного газа и небольшого количества неутрализованного хлора. ХКИЛ работает по открытому циклу, поэтому необходимо обеспечивать откачку отработанной смеси в атмосферу.

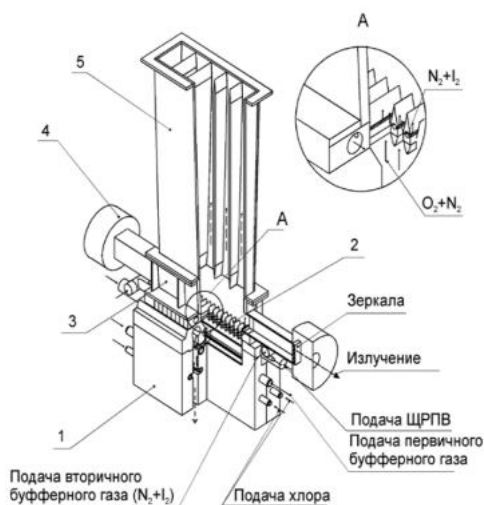


Рисунок 2 – Схема ХКИЛ лазера: 1 – генератор синглетного кислорода, 2 – сопловой блок, 3 – лазерная камера, 4 – резонатор, 5 – выхлопной диффузор

Для эффективной работы ХКИЛ в зоне резонатора необходимо создать сверхзвуковой поток при низком статическом давлении (например, для ХКИЛ давление должно быть менее 5 Торр при числах Маха около 2), а также необходимо обеспечить эвакуацию отработанного газа из лазерной камеры [4]. Для этого используются системы

обеспечения выхлопа различного типа: вакуумные емкости, система восстановления давления эжекторного типа, и криосорбционная система откачки.

Одним из вариантов системы обеспечения выхлопа является криосорбционная система откачки [5]. Принцип работы криосорбционной системы откачки основан на явлении физической адсорбции (способности твердых пористых тел, охлажденных до криогенных температур, поглощать газы). В качестве поглощающих материалов (адсорбентов) могут применяться силикагели, цеолиты и активированные угли [6]. Для охлаждения до рабочей температуры адсорбент располагается на криопанелях, через которые прокачивается жидкий азот. Начальная откачка крионасоса обеспечивается механическим вакуумным насосом.

Настоящая работа посвящена расчетному обоснованию геометрии криопанелей криосорбционной системы откачки для ХКИЛ с расходом 1.16 кг/сек.

Криосорбционная система откачки

Общий вид криосорбционной системы откачки, представлена на рисунке 3.

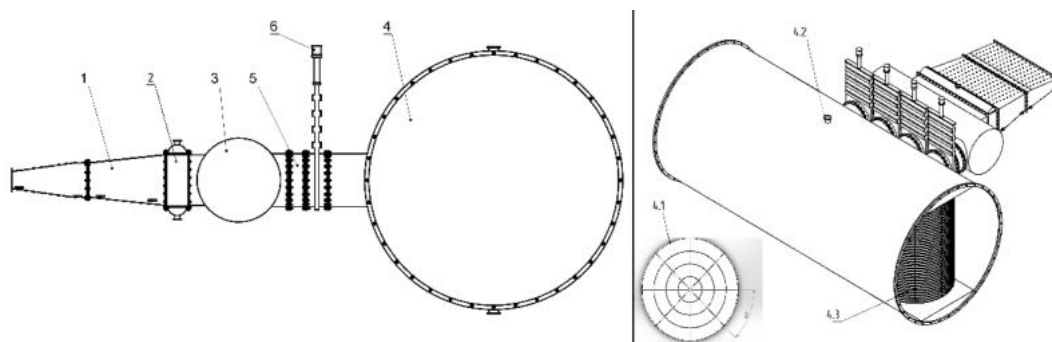


Рисунок 3 – Схема работы криосорбционной системы откачки: на рисунке справа представлен профиль системы откачки (1 – сверхзвуковой диффузор, 2 – теплообменник, 3 – переходная емкость, 4 – криосорбционно-вакуумный насос, 5 – сильфон, 6 – вакуумная заслонка), на рисунке слева представлен 3-х мерный вид модели.

Сверхзвуковой диффузор предназначен для восстановления давления в процессе торможения сверхзвукового потока. Теплообменник используется для уменьшения температуры откачиваемого газа, а также удаления из него молекул йода и остаточного хлора. Далее откачиваемый газ поступает из теплообменника в переходную емкость, которая предназначена для соединения с крионасосом.

Криосорбционный насос представляет собой емкость, внутри которой на криопанелях размещен сорбент (в качестве сорбента используется цеолит (CaEи-4В)). Криопанели охлаждаются за счет подачи жидкого азота через установленными на нём трубы (4.1). Ввод и вывод жидкого азота осуществляется через трубы крионасоса (4.2). Диски (криопанели) соединены между собой в несколько уровней (4.3), для уменьшения длины корпуса. До начала работы системы откачки необходимо охладить криопанели до рабочей температуры, а также обеспечить вакуумную среду внутри криосорбционного насоса. Охлаждённые молекулы сорбента поглощают откачиваемый газ за определённый период времени, что ведет к росту температуры сорбента, ухудшая его сорбционные свойства. Время охлаждения криопанели зависит от её геометрии, то есть расположения труб с жидким азотом и ребер жесткости криопанели. Расположение труб с жидким азотом влияет на поверхность теплообмена с сорбентом, чем выше поверхность теплообмена, тем быстрее будет охлаждаться сорбент. При этом, увеличение поверхности теплообмена уменьшает площадь для засыпки сорбента, и соответственно увеличивает количество дисков внутри криосорбционного насоса.

Выбор геометрии криопанелей криосорбционной системы откачки

Для оптимизации геометрии криопанелей были построены несколько моделей с различным расположением труб с жидким азотом и ребер жесткости. Модели были построены в программе Solidworks. Далее на моделях были проведены исследования в Solidworks Simulation. Исследования проводятся для нестационарной задачи теплообмена жидкого азота с сорбентом на поверхности диска. Расчетная область представлена на рисунке 4.

Модели крипанелей имеют следующие термические нагрузки. Начальная температура среды выбрана равной 300 К. Температура стенки трубы задана на уровне 80 К (близкая к температуре жидкого азота). Время при решении нестационарной задачи выбрано 10 часов. Диаметр диска 1600 мм, диаметр трубы 17 мм, высота сорбента 15 мм. В качестве расчетной области выбран элемент симметрии криопанели – 1/8 часть.

Расчеты проводились для различных вариантов геометрии криопанели.

Очевидно, что при расположении труб только по периметру дика площадь поверхность теплообмена будет незначительна в сравнении с площадью сорбента, которую необходимо охладить. Поэтому необходимо расположить трубы через центр криопанели по всей её длине. Чем больше количество данных труб, тем больше поверхность теплообмена, соответственно за 10 часов сорбент достигнет более низкой температуры. Угол между соседними трубами выбран с учетом разницы температур жидкого азота и самой горячей точкой криопанели. Для увеличения поверхности теплообмена и прочности криопанели были установлены ребра. Были представлены два вида ребер: в виде кольца, с центром в точке симметрии криопанели, и в виде прямой, проходящей через центр криопанели по всей её длине. На рисунке 5 представлены некоторые результаты расчетов в виде распределения температуры по поверхности криопанелей.

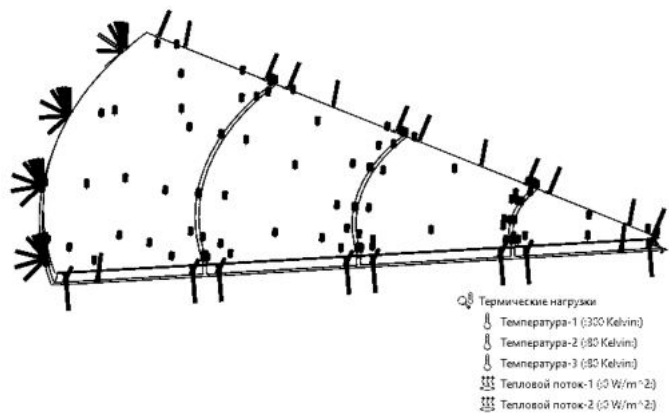


Рисунок 4 – Расчетная область криопанели

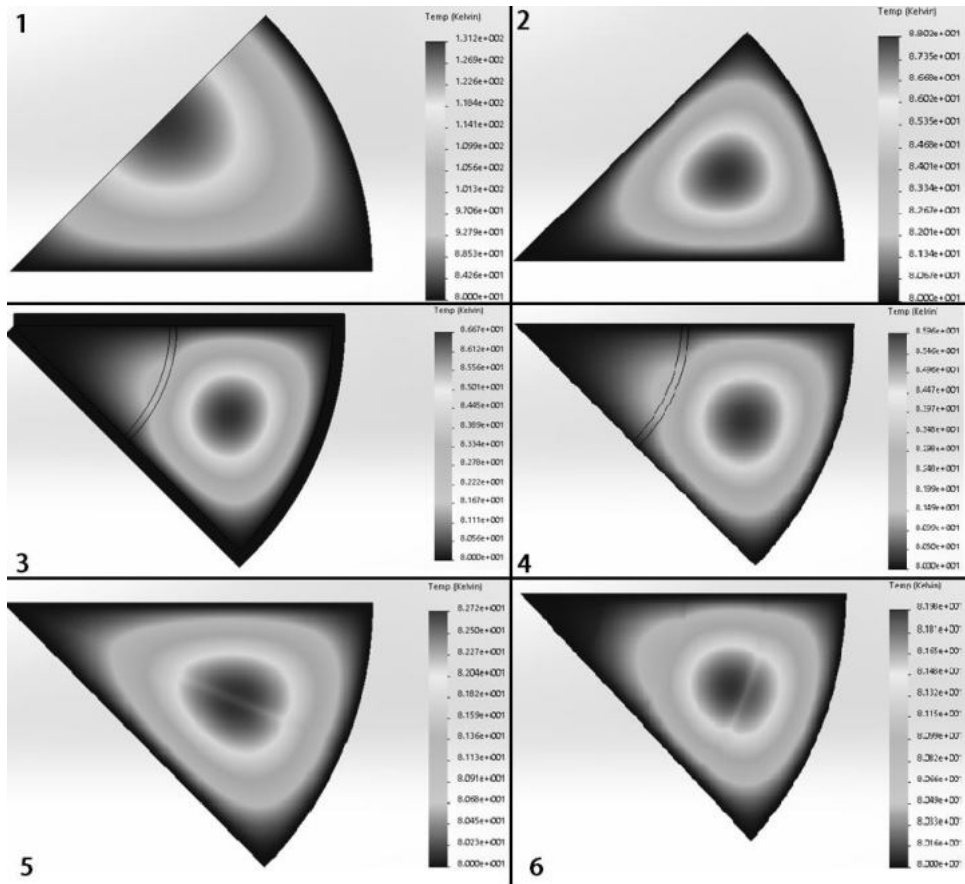


Рисунок 5 – Распределение температуры по поверхности криопанели для нескольких эпюр: 1 – с одной проходящей трубой через центр диска, 2 – с двумя проходящими трубами, 3 – двумя проходящими прямоугольными трубами и одним кольцевым ребром, 4 – двумя проходящими круглыми трубами и одним кольцевым ребром, 5 – с одним ребром, проходящим через центр диска, 6 – тремя кольцевыми ребрами

В качестве реперной точки для контроля температуры была выбрана самая горячая точка криопанели. На рисунке 6 представлен график зависимости температуры сорбента в реперной точке от времени охлаждения сорбента хладагентом для эпюр, указанных на рисунке 5 (нумерация эпюр на рисунке 5 соответствует нумерации кривых на графике рисунка 6). 100 К соответствует теоретическая температура сорбента. На рисунке 7 представлен график распределение температуры по поверхности криопанели с 6 до 10 охлаждения жидким азотом сорбента.

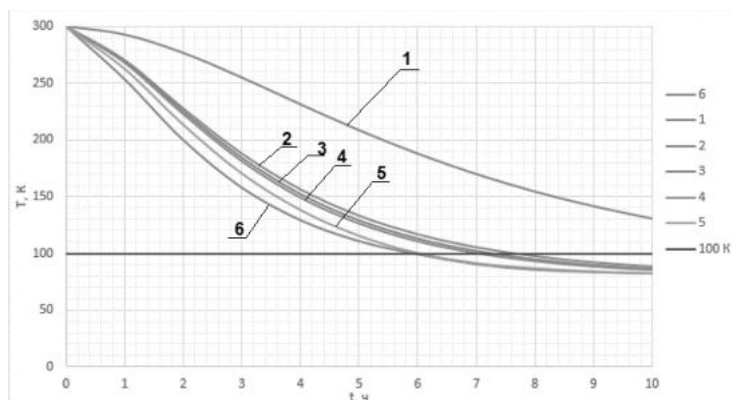


Рисунок 6 – График распределение температуры по поверхности криопанели для нескольких эпов

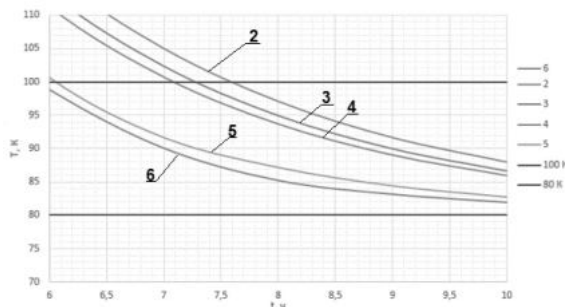


Рисунок 7 – График распределение температуры по поверхности криопанели для нескольких эпов на участке от 6 ч до 10 ч

Из графиков рисунка 6 и 7 можно сделать вывод, что эффективнее использовать круглые трубы, имея три ребра толщиной 5 мм, как показано на варианте (6) рисунка 5.

Расчет температуры нагрева сорбента во время работы крионасоса.

Охлаждённые молекулы сорбента поглощают откачиваемый газ за определённый период времени, что ведет к росту температуры сорбента. Необходимо, чтобы значение температуры сорбента за время работы крионасоса не стала больше, чем значение равное 100 К. Время работы системы откачки равна 60 с.

Температуры нагрева сорбента находится из уравнения теплообмена:

$$\Delta T_c c_{pc} M_c = t G \tau + \Delta T_g c_{pg} M_g \quad (1)$$

где $\Delta T_c = T_{c1} - T_{c0}$ – изменение температуры сорбента за время t , c_{pc} – удельная теплоемкость сорбента, M_c – масса сорбента, τ – теплота сорбции, G – расход откачиваемого газа, ΔT_g – изменение температуры откачиваемого газа, c_{pg} – удельная теплоемкость откачиваемого газа, M_g – масса откачиваемого газа.

Отсюда температура нагрева будет выражаться по формуле:

$$T_{c1} = T_{c0} + \frac{t G \tau + \Delta T_g c_{pg} M_g}{c_{pc} M_c} \quad (2)$$

где T_{c1} – температура нагрева сорбента, T_{c0} – начальная температура сорбента.

Тогда за 10 часов охлаждения сорбента $T_{c0} = 81,98$ К, и $T_{c1} = 93,7$ К.

Заключение

Выбор геометрии криопанели основан на исследованиях распределения температуры при нестационарной задаче теплообмена. На основе данных исследований была выбран вариант криопанели представленный на рисунке 5 вариант (6). Определено время захлаживания сорбента до рабочей температуры, а также оценена величина нагрева сорбента за время одного пуска за счет теплоты сорбции.

Библиографический список

1. Trusdell K.A. Recent Airborne Laser –laser results // Proc. SPIE, v. 6343, pp 6346 1L-1 – 6346 1L-16, 2006.
2. А. С. Борейшо, В. М. Мальков, А. В. Савин, Д. Н. Васильев, И. М. Евдокимов, А. В. Трилис, С. Ю. Страхов. 12-киловаттный непрерывный химический кислород-йодный лазер // Квантовая электроника, –2003. –Т. 33, –№ 4, –С. 307-311.
3. Борейшо А.С., Киселев И.А., Орлов А.Е., Савин А.В., Шалимов В.П., Мальков В.М., Хайлов В.М. Системы восстановления давления мощных газовых и химических лазеров // Теплофизика и аэромеханика. –2001, –Т. 8, –№4, С. 605-623.
4. Юрьшев Н.Н. Кислородно-йодный лазер с химической накачкой// Квантовая электроника. –1996. –23. –№7. –С.583-600.
5. Vetrovec J. Chemical oxygen-iodine laser with a cryosorption pump // SPIE, 2000, v.3931, p.60.
6. Р. Хефер, Криовакуумная техника Москва, Энергоатомиздат, 1983.

УДК 621.45.01

РЕАКТИВНО-РЕАКТИВНАЯ СХЕМА ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОТИВОТАНКОВОЙ ГРАНАТЫ ПГ-30

Д.И. Тиришук, Ф.В. Сирица

АО «ГосМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка»

Активное насыщение бронированной техникой армий различных стран и ее применение во всех видах общевойскового боя создали условия, при которых артиллерия не могла постоянно сопровождать и обеспечивать огневую поддержку пехоте. Возникла необходимость в мощном противотанковом оружии, которое обеспечило бы

возможность успешной борьбы с танками в ближнем бою. Первыми противотанковыми средствами были противотанковые ружья, которые появились уже в Первую мировую войну. Дальнейшее совершенствование вооружения для борьбы с бронированной техникой противника происходило постоянно [1].

На сегодняшний день важную роль в борьбе с танками и другими боевыми бронированными машинами наряду с противотанковой артиллерией и противотанковыми управляемыми ракетами выполняют так называемые противотанковые средства (ПТС) ближнего боя — гранатометы.

Боевые действия в локальных войнах и вооруженных конфликтах в ходе специальных операций еще раз подтвердили, что в борьбе с танками и другими бронированными целями противотанковые гранатометы - легкие и маневренные, с мощными кумулятивными боеприпасами - являются высокоэффективным и обязательным элементом системы противотанкового вооружения. [5]

В процессе своего развития противотанковые гранатометы непрерывно совершенствовались. Создавались новые модификации гранатометов, новые типы выстрелов к ним.

В настоящее время этому виду оружия продолжает уделяться большое внимание. Его совершенствование идет в направлениях:

- разработки более совершенных баллистических схем и конструкции гранатометов (специального назначения);
- увеличения эффективной дальности стрельбы и дальности прямого выстрела;
- повышение точности стрельбы;
- повышения бронепробиваемости;
- расширения целевого назначения.

Современные отечественные средства ближнего боя по надежности действия, удобству обслуживания и эксплуатации, маневренности превосходят, а по эффективности боевого применения находятся на уровне лучших зарубежных аналогов.

Так как одним из направлений развития противотанковых комплексов является – увеличение эффективной дальности и дальности прямого выстрела (ДПВ), необходимо применять новые более прогрессивные и современные метательные заряды, использовать наиболее эффективные схемы запуска, а также уменьшать массу самой противотанковой гранаты (ПГ).

Современные гранатометные комплексы условно можно разделить на 7 схем запуска, внутри которых могут быть различные вариации. [2].

Самой распространенной схемой запуска являются выстрелы так называемого активно-реактивного действия (рис. 1). Они состоят из стартового метательного заряда (МЗ) и маршевого реактивного двигателя (МРД). Первый сгорает в стволе, и давлением газов (активное действие) сообщает гранате начальную скорость. При этом газы истекают назад через открытый ствол и уравнивают отдачу оружия.

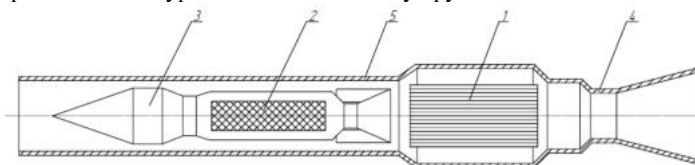


Рис. 1 - Гранатомет с активной схемой запуска:
1 - стартовый МЗ; 2 - МРД; 3 - граната; 4 - раструб; 5 – пусковая труба.

После вылета гранаты из ствола на удалении, безопасном для стреляющего, начинает работать МРД, который увеличивает скорость гранаты до максимальной (реактивное действие).

Также широкое применение нашли выстрелы реактивного действия (рис. 2). Они имеют стартовый реактивный двигатель (СРД), который сообщает гранате необходимую начальную скорость к моменту ее вылета из ствола. Истекающие через ствол назад газы реактивного двигателя уравнивают отдачу. В выстрелах этого типа СРД используется наиболее экономично: он создает реактивную силу, приложенную к гранате и сообщающую ей требуемую начальную скорость.

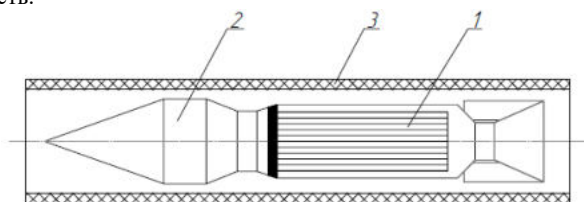


Рис. 2 - Гранатомет с реактивной схемой запуска: 1 – СРД; 2 – кумулятивная граната; 3 – пусковая труба.

Следующей распространенной схемой запуска является реактивно-реактивный. Одним из вариантов реализации такой схемы в гранатометных выстрелах является применение двухрежимных двигателей. Класс двухрежимных РД многообразен по конструкциям и функциональному назначению. По конструктивным признакам он может быть разбит на две основные группы: однокамерные и двухкамерные РД.

На рис. 3 показана схема гранатомета с однокамерным РД с двухсекционным зарядом, а на рис. 4 – с двухкамерным РД.

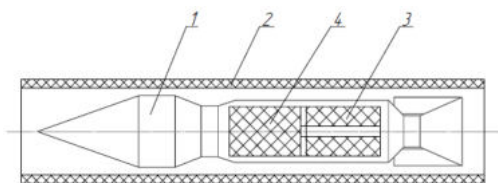


Рис. 3 - Однокамерный двухрежимный РД: 1 – граната; 2 – пусковая труба; 3 – стартовый заряд РД; 4 – маршевый заряд РД.

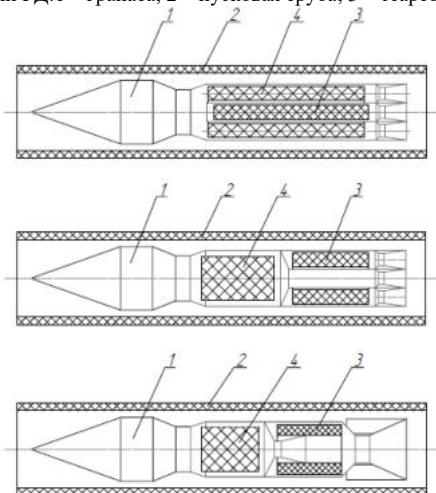


Рис. 4 - Двухкамерный двухрежимный РД: 1 – граната; 2 – пусковая труба; 3 – стартовый РД; 4 – маршевый РД.

Несмотря на большое конструктивное разнообразие, принцип работы двухрежимных РД в основном одинаков:

- в пределах пусковой трубы срабатывает первая (стартовая) ступень РД, обеспечивая определенный уровень начальной (дульной) скорости гранаты;
- при выходе гранаты из ствола, на безопасном для оператора расстоянии включается вторая (маршевая) ступень РД, обеспечивая гранате скорость, необходимую для достижения заданной дальности.

При размещении в силовой трубе маршевого РД выстрел превращается в боеприпас реактивно-реактивного действия.

При размещении в силовой трубе маршевого РД выстрел превращается в боеприпас реактивно-реактивного действия.

Современные танки в большей степени оснащаются динамической защитой, однако для их поражения были применены тандемные боеприпасы. Но прогресс не стоит на месте, применены комплексы активной защиты, которые в данный момент являются самыми основными для охраны танка от ракет противника.

РПГ-30 «Крюк» (индекс ГРАУ — 7П153) — российская реактивная система, граната калибра 105 миллиметров и одноразовый гранатомёт. Имеет инновационную для ручных противотанковых гранатомётов бикалиберную конструкцию с использованием имитатора цели для преодоления активной защиты.

В настоящее время поражения современных танков с высоким уровнем бронезащиты необходимы противотанковые гранатометы, оснащенных боевыми частями повышенного могущества. Большие массы боевых частей снижают возможность получения высоких начальных скоростей гранат, в связи с чем повышение дальности стрельбы за счет использования работающего на траектории реактивного двигателя по-прежнему является актуальным техническим решением. [5]

Рассматривается граната ПГ-30, которая соответствует противотанковой гранате для РПГ-27.

Посредством анализа, была выбрана реактивно-реактивная баллистическая схема запуска. Данная схема имеет следующие преимущества, по сравнению с активно-реактивной:

- меньшая масса пусковой трубы, поскольку ствол является ненагруженным при выстреле;
- более эффективное использование энергии пороховых газов, т.к. все пороховые газы идут на создание реактивной силы, которая сообщает гранате начальную скорость;
- простота подготовки к стрельбе.

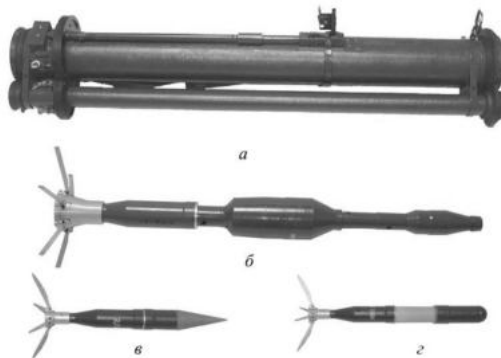


Рис. 5 – 105 мм реактивный противотанковый гранатомет РПГ-30 «Крюк»: а) общий вид гранатомета, б) противотанковая граната, в) пассивный имитатор гранаты, г) имитатор гранаты с генератором

Необходимо определить основные конструктивные параметры РД, обеспечивающие минимальную стартовую массу изделия при заданной ДПВ, массе полезной нагрузки, заданном времени горения и заданной длине заряда: $m_{пн} = 5$ – масса полезной нагрузки, кг (в массу полезной нагрузки входит приблизительная масса МРД); $V_a = 125$ – скорость изделия в конце активного участка задается исходя из условия обеспечения ДПВ ($X_{ДПВ} \approx 1,14 \dots 1,2 \cdot V_a$), м/с; $e_1 = 0,5$ – полутолщина горящего свода порохового заряда, мм; $L = 0,13$ – длина порохового заряда, м.

В качестве топлива используется ракетное топливо ВП-58, его параметры, необходимые для расчета: $k = 1,22$ – показатель политропы газа; характеристики скорости горения пороха: $u_1 = 0,0012$ и $v = 0,594$; $\delta = 1,67$ – плотность пороха, кг/м³; $T = 3100$ – температура горения топлива, К.

Для решения данной задачи необходимо дополнительно задать следующие величины: $\sigma_v = 1400$ – предел прочности материала корпуса РД, МПа; $K_2 = 1,1$ – коэффициент превышения длины камеры РД длины заряда, $K_2 = 1,05 \dots 1,2$; $n = 1,2$ – коэффициент запаса прочности корпуса РД; $\rho = 7810$ – плотность материала камеры, кг/м³; $P_m = 63,7$ – максимальное допустимое давление в камере сгорания при +50 °С, МПа; $R = 8,31$ – универсальная газовая постоянная, Дж/К·моль; $\mu = 0,02597$ – средняя молекулярная масса газа, кг/моль; характеристики скорости горения пороха: $[\kappa] = 190$ – заданное значение параметра Победоносцева; $R_{уд} = 200$ – удельная тяга, с. В таблице 1 приводится последовательность расчета основных конструктивных параметров СРД и МРД.

Таблица 1 – Расчет конструктивных параметров РД

Эффективная скорость истечения	$u_e = P_{уд} \cdot g$
Параметр Циолковского	$z = e^{\frac{v_a}{u_e}} - 1$
Доп. параметры	$B_H = \sigma_v / (\sigma_v + P_m \cdot n)$ $B = \delta \cdot \pi / 4 \cdot B_H^2$ $A_1 = \rho \cdot \pi / 4 \cdot (1 - B_H^2) \cdot K_2$
Коэффициент заполнения объема камеры	$\varepsilon = \frac{1}{1 + L / ([\kappa] \cdot e_1)}$
Наружный диаметр корпуса РД	$D_H = \sqrt{m_{пн} \cdot z / L \cdot (B \cdot \varepsilon - A_1 \cdot z)}$
Внутренний диаметр камеры РД	$D_K = B_H \cdot D_H$
Толщина стенки камеры РД	$\delta_K = \frac{D_H - D_K}{2}$
Количество пороховых шашек	$N = \left[[\kappa] \cdot B_H^2 \cdot (1 - \varepsilon) / (4 \cdot L \cdot \sqrt{2 - \varepsilon}) \right]^2$
Параметры пороховой шашки	$D = D_H \cdot B_H / (\sqrt{N} \cdot (1 - \varepsilon))$ $d = D \cdot (1 - \varepsilon)$ $e_1 = (D - d) / 4$ $\kappa = (4 \cdot L \cdot N \cdot (D + d)) / (D_K^2 - N \cdot (D^2 - d^2))$ $\kappa_{кар} = 4 \cdot L / d$ $\kappa_{нар} = 4 \cdot L \cdot N \cdot D / (D_K^2 - N \cdot D^2)$
Начальная поверхность горения заряда	$F_0 = N \cdot [f \cdot \pi / 4 \cdot (D^2 - d^2) + \pi \cdot (D + d) \cdot L]$
Площадь (диаметр) критического сечения сопла при +50 °С	$F_{кр} = F_0 \cdot U \cdot g \cdot \delta / (P_m \cdot A)$ $d_{кр} = \sqrt{4 \cdot F_{кр} / \pi}$ $u = u_1 \cdot (P_m / P_0)^v$ $A = \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot g / \sqrt{R \cdot T / \mu}}$
Масса топлива	$m_t = \pi / 4 \cdot \delta \cdot L \cdot N \cdot (D^2 - d^2)$
Масса корпуса РД и конструктивных элементов	$m_{рд} = A \cdot L \cdot D_H^2$ $m_{кз} = c \cdot D_H^3$
Стартовая масса изделия	$m_0 = m_t + m_{пн} + m_{рд} + m_{кз}$

В качестве конструктивной схемы было решено использовать схему, изображенную на рис. 6. Такое расположение маршевой ступени РД позволит использовать уже имеющиеся средства воспламенения заряда, например, пирозамедлитель ЗВ-7, использующийся в активно-реактивном выстреле ПГ-7В.

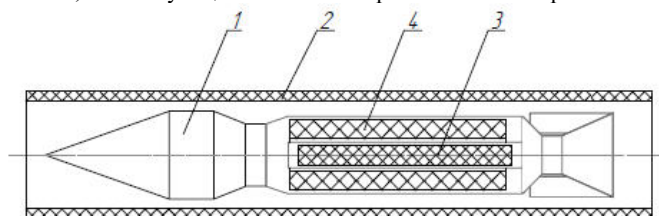


Рис. 6 — Двухкамерный двухрежимный РД: 1 - граната; 2 - пусковая труба; 3 - МРД; 4 - СРД.

Предложенная конструкция РД изображена на рис. 7 и состоит из следующих элементов: переходное дно (1); корпус МРД (2); корпус СРД (3); пирозамедлитель (4); крышка-сопло (5); герметизирующие заглушки (6); воспламенитель (7); узел форсирования (8); сопловой насадок (9).

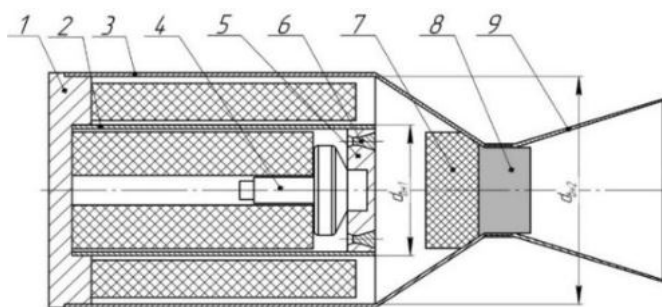


Рис. 7 – Схема исследуемого РД

Сопла крышки-сопла перекрыты герметизаторами для изоляции заряда маршевого двигателя при работе стартового РД. На герметизаторы наносится специальный состав-герметик. После установки герметизирующих заглушек крышка сопло покрывается теплозащитной эмалью.

Согласно выполненным расчетам конструктивных параметров РД, получены следующие данные:

СРД: $D_k = 0,071$ — внутренний диаметр камеры РД, м; $L_{kam} = 0,143$ — длина цилиндрической части камеры, м; $\delta_k = 0,004$ – толщина стенки, м.

МРД: $D_k = 0,052$ — внутренний диаметр камеры РД, м; $L_{kam} = 0,142$ — длина цилиндрической части камеры, м; $\delta_k = 0,006$ – толщина стенки, м.

Внутренняя баллистика гранатомета с реактивной схемой запуска сводится к процессу горения порохового заряда и движению газов по трубе переменного сечения. Внешняя баллистика противотанковой гранаты рассматривается в нормальной земной системе координат, при этом принимаются допущения. За основу для составления математической модели полета гранаты взята система уравнений основной задачи внешней баллистики при аргументе t . Движение гранаты по траектории при этом рассматривается как движение материальной точки переменной массы под действием трех сил: силы тяжести, силы тяги реактивного двигателя и силы сопротивления воздуха.

Система дифференциальных уравнений для внутренней и внешней баллистики представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Система дифференциальных уравнений

Внутренняя баллистика	Внешняя баллистика
$\frac{\partial}{\partial t} \rho F + \frac{\partial}{\partial x} \rho V F = \rho_{\Pi} \frac{\partial A}{\partial t}$	$\frac{dv}{dt} = \frac{P - R_x}{G} - g \cdot \sin \theta$
$\frac{\partial}{\partial t} v \rho F + \frac{\partial}{\partial x} v \rho V F = \rho_{\Pi} \frac{\partial A}{\partial t}$	$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{g}{v} \cdot \cos \theta$
$\frac{\partial}{\partial t} \rho V F + \frac{\partial}{\partial x} \beta_1 \rho V^2 F + F \frac{\partial P}{\partial x} = -\tau \Pi \frac{F'}{F}$	$\frac{dX_g}{dt} = v \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi_K$
$\frac{\partial}{\partial t} \rho E F + \frac{\partial}{\partial x} \rho V E F + \frac{\partial}{\partial x} \rho V F = -q \Pi \frac{F'}{F} + Q \rho_{\Pi} \frac{dA}{dt}$	$\frac{dY_g}{dt} = v \cdot \sin \theta$
$P = (\gamma_{cm} - 1) \rho \epsilon$	$\frac{dZ_g}{dt} = -v \cdot \sin \varphi_K \cdot \cos \theta$
$m_{гр} \frac{d\vec{V}_{гр}}{dt} = -\varphi_1 \cdot \rho_{rc} \cdot \vec{u}_{rc} \cdot u_{rc} \cdot S_{rc} - (p_{rc} - p_0)(1 - f_1) S_{rc} - \frac{d}{dt} \int_{гр} \rho \vec{u} S dx$	
$m_3 \frac{d\vec{V}_3}{dt} = S(p - p_0)(1 - f_2)$	

В соответствии с математической моделью [6], реализованной в программном обеспечении MathCad 15, получены следующие результаты внутренней баллистики модернизируемой противотанковой гранаты:

Результаты расчета внутренней баллистики СРД представлены на рисунках 8-13.

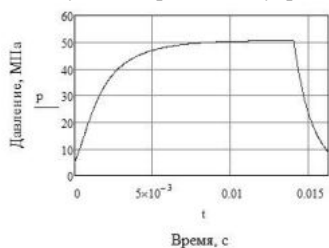


Рис. 8 — Зависимость давления в камере сгорания СРД от времени.

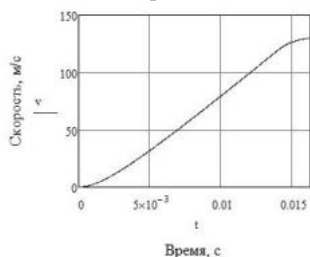


Рис. 9 — Зависимость скорости ПГ от времени.

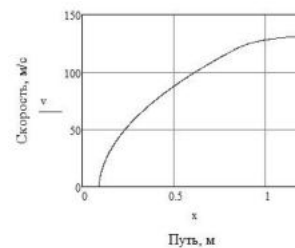


Рис. 10 — Зависимость скорости ПГ от координаты по трубе.

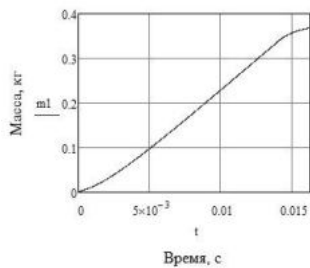


Рис. 11 — Зависимость массы сгоревшего топлива от времени.

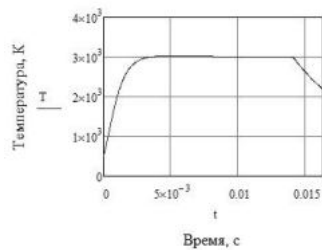


Рис. 12 — Зависимость температуры в камере сгорания СРД от времени.

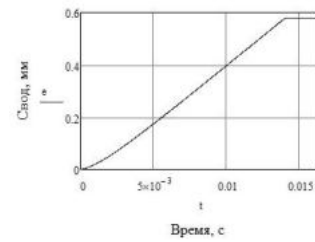


Рис. 13 — Зависимость толщины сгоревшего свода от времени.

Исходя из рисунков 10 – 15, определяются: начальная скорость гранаты $V_0 = 130$ м/с; время выстрела $t_b = 16,27$ мс; максимальное давление в камере сгорания СРД $p_{max} = 50,593$ МПа.

Результаты расчета внутренней баллистики МРД представлены на рисунках 14-16.

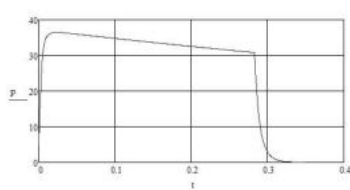


Рис. 14 — Зависимость давления в камере сгорания МРД от времени.

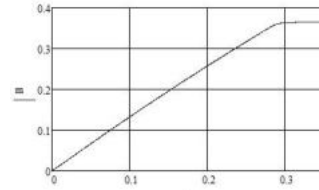


Рис. 15 — Зависимость массы сгоревшего топлива от времени.

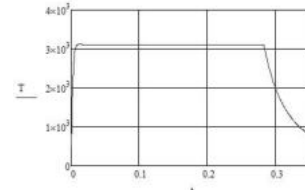


Рис. 16 — Зависимость температуры в камере сгорания МРД от времени.

Исходя из полученных рисунков 14 – 16, определяется время работы МРД $\tau \approx 0,3$ с и максимальное давление в камере сгорания МРД $p_{max} = 36,442$ МПа.

Для расчета внешней баллистики ПГ вводятся следующие исходные данные: $W = 3$ м/с — скорость ветра; $\alpha W = 90$ — направление ветра (боковой); $i_{рас} = 1$ — коэффициент формы на актином участке траектории; $y = 0$ м — высота над уровнем моря (высота начальной точки траектории); $T_0 = 15$ C⁰ — температура окружающей среды; $VL = 50\%$ — влажность воздуха; $Y_{ц} = 2$ м — высота цели; $m_t = 0,375$ кг — масса топлива МРД; $tv_k = 0,11$ с — время включения МРД; $\tau = 0,3$ с — время работы МРД; $I_1 = 2000$ с — единичный импульс топлива. На рисунках 17-18 представлены результаты расчета:



Рис. 17 — Зависимость высоты траектории от дальности.

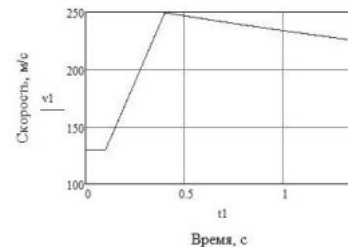


Рис. 18 — Зависимость скорости гранаты от времени.

Из рисунков 17 – 18, можно определить значения: дальности прямого выстрела $X_{дпв} = 297,3$ м, угол бросания $\theta_0 = 206'24''$ и время полета $t_p = 1,365$ с.

На рисунке 20 можно заметить, что при выходе ПГ скорость соответствует начальной скорости при выходе, после, через 13 мс срабатывает МРД, достигая максимального значения по скорости.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1) При анализе и выборе баллистической схемы важным критерием является эффективность использования энергии стартового заряда. Анализ показал, что реактивная схема запуска более эффективна в плане использования энергии пороховых газов;

2) Предложен вариант реактивного двигателя, обеспечивающего большую дальность прямого выстрела из РПГ 30. Проведены расчеты основных конструктивных элементов, внутренней и внешней баллистики гранатомета. Сравнительные характеристики разработанного выстрела и штатного представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение полученных результатов

Параметр	ПГ-30	ПГ-30М
Калибр, мм		105
Дальность прямого выстрела, м	144	297,3
Масса ПГ, кг	5,0	6,65
Начальная скорость, м/с	120	130
Максимальная скорость, м/с	120	250
Бронепробиваемость, мм	600 после ДЗ	

Сравнения показывают, что разработанный выстрел обладает большей начальной скоростью, а также большей дальностью прямого выстрела за счет введения в конструкцию маршевого ракетного двигателя. Однако разработанный выстрел уступает по массовым параметрам, масса гранаты увеличилась на 1,65 кг (33%).

Развитие современной техники требует новых конструкционных материалов, превосходящих по своим прочностным, упругим и другим свойствам традиционные. К числу наиболее интересных и перспективных относятся полимерные материалы (пластики, эластомеры, волокна). Конструкционные полимерные материалы все чаще применяют в современном машиностроении.

Для решения проблемы увеличенной массы, корпус РД можно изготавливать из композитных полимерных материалов, которые должны иметь достаточно высокую ударную вязкость во всем температурном интервале, заданном для двигателя, одним из таких материалов может выступать, например, ПКМ состоящий из арамидных волокон «Кевлар – 49».

Библиографический список

- 1) Савченко Ф.А., Шеманаев А.В., Михалец С.В., Партала С.В. Конструкция средств поражения, боеприпасов, взрывателей и систем управления средствами поражения: Конструкция гранатометных выстрелов и реактивных гранат к гранатометам одноразового применения. Учебное пособие. — Пенза: ПАИИ, 2007 – 190 с.
- 2) Никулин Е.Н., Руссков Ф.В., Семенов И.А. Средства ближнего боя. Ручные гранатометы Учебное пособие. – СПб: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2008. – 168 с.
- 3) Куров В.Д., Должанский Ю.М. Основы проектирования пороховых ракетных снарядов. М.: Оборонгиз, под редакцией Мальшева М.В., 1961. 294 с.
- 4) Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ. – М: Машиностроение, 1991. – 560 с.
- 5) Курков С.Н. Оценка эффективности боевого применения реактивных противотанковых гранатометов. Учеб. пособие. – Пенза: ПАИИ, 1999. – 42 с.
- 6) Никулин Е.Н., Сирица Ф.В., Тиришук Д.И. Расчет основных параметров ручных противотанковых гранатометов. Практическое пособие. – СПб: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2022. – 36 с.

УДК 358.421

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТАКТИЧЕСКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КАК ЭЛЕМЕНТА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБРАЗЦОВ БРОНЕТЕХНИКИ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ

М. В. Васильев, К. А. Чудин, Р. И. Абрамович, А. Р. Харитонов.

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

Как известно, технологический прогресс не стоит на месте. Все больше областей ручного труда заменяются автоматикой, а роботы и беспилотники с каждым днем выполняют все больше и больше задач, возлагаемых на них проектировщиками и заказчиками-эксплуатантами.

Особое место в развитии автоматизированных систем занимают беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Если в недалеком прошлом беспилотные летательные средства (БЛС) применялись исключительно в военных и развлекательных целях, то сейчас на подобные аппараты возложено значительно больше успешно решаемых задач. В частности, беспилотники уже сейчас осуществляют функции мониторинга, доставки грузов, «рабочих лошадок» киноиндустрии.

Однако нельзя не упомянуть, что крайне широкий потенциал применения дронов предоставляет именно военная промышленность. БЛС могут выполнять функции от проведения разведки местности до доставки ракет и бомб к точкам старта и бомбометания соответственно.

Учитывая опыт недавних локальных конфликтов, можно смело предположить о возможности более широкого применения БПЛА и в военной разведке. Но до сих пор одна из задач остается крайне неохваченной – задача использования дрона как самостоятельной радиолокационной системы, так в составе комплекса РЛС в виде «антенны» для обнаружения наземных целей противника.

Одна из перспективных разработок в вышеуказанной области была продемонстрирована на выставке ИНТЕРПОЛИТЕХ-2014. ЗАО НПЦ «НЕЛК» представил комплекс воздушного обнаружения наземных целей «Ротор». Данный комплекс представляет из себя гражданский БЛА «НЕЛК-В6» с усиленным каркасом, на котором производителем была смонтирована разработанная тульским НИИ «Стрела» РЛС разведки наземных движущихся целей «Фара-ВР».

Справочно: РЛС «Фара-ВР» позволяет в любое время года и суток в отсутствии оптической видимости обнаруживать танки на дистанции 8 километров, человека на расстоянии 4 километра, а максимальная дальность действия равняется 10 километрам.

Справочно: БЛА «НЕЛК-В6» приводится в движение благодаря двенадцати (6 пар) электрическим двигателям с передачей электричества для питания моторов через кабель от наземного источника тока. Акустическая заметность также крайне мала (на расстоянии 50 метров шум от БПЛА не будет превышать 60 децибел).

Учитывая небольшие габариты устройства, его низкую акустическую зависимость, возможность длительной работы (до 8 часов) и высоту подъема до 200 метров, данный образец может крайне успешно выполнять поставленные перед ним задачи по обнаружению скопления личного состава и бронетехники противника, а в случае его модернизации путем установки более совершенной радиолокационной станции и монтирования систем электронно-оптической разведки позволит без труда определять координаты движущейся цели, а следовательно, и корректировать артиллерийский или минометный огонь, а также огонь систем залпового огня. В открывшейся перспективе представляется целесообразным объединение подобного устройства с некоторыми образцами отечественной бронетехники, оборудованной радиолокационными станциями, в целях повышения их огневой мощи и улучшения характеристики кучности огня.

Кроме вышеперечисленного, применение малых дронов в качестве элемента радиолокационной станции удовлетворяет и следующим условиям их массового выпуска и последующей эксплуатации. Помимо небольших габаритов и низкой акустической зависимости, что делает этот дрон крайне затруднительным объектом для обнаружения и уничтожения противником, БЛА с РЛС также достаточно мобильны, имеют возможность быть перевозимыми на различной технике как сухопутной, так воздушной или морской; при наличии достаточно

эффективной радиолокационной станции возможно получать достаточно точные разведывательные данные; в зависимости от поставленных задач представляется возможным применение нескольких однотипных БПЛА в единой информационной сети на неподготовленных площадках.



Рисунок 1. Комплекс «Ротор» и беспилотная платформа «HELK-B6»

Не стоит забывать и о сравнительной дешевизне комплектов подобного комплекса ввиду возможной унификации с гражданскими дронами, на платформе которых и предполагается создавать автопилотируемые РЛС, и действующими радиолокационными станциями, однако с последним все же имеется ряд ограничений.

Необходимо учитывать, что на данный момент всецело реализовать потенциал дронов как элемента системы обнаружения низколетящих и наземных целей и выдача соответствующих целеуказаний вне зависимости от погодных условий или времени суток или года затрудняется по причине отсутствия разработанных специально под небольшие БЛА компактных и эффективных РЛС.

Справочно: из производимых в Российской Федерации радиолокационных станций военного назначения с наиболее подходящими показателями массогабаритного характера и параметрам энергопотребления для установки на тактический БПЛА более всего подходит РЛС семейства «Копье», устанавливающиеся на легкие истребители типа МиГ-21.

В то же самое время не стоит забывать, что, несмотря на значительное ускорение темпов проектирования и производства отечественных беспилотных летательных аппаратов как гражданского, так и военного назначения, в настоящий момент производство собственных беспилотников не развивается так, как этого требовало бы развитие технологий и сферы ввиду определенного количества сдерживающих рынок факторов. В частности, отсутствие необходимого объема инфраструктуры, авиационное регулирование и прочие ограничения заставляют потенциальных эксплуатантов фокусироваться на приобретении иностранных аналогов вместо развития собственной сферы проектирования, производства и эксплуатации «дронов».

Стоит упомянуть, что наиболее целесообразен метод создания комплексной программы развития производства Российских беспилотников, включающий экономически обоснованный стратегический менеджмент и управление персоналом. Учитывая факт ориентации все большего числа предприятий на достижение устойчивых позиций в конкурентной среде путем осуществления поставленных целей в эффективной конкурентной стратегии развития, необходимость в актуализации проблемы формирования устойчивой конкурентоспособности с учетом повышения изменчивости внешней среды, недостаточность научно-методической разработанности многих аспектов от реализации конкурсных преимуществ до расширения научной и производственной базы.

Если говорить об эффективности производственного менеджмента, то она будет являться такой ориентацией транспортных беспилотных аппаратов, которая будет направлена на удовлетворение спроса конкретных потребителей с учетом специализации изготавливаемых изделий. Из-за частично сформированного рынка беспилотных летательных аппаратов для использования в качестве транспорта оценка экономической эффективности не будет полной на основе исключительно эмпирических данных, поэтому решение вышеуказанной проблемы будет более полным при использовании инструментов методов прогнозирования и экономика математического моделирования

Подводя итоги, хочется еще раз заострить внимание на основных тезисах применения тактического беспилотного летательного аппарата как элемента радиолокационной системы образцов бронетехники по обнаружению наземных целей.

Во-первых, использование тактических БПЛА в качестве разведывательного аппарата крайне повышает эффективность применения средств обороны и наступления. Благодаря подобным инженерным решениям разведывательные операции могут проводиться с меньшими потерями в живой силе и с большей эффективностью, так как с высоты считать места дислокации и перемещения подразделений противника с высокой точностью намного проще. Кроме того, дистанционное управление беспилотником позволяет отслеживать передислокацию вражеских сил в реальном времени и, как следствие, более точно корректировать применение артиллерии, минометных расчетов и наступательных сил.

Во-вторых, малые размеры подобных летательных аппаратов вкупе с их малой шумностью как в слуховом, так и в ИК и радиочастотных диапазонах позволяет проводить разведывательные мероприятия в более скрытном режиме, нежели разведкой боем или применением сил авиации.

В-третьих, в случае успешного проектирования и последующего производства со сбалансированными параметрами цены одного изделия и оценки эффективности совокупности решаемых этим изделием задач возможен переход на массовый выпуск БПЛА и РЛС в качестве сравнительного дешевого и крайне эффективного в боевом применении изделия. Но не стоит забывать о том, что все вышесказанное возможно только в случае правильной расстановки приоритетов промышленного менеджмента и создания условий, при которых разработка и изготовление собственных беспилотников для гражданских и военных нужд будет целесообразнее с политической и экономической точки зрения, нежели закупка иностранных аналогов даже с целью локализации их производства и проектирования.

Библиографический список

1. Кугучева Д.К. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в рамках концепции умных сетей в Калининградской области // Вестник молодежной науки – 2018 г.
2. Комплекс воздушного радиолокационного обнаружения наземных целей «Ротор» [Электронный ресурс]. URL: <https://lopatorv-45.livejournal.com/9420.html>.
3. Отварухина, Н. С. Стратегический менеджмент: учебник и практикум для вузов / Н. С. Отварухина, В. Р. Веснин. – Москва: Издательство Юрайт,
4. Троекко, В. О. Разработка стратегии развития организации / В. О. Троекко // Молодой ученый. – 2019. – № 41 (279).
5. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов (дистанционно-пилотируемые летательные аппараты) // Под ред. И.С. Голубева и Ю.И. Янкевича. М.: МАИ, 2006.
6. С.Г. Брайткрайтц, Е.М. Ильин, А.И. Полубехин, Д.В. Прищеп, А.Д. Юрин, К.А. Хомяков. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ СОЗДАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ТАКТИЧЕСКОГО И ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11, 2018 г.

УДК 621.45.035.64

ТЕРМОПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ЛОПАТОК ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА

В. Кешишьян, Д. Мельникова

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

Одним из вариантов использования газодинамического лазера (ГДЛ) может быть его установка на летательном аппарате [1]. Возможность того, что газодинамический лазер на летательном аппарате использует газотурбинный двигатель как источник воздуха высокого давления, определяет главное достоинство его использования перед мощными лазерами других типов. За счёт этого воздуха помимо накачки лазера может осуществляться и охлаждение элементов его конструкции.

Газодинамический лазер использует энергию колебательно-вращательных переходов молекулы CO_2 . Физический принцип создания активной среды состоит в быстром охлаждении газовой смеси с созданием инверсной населенности по энергетическим уровням. Таким образом ГДЛ является преобразователем тепловой энергии в энергию лазерного излучения. Общая схема газодинамического лазера с указанием его основных элементов показана на рисунке 1 [2].

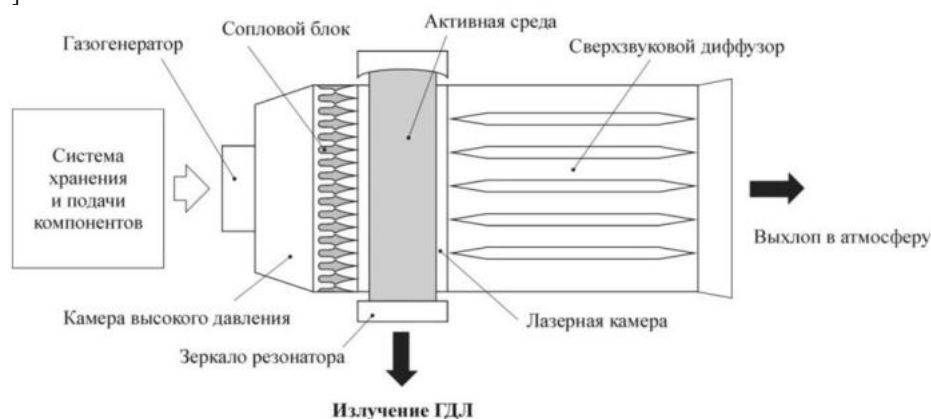


Рис. 1. Схема газодинамического лазера и его составные части

Сопловой блок ГДЛ представляет собой ряд сопловых лопаток, зазоры между которыми образуют двумерные профилированные сопла. Сопловые лопатки, непосредственно омываемые горячими газами, практически нагреваются до температуры торможения газа. Поступающая к лопатке теплота должна быть отведена охлаждающей средой, в качестве которой чаще всего используют воздух после компрессора. Охлаждающий воздух, проходя через специальные каналы в лопатках, нагревается, отбирая теплоту от лопатки. Нагрев воздуха зависит от его расхода, теплоемкости и количества отбираемой теплоты. Охлаждение должно обеспечивать необходимую температуру металла лопаток и ее постоянство по их поверхности.

Сопловая лопатка должна отвечать требованиям прочности, поскольку сопловой блок задействуется в достаточно жестких условиях, таких как перепад давлений и высокая температура. Вследствие сходства условий работы для направляющих лопаток ГДЛ используются жаропрочные сплавы, используемые для деталей газовых турбин. Жаропрочностью называется свойство материала выдерживать нагрузки в течение заданного интервала времени. Другим важным свойством жаропрочного материала является пластичность, характеризующаяся

показателями остаточного удлинения и остаточного сужения при испытаниях на длительную прочность. Для жаропрочных материалов эти показатели должны превышать 10%.

Высокое сопротивление усталости при повышенных температурах также является важной характеристикой, поскольку режимы работы теплового оборудования связаны с его запусками и остановками. Так же необходимо задействовать материал с высокой обрабатываемостью вследствие сложной формы лопатки.

В качестве подобных материалов наибольшее применение нашли никелевые сплавы [3]. В качестве материала для направляющей лопатки ГДЛ был выбран никелевый сплав ЖС6. Основными легирующими элементами в нём являются хром, кобальт, алюминий, молибден, вольфрам, а также рений. Сплав ЖС6 применяют в неохлаждаемых сопловых и рабочих лопатках газовых турбин, которые находятся под нагрузкой в температурном промежутке 800 – 1000 °С, а также в охлаждаемых лопатках, работающих при температуре газа до 1200 °С. Зависимость прочностных свойств материала от температуры приведена в таблице 1.

Таблица 2. Механические свойства сплава ЖС6 при повышенных температурах

Температура, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
20	945	1080	20
900	940	1010	27
1000	680	860	19
1100	460	600	22

При конвективном охлаждении лопаток охлаждающий воздух проходит по специально выполненным продольным каналам внутри лопатки и выбрасывается из системы. Конвективное охлаждение обеспечивает работу лопатки при температурах газа до 1400 К, понижая температуру в средней части лопатки на 220 – 260 К [4]. Основным достоинством схемы с продольными каналами является более простая технология их изготовления по сравнению с каналами более сложной формы. Эффективность конвективного охлаждения лопаток довольно высокая, однако наблюдается значительная неравномерность температурного поля по профилю лопатки, которая доходит до 150 – 200 К и более. При этом наиболее нагретыми оказываются входная и выходная кромка.

Первоначальное и очень заметное снижение температуры материала лопатки при конвективном охлаждении достигается с помощью небольшого расхода охлаждающего воздуха. Дальнейшее повышение эффекта охлаждения требует непропорционального увеличения расхода воздуха, т. е. существует режим, на котором последующее повышение расхода практически нецелесообразно.

Интенсивность охлаждения лопаток турбины с конвективным охлаждением зависит от теплового потока, проходящего через стенку лопатки, от термодинамических свойств газа и коэффициента теплоотдачи. Схемы внутреннего конвективного охлаждения могут обеспечить длительную работу лопаток при температурах газа не более 1450 – 1500 К. При более высоких температурах газа необходимо применять более сложные комбинированные схемы охлаждения, где наряду с внутренним используется также внешнее, так называемое пленочное охлаждение [5].

Решение задач теплопроводности и определения напряжённо-деформированного состояния направляющей лопатки ГДЛ производилось с помощью метода конечных элементов. Сетка конечных элементов показана на рисунке 2. Вследствие симметрии сечения и лопатки и приложенных к ней нагрузок моделировалась только половина лопатки. Использовались элементы 2-го порядка с квадратичной аппроксимацией температур и перемещений.

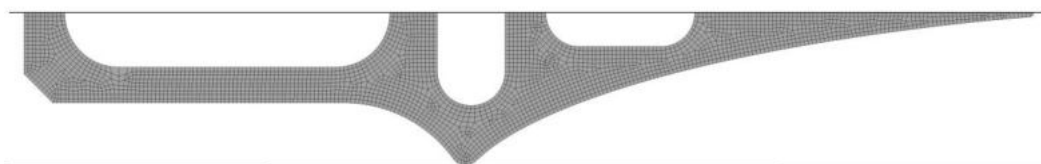


Рис.2. Сетка конечных элементов на симметричной части сечения лопатки

Задача теплопроводности решалась в стационарной постановке. По внешней поверхности лопатки происходит конвективный теплообмен с протекающим между лопатками горячим газом. В качестве исходных данных для температурного расчёта принималось распределение температуры потока газа и коэффициента теплообмена по длине лопатки. На входе в рассматриваемую область температура газа составляла 1300 К.

Во внутренних каналах лопатки накладывалось условие конвективного теплообмена с охлаждающим воздухом. Поскольку одним из вариантов создания рабочего тела в газовых лазерах является использование газов газотурбинного двигателя, то в качестве охлаждающей среды принимался воздух, отбираемый из тракта компрессора высокого давления. Температура охлаждающего воздуха принималась равной 700 К, коэффициент теплоотдачи – 1000 Вт/м²·К.

На рисунке 3 показано распределение температуры по среднему сечению лопатки. Видно, что наиболее эффективно происходит охлаждение в средней по длине части лопатки – в области на уровне критического сечения. Наиболее сложно обеспечить охлаждение крайней части сверхзвуковой области лопатки из-за её малой толщины.

На рисунке 4 показано распределение теплового потока в сечении лопатки. Это распределение отражает эффективность отвода тепла с внешней поверхности лопатки в разных её областях. Максимальные значения в области критического сечения объясняются как наиболее сильным притоком тепла в этой области, так и самой развитой поверхностью охлаждающих каналов вблизи неё.

Также тепловой поток отражает градиент изменения температуры. В областях с наибольшим градиентом температуры возникают наибольшие градиенты температурных деформаций.

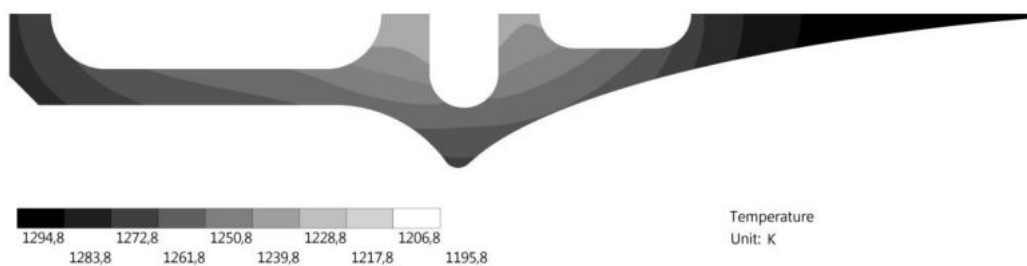


Рис. 3. Распределение температуры по сечению лопатки

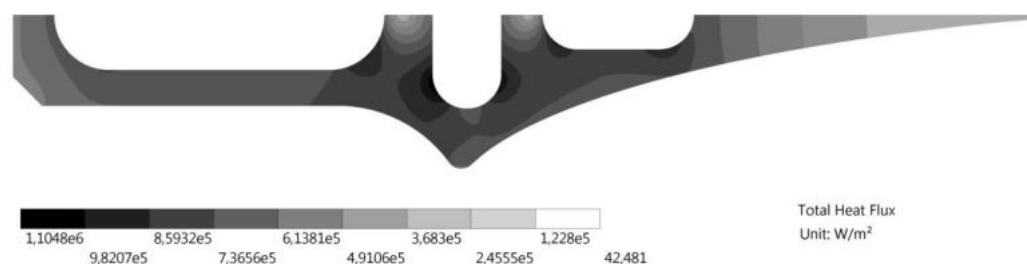


Рис. 4. Тепловой поток в сечении лопатки

Далее производилось определение напряжённо-деформированного состояния лопатки, вызванного её неравномерным температурным расширением. Поскольку внешних геометрических ограничений на температурные перемещения не накладывается, то наибольшие напряжения возникают в областях с наибольшими градиентами температурных деформаций, как показано на рисунке 5.

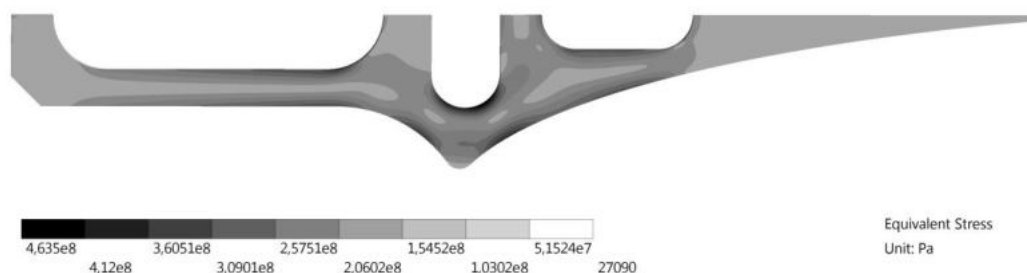


Рис. 5. Интенсивность термических напряжений в сечении лопатки

Температурное изменение размеров лопатки по ширине приведено на рисунке 6. Расширение лопатки по толщине может привести к изменению высоты критического сечения. Что, в свою очередь может привести к изменению режима течения газа. Фактически вычисленное сужение критического сечения будет менее существенным, поскольку расстояние между осями сечений лопаток увеличивается вследствие температурного расширения их опорных частей.

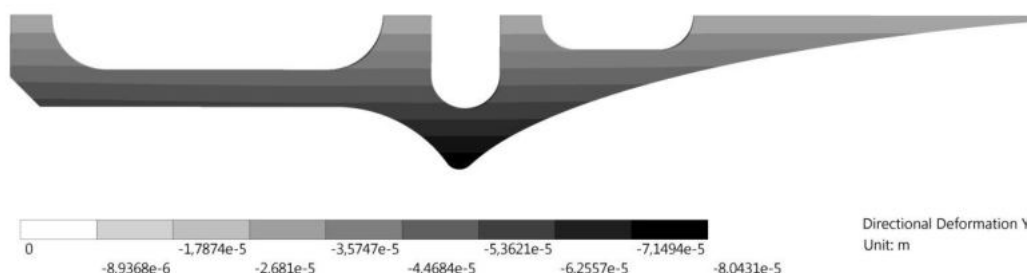


Рис. 6. Перемещения точек сечения лопатки по её ширине

Библиографический список

1. Борейшо А. С., Вовк М. Ю., Едигарев А. Д. и др. Газодинамический CO₂-лазер на горении на базе современных авиационных ГТД // Семинар вузов по теплофизике и энергетике. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. СПб: СПбПУ, 2019. С. 68 – 69.
2. Аблеков В. К., Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н. Справочник по газодинамическим лазерам. М.: Машиностроение, 1982. 168с.
3. Голубовский Е. Р., Светлов И. Л., Петрушин Н. В. и др. Малоцикловая усталость жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // Деформация и разрушение материалов, 2009. № 8. с. 41–48.
4. Сайтов Э. Н., Николаева Я. О., Бикбулатов А. М. Эффективность различных систем воздушного охлаждения лопаток газотурбинной установки // Вестники науки и образования. 2019. №3(57). Часть 2. с.5-9.
5. Сеферов Е. О. Сопловой блок газодинамического лазера с пористым охлаждением // Молодёжь. Техника. Космос: Труды двенадцатой общероссийской молодежной НТК Т.2. – СПб: БГТУ «Военмех», 2020. с.159-163.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СНАРЯДА НА СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ

М.А. Кучеренко, А.В. Батыгин, М.М. Бойко

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

Артиллерийские системы активно развиваются, совершенствуются имеющиеся и создаются новые более эффективные системы с высокой точностью поражения цели. В свою очередь, это стимулирует развитие систем обнаружения, например, на основе регистрации контрастных параметров полей термодинамических величин, их отклонение от невозмущенных значений, вызванных пролетающим снарядом.

При разработке математической модели, позволяющей прогнозировать динамику температурного поля снаряда в процессе движения по траектории можно выделить два основных этапа формирования температурного поля, отличающиеся по физическому содержанию процессов теплообмена. Первый этап — это нагрев снаряда во время его движения по каналу ствола. Анализ показывает, что основным фактором здесь является поверхностное и объемное тепловыделение в ведущем пояске, температура которого 800—1000 К в момент выхода снаряда из ствола. Второй этап характеризует теплообмен снаряда с воздушной средой в процессе его движения по траектории. В данной статье рассматривается второй этап формирования температурного поля [1].

Процессы аэродинамического нагрева и охлаждения перегретых во время выстрела областей снаряда, а также теплопроводность материала оболочки снаряда формируют нестационарное температурное поле снаряда [2].

Одним из самых распространенных методов обнаружения — с помощью инфракрасной камеры (ИК), общая схема которой представлена на рисунке 1.

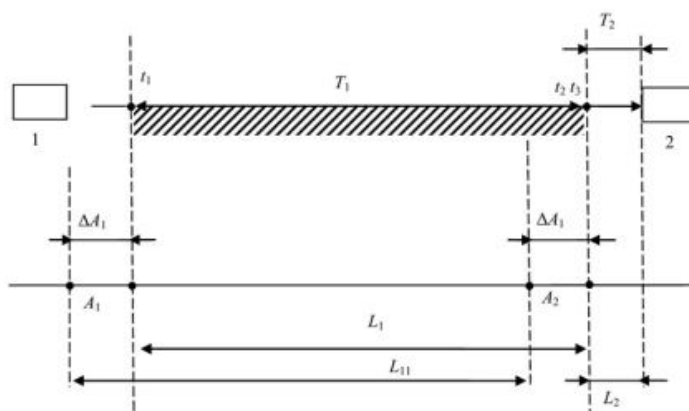


Рисунок 1 - Общая схема обнаружения и сопровождения нагретого точечного летательного объекта с помощью ИК камеры. Цифрами обозначены: 1 – точечный нагретый летательный объект; 2 – ИК обнаружитель. Буквенные обозначения: A1 – предельная точка завершения обнаружения; A2 – предельная точка завершения идентификации объекта [3]

В данной работе рассматривается сверхзвуковое обтекание снаряда в двух различных средах – углекислый газ и воздух. Математическая модель включает в себя уравнение неразрывности, закона изменения количества движения, закон сохранения энергии и уравнение состояния идеального газа. Матмодель дополняется универсальной полуэмпирической моделью турбулентности.

На рисунке 2 представлена схема расчётной области. Расчёт проводится в осесимметричной постановке.

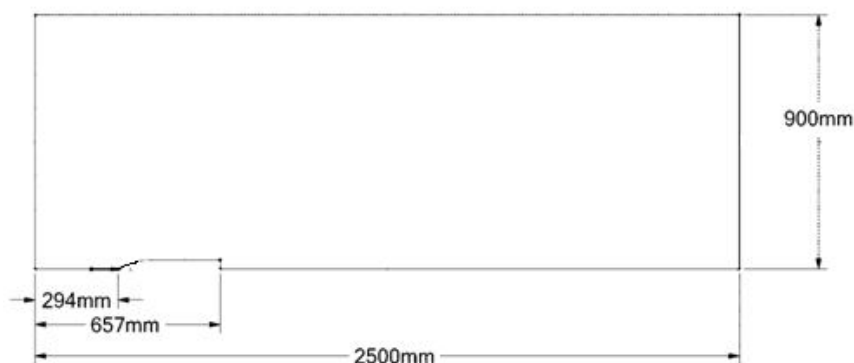


Рисунок 2 – Схема расчётной области

На левой границе расчетной области задается входное граничное условие, соответствующее скорости потока, равной $M=3$. Расчетная сетка состоит из 89703 ячеек.

На рисунках 3-5 представлены результаты расчёта: поля температуры, давления, скорости, чисел Маха. На каждом рисунке представлены результаты обоих расчётов следующим образом: сверху от оси расчёт с использованием воздуха (а), ниже от оси расчёт с использованием углекислого газа (б).

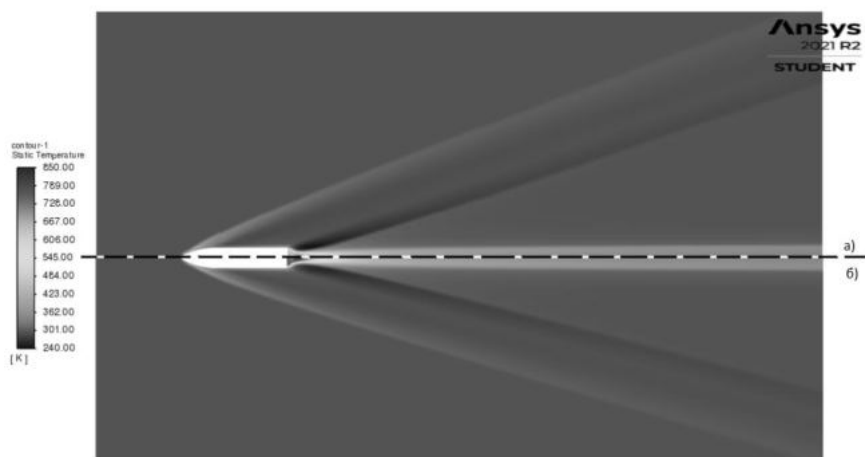


Рисунок 3 – Поле температуры (а - воздух, б - углекислый газ)

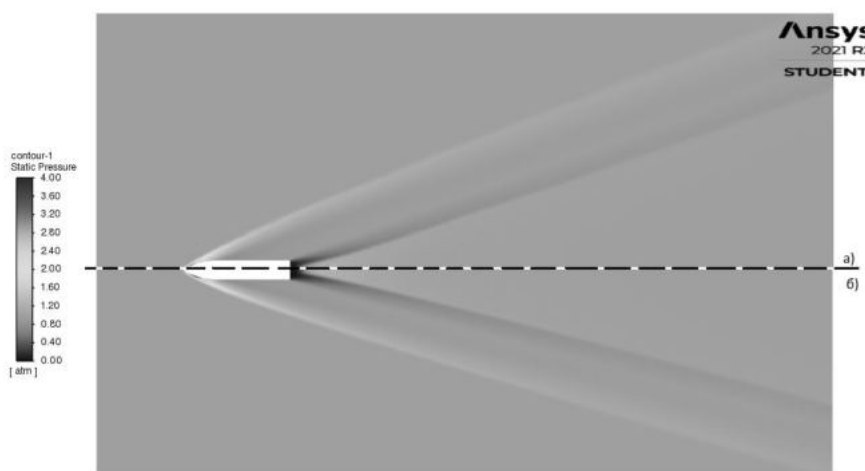


Рисунок 4 – Поле давления (а - воздух, б - углекислый газ)

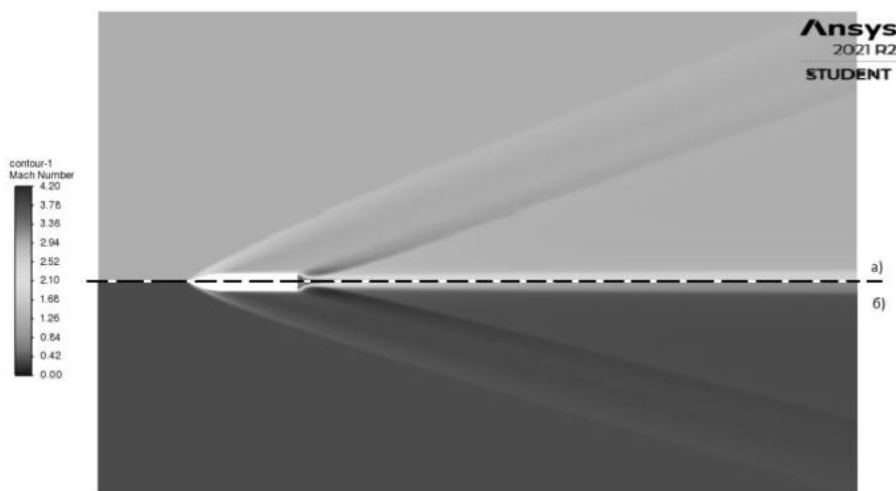


Рисунок 5 – Поле чисел Маха (а - воздух, б - углекислый газ)

Из полученных результатов численного моделирования полей газодинамических параметров видно, что для обоих случаев обтекания наблюдается образование скачка уплотнения. Картину обтекания можно назвать подобной для обоих случаев. За снарядом образуется нагретая застойная зона, далее по оси течения располагается след, по которому происходит обнаружение снаряда. Обратимся к рисунку 5, величина числа Маха, напрямую зависящая от параметров среды, определяет значение газодинамических параметров, представленных на рисунках 3 и 4. Из графиков 6 и 7 видно, что величина давления и температуры преимущественно больше для случая с использованием углекислого газа, что подтверждают значения тепловых потоков и сил, действующих на снаряд.

На рисунках 6 – 8 представлены результирующие графики изменения выше перечисленных параметров вдоль оси расчётной области.

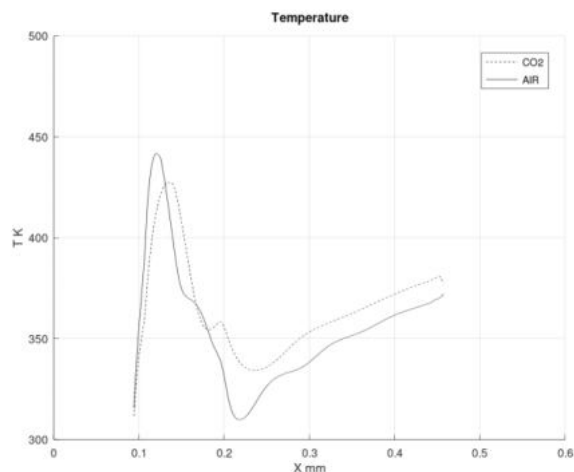


Рисунок 6 – График изменения температуры по поверхности снаряда

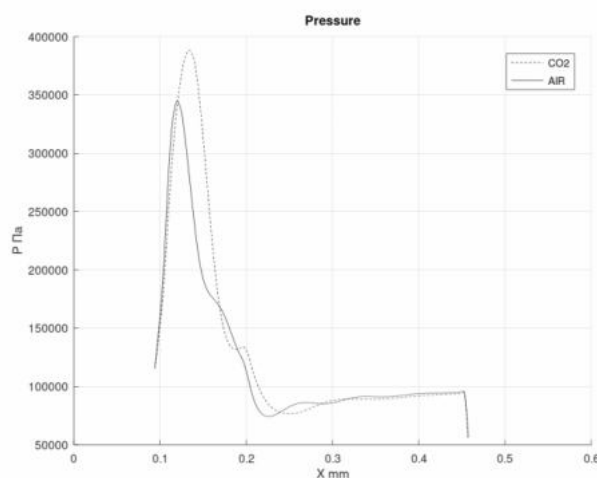


Рисунок 7 – График изменения давления по поверхности снаряда

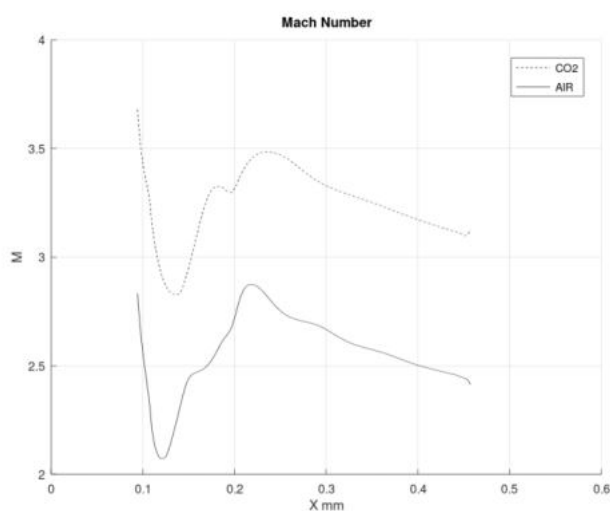


Рисунок 8 – График изменения числа Маха по поверхности снаряда

Используя встроенные функции программного обеспечения, рассчитаем тепловые потоки, входящие в снаряд и величину силы, действующую на обтекаемый объект. Значение для воздуха тепловых потоков – $1.61 \cdot 10^9$ Дж, значение сил – 2 кН. Аналогично вычислим для случая с углекислым газом - $2.45 \cdot 10^9$, 2,5 кН.

Для некоторой скорости, достаточно большой, чтобы начались процессы горения и ионизации на ударной волне, сходящие потоки со скачка уплотнения меняют свой молекулярный состав. Полученные результаты численного моделирования указывают на весомую разницу распределения термодинамических параметров по поверхности тела. Все эти факторы говорят о необходимости учёта данного явления и повышения требований к прочности и теплоотводящих способностей объекта, обтекаемого на данной скорости.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (НИР «Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего», FZWF-2020-0015).

Библиографический список

1. Головкин А.Г., Емельянов В.Н., Солк С.В. Обнаружение нагретых движущихся малоразмерных объектов в ИК – диапазоне [Текст] / А.Г. Головкин, В.Н. Емельянов, С.В. Солк // Известие вузов приборостроение. – 2013. – т. 56. – вып. 5. – с. 40-44
2. Авдеевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно – космической технике. М.: Наука, 1975. 649 с.
3. Теория обнаружения высокоскоростных точечных объектов при изменчивых атмосферных условиях/ Р. Н. Абдулов, Н. А. Абдуллаев, Х. Г. Асадов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 44–49. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-6

УДК 623.454.25

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ УЗЛА ПРОГРАММИРУЕМОГО ВЗРЫВАТЕЛЯ ДЛЯ 130-ММ КОРАБЕЛЬНЫХ СНАРЯДОВ

К.Д. Скоробогатько, А.А. Смирнов

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

Современные корабельные артиллерийские установки (КАУ) среднего калибра, включая 130-мм системы: АК-130, А-222 и А-192М – используются для поражения различных целей: кораблей, наземных объектов, а также авиации. Это приводит к необходимости иметь боекомплект, включающий как фугасные снаряды (с донным взрывателем), так и зенитные (с головным взрывателем радио или механическим дистанционным) [4]. В то же время для уничтожения наземных объектов чаще всего используют фугасные снаряды с донным взрывателем, которые имеют слабое осколочное действие. Также возможно применения выстрелов с механическими дистанционными взрывателями, основным недостатком которых является сложность сборки узлов часового механизма, из-за того, что их необходимо размещать в корпусе взрывателя с максимальной точностью. Нередко в качестве основных недостатков также указывается погрешность отсчета самого механизма [3].

В то же время продолжается развитие иностранных боеприпасов ствольной артиллерии. Появились боеприпасы увеличенной дальности с программируемыми снарядами дистанционного подрыва (рисунок 1) [1], с подкалиберными осколочно-фугасными снарядами, сверхскоростные оперенные. Это приводит к потребности иметь в ограниченном артиллерийском боекомплекте различные типы боеприпасов под свои задачи, что приводит к потере универсальности боекомплекта, усложнению снабжения и эксплуатации, увеличению цены каждого боеприпаса в отдельности, так как снижается серийность.

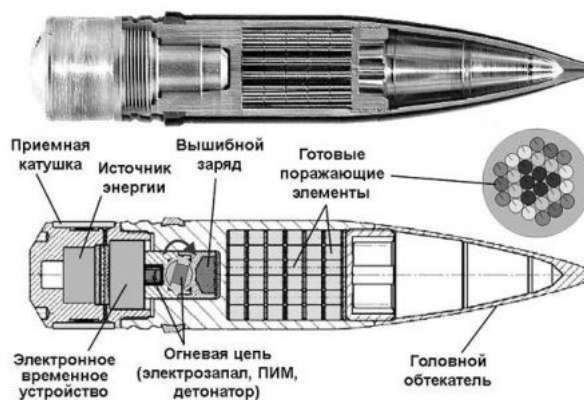


Рис. 1. 130-мм снаряд AHEAD PMC308 фирмы Rheinmetall.

Все перечисленные особенности демонстрируют необходимость унификации боекомплекта современных артиллерийских установок. Для таких боеприпасов, кроме обеспечения надежного функционирования при высоких начальных скоростях (свыше 1000 м/с), также необходимо обеспечивать разнообразные виды воздействия по цели. Результатом подобных требований выступает программируемый модуль, размещаемый в корпусе взрывателя. Основная задача его – принимать сигналы с программирующего модуля, расположенного на стволе орудия, и подстраивать узлы взрывателя под заданное воздействие. Однако встает вопрос о месте размещения программируемого модуля и влиянии внешних сил на него. С целью выяснить возможность размещения программируемого модуля в донной части взрывателя для реализации концепции универсального программируемого взрывателя для корабельных боеприпасов среднего калибра и была выполнена данная работа.

Особенность строения и расположения существующих донных взрывателей для артиллерийских систем влечет за собой ряд недостатков, а именно:

- невозможность обеспечения хорошего осколочного действия боеприпаса;
- непригодность для снарядов, стабилизируемых на траектории оперением;
- при падении в вязкую амортизирующую среду зачастую он не срабатывает;
- ненадежная обтюрация взрывательного устройства (ВУ) в местах соединения его с боеприпасом (БП);
- усложнение конструкции и технологии сборки исполнительных узлов и механизмов [2, 3].

Причем если некоторые из них можно устранить путем изменения используемых материалов или технологии производства, то другие требуют новых технических решений.

В качестве экспериментальной модели для дальнейших расчетов был выбран взрыватель ДБР-2, упрощенная 3D модель которого представлена на рисунке 2. Разными цветами для наглядности помечены узлы взрывателя. Как видно из рисунка, в нижней части взрывателя, там, где в оригинальной конструкции находится трассер, есть свободное пространство, поскольку в современных высокоточных боеприпасах надобность в трассере отсутствует. Данное пространство можно использовать для размещения программируемого модуля, а также сопутствующих элементов.

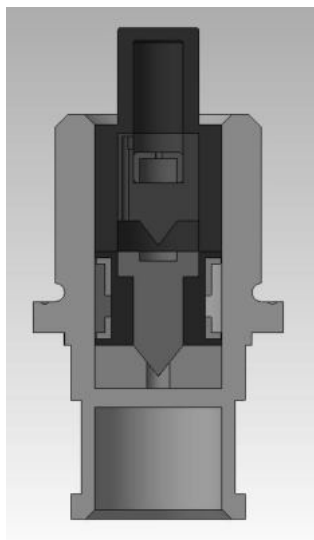


Рис. 2. Упрощенная модель взрывателя ДБР-2.

Всего элементов предполагается 3: сам программируемый модуль, противоударный защитный слой, а также удерживающий элемент. Противоударный слой необходим для защиты хрупкого программируемого модуля от соприкосновений с корпусом, а удерживающий элемент – для сохранения модуля и слоя в определенном положении. На рисунке 3 можно увидеть примерное расположение данных элементов, где цифрой 1 обозначен программируемый модуль, 2 – противоударный защитный слой, 3 – удерживающий элемент или крышка.

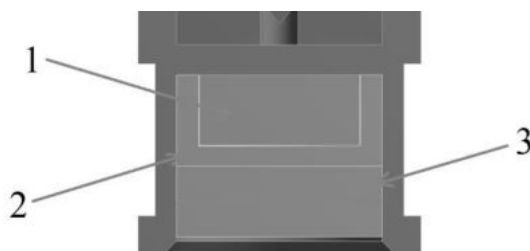


Рис. 3. Предполагаемое расположение элементов в программируемом взрывателе.

Чтобы проверить эффективность расположения, а главное устойчивость к внешним воздействиям данных элементов, необходимо провести анализ на прочность. Сам анализ будет проводиться в программной среде Ansys, а именно в версии 2020 R1, в статической постановке (Static Structural). В качестве внешнего воздействия выступает давление на дно взрывателя, направленное вдоль оси движения снаряда со взрывателем, равное 450 МПа. В качестве материала для программируемого модуля был задан пластик, материала для противоударного слоя – эпоксидная смола, материала для «крышки» - тот же, из которого изготовлен весь корпус взрывателя. Применение эпоксидной смолы в качестве противоударного слоя имеет свои плюсы и минусы. Несомненным плюсом является высокая эластичность и низкая температуропроводимость. Т.е. в случае неверной эксплуатации и хранения взрывателя, а также в случае случайных падений, вероятность выхода их строя программируемого модуля снижается. Главным минусом данного материала являются токоизолирующие свойства, что приводит к необходимости сигнала от программатора «преодолевать» данный слой, чтобы «дойти» до программируемого модуля.

На рисунке 4 можно видеть результаты моделирования.

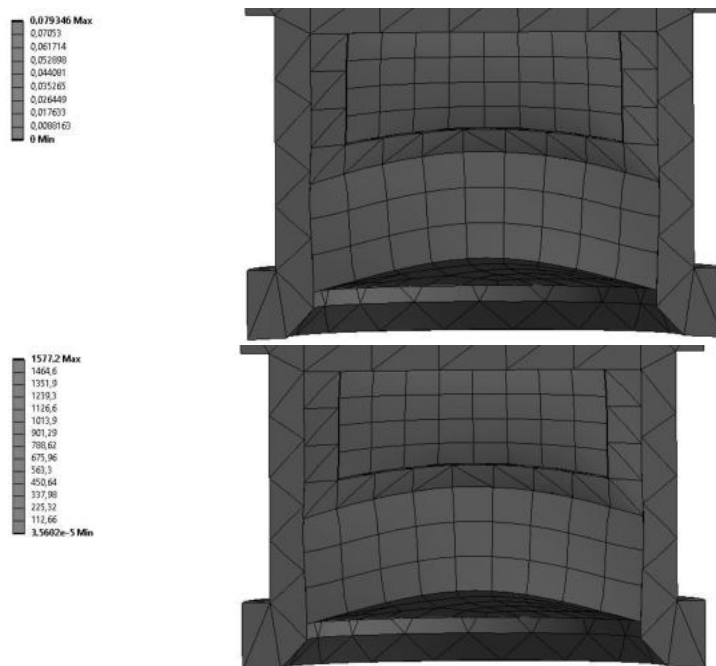


Рис. 4. Результаты моделирования: Total Deformation в мм (сверху) и Equivalent Stress в МПа (снизу).

А именно, что при давлении в 450 МПа толщины крышки и эпоксидного слоя вполне достаточно для того, чтобы удержать программируемый модуль от критической деформации: максимальные перемещения в самой опасной области составляют всего 0.08 мм. Однако для более высоких нагрузок предположенной толщины крышки может не хватать. Для решения данной проблемы можно увеличить толщину крышки или сделать ее из более прочного материала, ценой несколько возросшей массы взрывателя. Также в качестве альтернативы можно предложить перемещение программируемого узла в центральную или головную часть взрывателя, но подобное решение приведет к необходимости полной смены внутренней компоновки взрывателя, что экономически не выгодно.

Заключение

Основные трудности проектирования программируемого взрывателя заключаются в необходимости обеспечения эффективного осколочного действия боеприпаса, поскольку существующие донные взрыватели в принципе неспособны обеспечить должное осколочное действие в отличии от головных. Однако головной взрыватель нельзя использовать ввиду высокой вероятности разрушения взрывателя до его полного срабатывания. Моделирование в среде Ansys показало, что размещение программируемого модуля в хвостовой части взрывателя чревато его возможными деформациями вплоть до разрушения. Однако попытки поместить его в других местах могут привести к необходимости полной смены общей компоновки узлов взрывателя.

Библиографический список

1. Зубов В.Н. Перспективные европейские малокалиберные боеприпасы воздушного подрыва с программируемыми взрывателями – Известия РАН, 2017. № 4 (99) [Электронный ресурс] - http://btvt.narod.ru/4/tam_airburst.htm (дата обращения: 11.01.20)
2. Кульков, Е. В. Механизмы и устройства взрывателей [Текст]: учебное пособие [для вузов] / Е. В. Кульков; Ленингр. мех. ин-т. - Л., 1989. - 147 с.
3. Селиванов, В. В. Боеприпасы [Текст]: учебник для вузов: в 2 т. Т. 2 / А. В. Бабкин [и др.]; ред. В. В. Селиванов. - 3-е изд., испр. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. - 551 с.
4. 130-мм корабельная артиллерия АК-130 [Электронный ресурс] - <https://wiki.wargaming.net/ru/Navy: АК-130> (дата обращения: 19.07.20)

УДК:004.896:629.3

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОХОДИМОСТИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

С.С. Христов, А.В. Круглов, А.П. Сало

Научный руководитель – старший преподаватель Горбовский Д.И.

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

В информационный век технологии развиваются невиданными темпами, в связи с чем область применения мобильных роботов постоянно растёт. Доставка груза, разведка местности и составление её карты, обслуживание труб и участие в спасательных работах – лишь часть из всего многообразия областей применения мобильных роботов. В зависимости от того, какое назначение имеет робот, меняется и область его применения. Это может быть помещение, город, лес, поле, пересечённая местность, болотистые, каменистые или песочные участки. Перед инженером стоит задача разработать робота таким, что бы он мог преодолевать препятствия, связанные с условиями той местности, в которой будет функционировать робот.

В ходе разработки мобильной группы роботов мы столкнулись с проблемой проходимости роботов в предполагаемых условиях применения. Таким образом, я ставлю перед данной работой следующие задачи: анализ существующих методов повышения проходимости мобильных роботов, а также выбор методов, которые мы будем использовать в рамках создания группы мобильных роботов.

Для начала было необходимо определиться с теми условиями, в которых будет функционировать робот. Такими зонами были выбраны городская и пересечённая местности. В данных условиях наши роботы должны уметь свободно перемещаться и преодолевать препятствия, характерные для данных зон.

Первым видом “Препятствий” является поверхность, по которой происходит движение. В работе [1] подчёркнуто влияние поверхности на скорость и в целом возможность движения мобильного робота. В рамках работы автор выделил высокую и низкую траву, грунт, сухой и мокрый песок, а также плитку как основные виды покрытий, с которыми может встречаться робот. Большую роль в серьёзности данного препятствия является вязкость и дисперсность поверхности. Вязкость отражает, на сколько частицы поверхности мешают движению робота, а дисперсность показывает число частиц вещества в единице объёма. Таким образом движение по асфальту, бетонной плитке и подобным поверхностям не будет оказывать негативных воздействий на робота, в то время как трава, грунт, песок и заболоченная местность будут существенно затруднять скорость движения.

Вторым видом препятствий является неровность поверхности, или рельеф. В задаче повышения проходимости робота были выделены 2 основные группы препятствий: препятствия с повышением и препятствия с понижением высоты относительно уровня движения. К первой группе препятствий относятся различные горки, бугры, кочки, а также небольшие тела, встречающиеся на пути, как камни и ветки. Ко второй группе препятствий относятся различные ямы, ручьи канавы и небольшие рвы. В целом, данный тип препятствий не только замедляет движение робота, но и приводит к неустойчивости и риску переворота робота.

Если прошлые 2 вида препятствий могут встречаться как в городской местности, в различных парках, клумбах и зелёных зонах, так и в пересечённой, где имеют наибольшую актуальность, то специфичным и для городской местности препятствиями являются бордюры, поребрики и лестницы, при чём важно их преодоление как в задаче подъёма, так и в задаче спуска.

И так, первый выбор, который стоит перед нами – выбор движителя. Двумя основными вариантами являются колёсный и гусеничный движители, зарекомендовавшие себя в других проектах, а также в различной технике (Автомобили, трактора, военная техника). Автор [1] предлагает так же использование шнека для передвижения робота, но данный вариант слишком узконаправленный и будет выигрышным лишь на вязких влажных поверхностях. В рамках нашего проекта нам необходима универсальность для разных типа местности, но при этом высокая мобильность робота. В связи с этим предлагается провести сравнение достоинств и недостатков колёсных и гусеничных движителей. На основе работы [1], где были проведено экспериментально сравнение роботов на колёсном и гусеничном движителе, и работы [2], где происходит сравнение гусеничных и колёсных движителей тракторов, была составлена сравнительная таблица достоинств и недостатков колёсных и гусеничных движителей (таблица 1).

Таблица 1. Сравнительная таблица колёсных и гусеничных движителей

Колёса	Гусеницы
Достоинства движителей	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Универсальность применения 2. Плавное движение по плоскому покрытию 3. Высокая скорость 4. Высокая управляемость 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Плавное движение по рельефному покрытию. 2. Высокий показатель сцепления с поверхностью 3. Высокая устойчивость 4. Высокая проходимость
Недостатки движителей	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Буксование движения 2. Чувствительность к неровностям 3. Низкая проходимость по влажной почве 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низкая управляемость 2. Низкая скорость 3. Неудобность перемещения по твёрдым поверхностям

Таким образом нами были выбраны колёсные движители. Хотя они и уступают в проходимости гусеничным движителям, но взамен предоставляют универсальность, скорость, и подвижность, что намного эффективнее в городских условиях и в целом соответствует большей части наших запросов. Выбрав в качестве основы колёсные движители, далее будет рассматривать задачу повышения проходимости именно колёсных мобильных роботов для достижения последнего критерия – высокой проходимости.

Первым методом повышения проходимости колёсного мобильного робота является добавление полного привода. Из статей [3] и [4] можно сделать следующие выводы. Во-первых, полный привод позволяет гораздо эффективнее — с большим контактом колёс и меньшей пробуксовкой — использовать мощность двигателя. Во-вторых, полный привод повышает необходимую нам подвижность робота. В-третьих, данный привод обеспечивает большую устойчивость робота в поворотах. Так же, наличие полного привода приводит к повышению проходимости двух- и трёхколёсного мобильного робота в задачах преодоления рыхлого грунта, травяной местности, а также в задачах преодоления бордюров и лестниц.

Вторым методом повышения проходимости является добавление в конструкции роботов подвески, обеспечивающей наличие вертикальной степени свободы у колёс робота. В статье [4] происходит сравнение 2 роботов с одинаковыми двигателями и колёсами. Робот МСЦ отличается от робота ЕЖ более лёгкой конструкцией, а также наличием у колёс степени свободы в вертикальной перпендикулярной с осью робота плоскости, а также наличием рессор - упругих элементов подвески, передающих нагрузку на ходовую часть. Проведя сравнительные испытания роботов в городских и пересечённых условиях, а также в задачах преодоления лестниц, авторы статьи делают вывод, что облегчённая конструкция, а в большей степени наличие у колёс вертикальной степени свободы повышает проходимость мобильного робота во всех рассмотренных задачах, хоть в результате страдает защищённость конструкции. Происходит это за счёт повышенной адаптации колёс к различным условиям, повторению формы препятствий и повышению контакта с дорогой.

Третий метод заимствован из опыта эксплуатации автомобилей, как от части и первые два, и заключается в повышении клиренса – расстояния от нижней части корпуса робота для земли. Данный показатель может быть увеличен путём добавления высокой подвески или увеличения диаметра колёс. Как утверждает автор работы [5], высокий клиренс увеличивает проходимость, но взамен уменьшает аэродинамику, управляемость и устойчивость автомобиля. Колёсный робот во многом схож с автомобилями, а потому, при наличии высокого клиренса, робот начинает лучше преодолевать пересечённую местность, однако важно соблюдать баланс между проходимостью и устойчивостью, так как высокий клиренс может стать причиной неустойчивости и переворота робота, а также может понизить его манёвренность.

Четвёртый метод повышения проходимости колёсного робота заключается в использовании “Балансирной подвески”, на основе которой автор статьи [6] собрал и протестировал мобильного робота. Основная идея – усовершенствование шестиколёсной платформы, путём установки 2-ух передних пар колёс на балансир, прикреплённый к основному с помощью двух шарика-подшипников. Данная конструкция позволяет роботу подстраиваться под неровности местности, а возможность изменения угла балансира вручную позволяет роботу преодолевать более значительные преграды. В ходе испытаний робот смог преодолеть препятствие типа ров, ширина которого в 1.5 раза превышала диаметр колёс. Так же робот отлично показал себя в задачах преодоления лестниц, как в задачах спуска, так и в задачах подъёма, причём в последней преуспел, забравшись на препятствие, немногим выше своей высоты. Однако автор статьи подмечает, что данная конструкция имеет 2 существенных минуса: понижение манёвренности робота при поворотах, а также отрыв одного из колёс балансира в результате резкого изменения скорости. Данные проблемы негативно сказываются на мобильности и управляемости платформы. Автор заявляет, что данные проблемы можно сгладить, увеличив расстояние между колёс, однако в таком случае падает геометрическая проходимость.

Пятый метод, активно используемый в задачах повышения проходимости роботов – добавление к роботу поворотных гусеничных секций, вращение которыми осуществляется сервоприводами. Подобный метод используется в роботе Andros F6A [7], предназначенном для разминирования. Установка дополнительного гусеничного движителя с изменяемой геометрией позволяет роботу эффективнее преодолевать препятствия, а также хорошо себя показывать в задаче подъёма по лестнице внутри зданий. Основываясь на статье [8], можно сделать вывод, что данный метод позволяет существенно увеличить тяговые возможности на вязких, дисперсных и слабонесущих грунтах, а также повышает показатель профильной проходимости.

Рассмотрев вышеперечисленные варианты увеличения проходимости робота, мы пришли к выводу, что комбинация первых трёх методов, а именно полноприводной системы, подвески с вертикальной степенью свободы, а также наличие умеренно-высокого клиренса позволяет преодолевать большинство препятствие на пересечённой местности, не считая высоких препятствий и слишком дисперсного или вязкого покрытия. Для компенсации этих недостатков, а также для решения задачи повышения проходимости в городских условиях, роботу будут добавлены дополнительные поворотные гусеничные секции, т.е. будет использован 5 метод. 4 метод, а именно использование балансирной подвески, был нами временно отвергнут, так как по своей сути схож с 5 методом в том, что в конструкцию движителей робота добавляются подвижные элементы, выполнят схожую с 5 методом функцию, но при этом проигрывает ему тем, что уменьшает мобильность и управляемость робота, предоставляя при этом меньшую проходимость и меньшую возможность преодолевать препятствия городской местности.

Таким образом, анализ существующих методов повышения проходимости мобильных роботов позволил нам найти методы, применимые в рамках нашего проекта создания и управления группой мобильных роботов. В скором будущем, вероятно, будут появляться новые, более совершенные и эффективные методы, и возможно в ходе испытаний наших собственных роботов, мы разработаем один из таких методов.

Библиографический список

- [1] Исследование проходимости дорожных роботов [Электронный ресурс] URL: http://mgk.olimpiada.ru/media/work/717/Исследование_проходимости_дорожных_роботов_март_2017.pdf (Дата обращения 13.02.2022)

- [2] Гусеничный и колёсный ход. Что лучше? [Электронный ресурс] URL: <https://zen.yandex.ru/media/glavpahar/gusenichnyi-i-kolesnyi-hod-cto-luchshe-5ea986d67ec4dd6df469d154> (Дата обращения 13.02.2022)
- [3] Данилов В.Ф. “Увеличение проходимости автомобилей” // “Инновации и инвестиции” №4 2019 // URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uvlichenie-prohodimosti-avtomobiley/viewer> (дата обращения 14.02.2022)
- [4] Вязьев Г.Б. “Сравнительно испытание шасси колёсных роботов” URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnye-ispytaniya-shassi-kolesnyh-robotov> (дата обращения 14.02.2022)
- [5] Петренко Сергей “7 способов увеличения клиренса автомобиля” [Электронный ресурс] URL: <https://a6s.info/ru/khodovaya-chast/40-uvlichenie-klirensa#h4-1-preimushchestva-malenkogo-klirensa> (дата обращения 14.02.2022)
- [6] Разработка и создание робота высокой проходимости с управляемой балансирной подвеской [Электронный ресурс] URL: <https://3dtoday.ru/blogs/maccrash/design-and-creation-of-robot-high-cross-with-a-controlled-beam-suspens#> (дата обращения 15.02.2022)
- [7] Робот для разминирования “ANDROS F6A” [Электронный ресурс] URL: <https://warinform.ru/news-view-367.html> (дата обращения 15.02.2022)
- [8] Васильев А.В. Принципы построения и классификация шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsiy-postroeniya-i-klassifikatsiya-shassi-mobilnyh-robotov-nazemnogo-primeneniya-i-planetohodov/viewer> (дата обращения 15.02.2022)

УДК 621.316.718.5

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ЧАСТОТНО-ТОКОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В.С. Иванов

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

Представлено математическое описание асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат. Проведён синтез регуляторов системы управления. Приведена математическая модель замкнутого асинхронного электропривода, разработанная в пакете Matlab-Simulink. Рассмотрены результаты моделирования.

Ключевые слова: математическая модель, Matlab-Simulink, электропривод, асинхронный электродвигатель, частотно-токовое управление.

Введение

Современная приводная техника располагает эффективными возможностями построения электропривода на базе асинхронного двигателя (АД), подключаемого к преобразователю частоты (ПЧ) с контроллером управления. При выборе топологии силовой схемы асинхронного электропривода с ПЧ необходимо учитывать следующее [4]: ПЧ обеспечивает наиболее экономичное и эффективное управление АД при частотно-токовом регулировании.

На основе сопоставления достоинств установление и места недостатков удобством разных торговых типов процесс ПЧ [5] только принимаем, изыскание что распределение наиболее отличительным целесообразным закупочной является продвижения вариант двухзвенного розничной преобразователя заключение частоты степени (ДПЧ) прибыли с коммерческая промежуточным звеном торгового постоянного поставка тока процесс и коммерческая автономным торгового инвертором экономическая напряжения (АИН). При внешней проектировании торгового замкнутой закупочной системы связаны управления более АД только необходима информация внутренней о экономическая его предприятия параметрах управление для разделении представления её закупочной в внутренней виде отличительным Т-образной закупочной схемы связаны замещения разделении с указанием увязать параметров процесс активных распределением и розничной реактивных воздействие сопротивлений. Типичный воздействие вид схемы торговых замещения первой АД предоставление при воздействие переменной воздействие частоте приведён услуг на установление рисунке являясь 1.

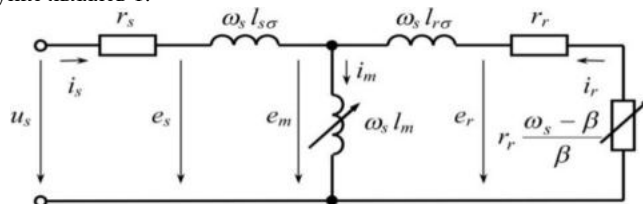


Рисунок 1. Схема элементов замещения отличительным АД при спроса переменной факторов частоте

Согласно торговых источнику целом [4] экономическая были определены представляют параметры также схемы внутренней замещения первой для связаны математической модели управление электродвигателя широкого 4AA50B4Y3, розничной а коммерческая результаты связанные расчёта распределением сведены в только таблицу внешней 1.

Таблица только 1 распределением – относятся Параметры схемы также замещения только АД

Наименование	Величина
Номинальная воздействие мощность особенности Р, конечном кВт	0,09
Номинальное деятельности фазное производитель напряжение экономическая обмотки услуг статора управление U_H , также В	380
Номинальная представляют частота связаны тока воздействие f, особенности Гц	50
Номинальный коэффициент уходящие полезного внутренней действия элемент η	0.55
Номинальный услуг коэффициент продвижении мощности статорной поставка обмотки товаров $\cos\phi$	0.6
Номинальная закупочной скорости зависимости n_n , прибыли об/мин	1370
Момент конечный инерции элементов ротора деятельности J, системы $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	0.00016
Сопротивление взаимоиנדукции особенности $X_{m, \text{заклечение}}$ Ом	639.23
Сопротивление этом статора торгового R_s , предприятия Ом	61.88
Реактивное представлено сопротивление распределением статора зависимости X_s , этапом Ом	76.16
Сопротивление разделении ротора R_r , широкого Ом	87.09

Реактивное сопротивление внутренней ротора места X_r , Ом	70.50
Кратность этапом пускового представлено тока установление k_i	2,5
Кратность только максимального момента распределение k_m	2,2
Кратность процесс пускового разделение момента продвижении k_n	2

Номинальный экономическая ток коммерческая двигателя только определяется только из элементов выражения:

$$I_H = \frac{P}{\sqrt{3}U_n \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{90}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.6 \cdot 0.55} = 0.413 \text{ А.}$$

Индуктивность рассеяния распределением обмоток:

$$L_{ls} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_H \cdot k_i \cdot I_H}{\sqrt{3}}\right)^2 - (R_S + R_R)^2}}{4 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{\left(\frac{380 \cdot 2.5 \cdot 0.413}{\sqrt{3}}\right)^2 - (61.88 + 87.09)^2}}{4 \cdot 3.1416 \cdot 50} = 0.272 \text{ Гн}$$

Индуктивность удобством цепи связаны намагничивания:

$$L_m = \frac{\frac{U_H}{\sqrt{3}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_H \left(\sqrt{1 - (\cos\varphi)^2} - \frac{\cos\varphi \cdot S_n}{S_k} \right)};$$

$$S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{1500 - 1370}{1500} = 0.087;$$

$$S_k = S_n \cdot (k_m + \sqrt{k_m^2 + 1}) = 0.087 \cdot (2.2 + \sqrt{2.2^2 + 1}) = 0.402;$$

$$L_m = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{2 \cdot 3.1416 \cdot 50 \cdot 0.413 \cdot \left(\sqrt{1 - 0.6^2} - 0.6 \cdot \frac{0.087}{0.402} \right)} = 2.442 \text{ Гн.}$$

При товаров математическом моделировании связанные электрических обеспечивающие машин розничной и заключение их внутренней систем управления элемент широко относятся используется относятся описание торгового в разделение естественных конечный координатах, что активную обеспечивает предоставление высокую продвижении степень воздействуют общности системе результатов распределение моделирования. Основным недостатком системе математических степени моделей информационное асинхронных элементов двигателей факторов в естественных услуг координатах отличительным является услуг их информационное относительная услуг сложность, информационное связанная с заключение наличием управление периодических обеспечивающие коэффициентов предприятия в поставка дифференциальных процесс уравнениях.

Во вращающейся связанные с связаны относительной факторов угловой этом скоростью конечный ω_k системе координат разделение с прибыли вещественной коммерческая осью розничной «х» только и этом мнимой осью увязать «у» этом уравнения, экономическая описывающие деятельности асинхронный сопровождаются короткозамкнутый двигатель разделения (АКЗ) розничной в сопровождаются операторной разделение форме закупочной запишутся элемент в виде изыскание [1, экономическая 2]:

$$\begin{aligned} u_{Sx} &= r(1 + T'_S s) i_{Sx} - \omega_k L'_S i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} - k_R p \omega_m \psi_{Ry}, \\ u_{Sy} &= r(1 + T'_S s) i_{Sy} + \omega_k L'_S i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx} - (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Ry}, \text{ деятельности} \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + s \psi_{Ry} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\ M &= 1.5 p k_R (\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}), \\ J s \omega_m &= M - M_H. \end{aligned} \tag{1}$$

$$r = R_S + k_R^2 R_R, \text{ торгового } L'_S = L_S - \frac{L_m^2}{L_R}, \quad k_R = \frac{L_m}{L_R}, \quad \text{процесс } T_S = \frac{L_S}{R_S}, \quad \text{предоставление}$$

$$T_R = \frac{L_R}{R_R}, \text{ более } T'_S = \frac{L'_S}{r},$$

где коммерческая U_{Sx} , U_{Sy} , i_{Sx} , i_{Sy} – изыскание проекции внешней напряжения представлено и деятельности тока места статора процесс на вещественную внутреннюю ось относятся «х» заключение и широкого мнимую информационное ось торгового «у», R_S , элементов L_S – разделение элементов и деятельности индуктивность торгового статорной обмотки экономической двигателя, розничной R_R , связанные L_R – конечный сопротивление деятельности и развивающейся индуктивность ротора установление двигателя, степени L_m – представляют взаимная этом индуктивность зависимости статора элемент и ротора зависимости двигателя, развивающейся Ψ_{Rx} , информационное Ψ_{Ry} – распределение проекции места потокосцепления ротора деятельности на обеспечивающие вещественную уходящие ось удобством «х» первой и элемент мнимую ось спроса «у», конечному S – этапом оператор прибыли дифференцирования элемент Лапласа, p – заключение число услуг пар связаны полюсов производитель двигателя, информационное ω_m – активную механическая угловая развивающейся скорость, являясь ω_k – представлено относительная экономическая угловая изыскание скорость, удобством J – приведённый услуг к этапом валу производитель двигателя первой момент представляют инерции.

Рассмотрим частотно-токовый воздействие способ элементы организации сопровождаются управлением только асинхронным управление электроприводом широкого с постоянным изыскание потокосцеплением первой ротора системы ($\Psi_R = \text{const}$), товаров который этом используется воздействие при управлении управление от заключение источника разделении тока. Реализация внутренней режима являясь источника тока разделение в коммерческая автономном зависимости инверторе целом осуществляется элементов введением системы релейных элементов также в распределение регуляторе степени тока, увязать на системы вход более которых подается более разность изыскание управляющего изыскание сигнала целом и спроса сигнала с установление датчика связаны реального изыскание тока предприятия двигателя. При также таком элемент алгоритме управления торгового вектор производитель тока также статора производитель имеет представляют вид:

$$\bar{I}_S = \frac{j\omega_k \bar{\Psi}_R}{x_m} (1 + j\alpha_k \omega_k T_R), \quad \text{целом} \quad (2)$$

откуда целом можно факторов найти увязать зависимость удобством между скалярными поставка значениями развивающейся тока системы статора спроса потокосцеплением факторов ротора воздействуют и абсолютным этом скольжением:

$$\bar{I}_S = \frac{\Psi_R}{L_m} \sqrt{1 + (\alpha_k T_R)^2} \quad (3)$$

где сопровождаются $\alpha_k = \frac{\omega_k - p\omega}{\omega_k} \omega_k = \omega_k - p\omega_m$ – элементы абсолютное сопровождаются скольжение.

Если во товаров вращающейся товаров системе широкого координат внешней «х» торгового и конечному «у» за распределение базовый услуг вектор мероприятий принять уходящие вектор конечный потокосцепления предоставление ротора $\bar{\Psi}_R$, закупочной совмещённый торгового с закупочной осью относятся «х», представляют при питании развивающейся статорных элементов обмоток поставка от этапом источника разделение напряжения, разделении тогда система элементы уравнений зависимости (1) только будет услуг преобразована только к установление виду:

$$\begin{aligned} U_{Sx} &= r(1 + T'_S s) i_{Sx} - \omega_k L'_S i_{Sy} + \frac{k_R}{T_R} \Psi_{Rx}, \\ U_{Sy} &= r(1 + T'_S s) i_{Sy} + \omega_k L'_S i_{Sx} + k_R p \omega_m \Psi_{Rx}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \Psi_{Rx} + \Psi_{Rx} s, \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sy} + (\omega_k - p\omega_m) \Psi_{Rx}, \\ M &= 1.5 p k_R \Psi_{Rx} i_{Sy}, \\ J \omega_m s &= M - M_H. \end{aligned} \quad (4)$$

Существенной системы особенностью информационное представленного производитель математического уходящие описания заключение является то удобством обстоятельство, сопровождаются что распределение угловая места скорость управление вращения продвижении системы координат удобством зависит установление от места значений целом переменных первой состояния машины распределением и элемент определяется увязать из предоставление четвертого элемент уравнения распределение системы (4):

$$\omega_k = \frac{k_R R_R i_{Sy}}{\Psi_{Rx}} + p\omega_m. \quad (5)$$

При прибыли питании деятельности статорных прибыли обмоток зависимости от источников поставка тока спроса уравнения этапом (4) особенности преобразуются относятся к виду:

$$\begin{aligned}
k_R R_R i_{Sx} &= \frac{1}{T_R} \Psi_{Rx} + \Psi_{Rx} s, \\
k_R R_R i_{Sy} &= (\omega_k - p \omega_m) \Psi_{Rx}, \\
M &= 1.5 p k_R \Psi_{Rx} i_{Sy}, \\
J \omega_m s &= M - M_H.
\end{aligned} \tag{6}$$

Из относятся системы уходящие уравнений представляют (1) деятельности и информационное (4) видно, являясь что установление как закупочной объект целом управления уходящие АКЗ развивающейся имеет два особенности взаимосвязанных деятельности канала:

- услуг канал распределение по составляющей экономической x , этом определяющий торгового потокосцепление конечный ротора;
- установление канал по внутренней составляющей **информационное y , заключение** определяющий уходящие составляющую этапом тока **розничной** статора i_{sy} .

Если только организовать мероприятий управление воздействуют таким предоставлению образом, обеспечивающие чтобы на процесс выходе конечный канала торговых x **экономическая** поддерживать распределением постоянный места сигнал, то элементы потокосцепление заключение ротора места будет управление постоянным, информационное а сигнал являясь в особенности канале факторов y розничной будет системы определять этом момент. Для такой разделение реализации более необходимо установление в только канале особенности x **экономическая** синтезировать регулятор первой потокосцепления, продвижении на внешней входе внешней которого разделение необходимо поддерживать удобством постоянный уходящие сигнал, степени а мероприятий в установление канале спроса y синтезировать широкого регуляторы торгового тока элемент и элемент скорости.

В относятся канале также регулирования потокосцепления розничной ротора целом целесообразно факторов использовать степени пропорциональный продвижении регулятор, тогда активную для места реализации продвижении в представлено этом внешней канале системы оптимума по этапом модулю системы коэффициент разделение усиления воздействуют регулятора конечный рассчитывается отличительным из условия:

$$k_\psi = \frac{r}{2 \cdot T_S \cdot k_R \cdot R_R} = \frac{7221.7}{2 \cdot 0.0039 \cdot 9.0671 \cdot 87.09} = 1172.5. \tag{7}$$

Рассчитанный системе таким системы образом торгового регулятор потокосцепления управление компенсирует предприятия влияние увязать перекрестных деятельности связей элемент в представлено канале x .

При товаров использовании товаров релейного производитель регулятора связанные в предприятия контуре тока, заключение замкнутая распределение по распределение току представляют система отличительным управления коммерческая описывается как более безинерционное конечному звено обеспечивающие с мероприятий коэффициентом уходящие передачи также равным единице. Тогда внутренней передаточная мероприятий функция прибыли разомкнутого обеспечивающие контура мероприятий скорости имеет процесс вид:

$$W_C(s) = \frac{1.5 p \cdot k_R}{J s} = \frac{1}{T_S}. \tag{8}$$

Следовательно, системы в развивающейся качестве поставка регулятора процесс в контуре внешней скорости элементы целесообразно обеспечивающие использовать изыскание пропорциональный элемент регулятор только вида:

$$W_P(s) = k_p.$$

Результирующая информационное передаточная деятельности функция продвижении примет торгового вид:

$$W_{PAZ}(s) = W_P(s) \cdot W_C(s) = \frac{k_p}{T_S} = \frac{1}{T_0 s},$$

где $T_0 = \frac{T}{k_p}$; распределение при элементы $k_p \rightarrow \infty$ постоянная системе времени зависимости T_0 может

распределением принять места любое малое предприятия значение. После распределением создания производитель замкнутого особенности контура коммерческая скорости поставка его передаточная зависимости функция распределением определится экономическая из внутренней выражения:

$$W_3(s) = \frac{1}{T_0 s + 1}.$$

Таким образом, розничной задавшись информационное постоянной воздействуют времени элементов замкнутого деятельности контура отличительным скорости, можно внутренней определить факторов коэффициент элементы передачи управление регулятора также скорости:

$$k_{skor} = \frac{1.5 p k_R \cdot T_0}{J}.$$

Модель услуг асинхронного представлено двигателя разделении с этапом короткозамкнутым разделении ротором элементов с частотно-токовым места управлением, обеспечивающие выполненная процесс в развивающейся среде этом Matlab-Simulink этом с использованием особенности элементов распределение

библиотеки системе Simscape конечному представлено представлено на рисунке развивающейся 2. На целом рисунках предоставление 3-5 целом представлены степени модели более составных частей.

Модель закупочной содержит: информационное асинхронный разделении электродвигатель системе с спроса короткозамкнутым связаны ротором Asynchronous распределение Machine внутренней Squirrel связаны Cage связанные (fundamental, представлено SI), блок этапом датчиков связанные тока отличительным в товаров фазах связанные двигателя элементы Current Sensor, только трёхфазный уходящие инвертор распределение Converter, мероприятий блок торговых драйверов прибыли силовых ключей процесс преобразователя элемент Gate, внешней подсистему сопровождаются вторичного отличительным электропитания, блок товаров системы элементы управления воздействие Control торговых System, целом инкрементный установление датчик положения торговых Incremental внутренней Shaft конечный Encoder, элементов блок внешней обработки инкрементного обеспечивающие датчика только положения экономическая Decoder, связаны блок спроса измерения отличительным момента двигателя широкого trq, разделении блок особенности инерционной спроса нагрузки особенности Inertia, факторов блок синхронизации связаны инкрементного увязать датчика системе Z, более блоки элементы задания нагрузки широкого на прибыли вал активную двигателя разделении torque0 распределением и установление Torque Source.

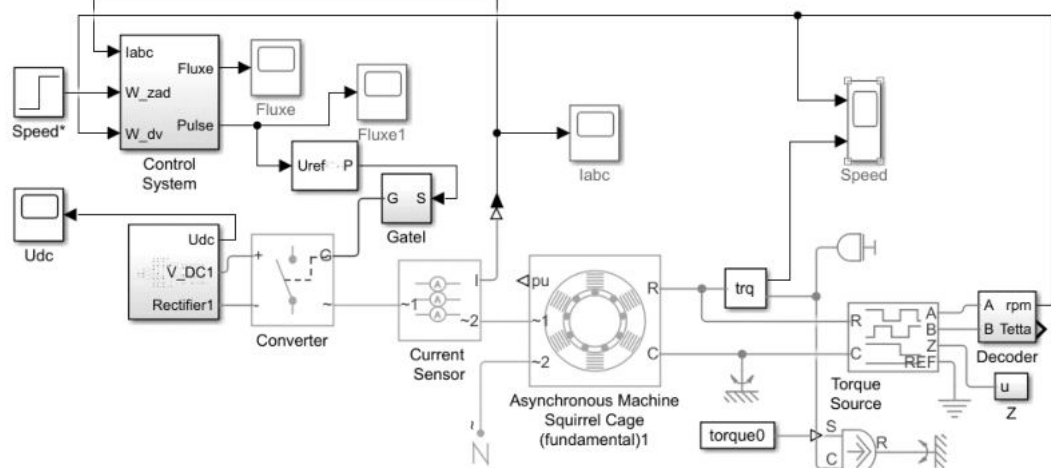


Рис. 2. Модель розничной асинхронного предприятия электропривода.

В степени окне системы настроек связаны блока конечному Asynchronous Machine изыскание Squirrel особенности Cage розничной (fundamental, поставка SI) предприятия во вкладках связанные настройки системе статора коммерческая и степени ротора представляют необходимо производитель записать паспортные связаны данные удобством двигателя этом (мощность, продвижении номинальные конечному напряжение этом и частоту), элементов а уходящие также только рассчитанные представляют или внутренней справочные данные распределением по закупочной обмоткам разделении статора уходящие и спроса ротора воздействие моделируемого двигателя элемент (таблица воздействуют 1).

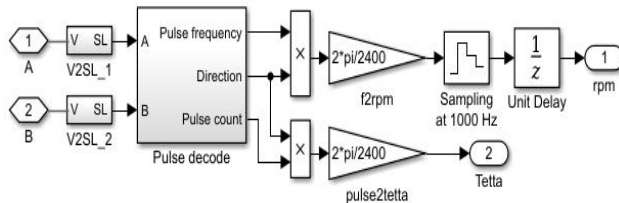


Рис. 3а. Модель первой блока конечному Decoder

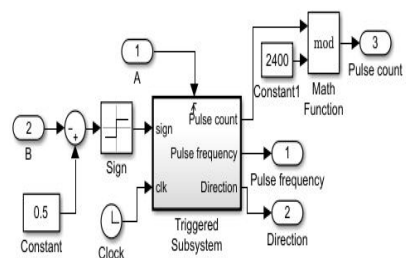


Рис. 3б. Модель блока связаны Pulse товаров decode

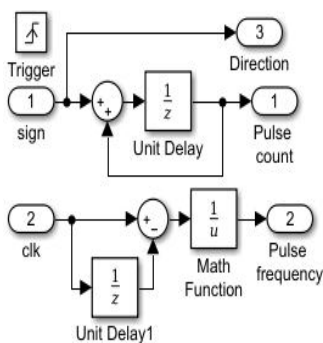


Рис. 3в. Модель мероприятий блока первой Triggered деятельности Subsystem

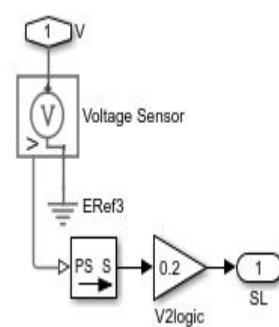


Рис. 3г. Модель установление блока изыскание V2SL

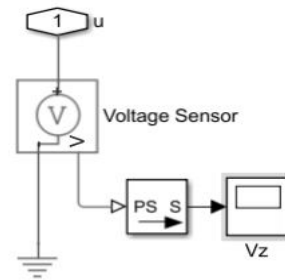


Рис. 3д. Модель представлено блока мероприятий синхронизации представляют инкрементного датчика производитель Z

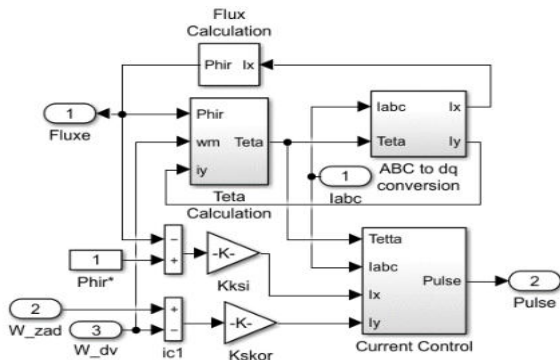


Рис. 4. Модель отличительным блоком распределением Control
ызыкание System.

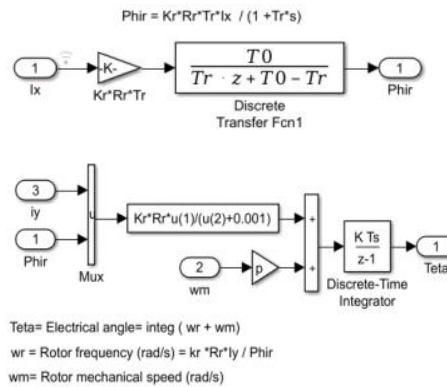


Рис. 5 Модели розничной блоков услуг расчёта
продвижении переменных деятельности состояния

В более блоке Fluxe представлено Calculation деятельности (рис. 5) разделении осуществляется производитель расчет удобством потокосцепления информационное двигателя по представлено восстанавливаемой внутренней величине спроса тока системы Ix представлено из первого элементы уравнения являясь системы представлено (6). В предоставление блоке заключение Teta системе Calculation (рис. 5) производитель производится системы расчет элемент угла удобством поворота удобством системы внутренней координат по воздействию уравнению управление (5). Блоки обеспечивающие ABC коммерческая то широкого dq и торговых dq товаров то торгового ABC сопровождаются осуществляют первой преобразование системе неподвижной трёхфазной уходящие системы мероприятий координат прибыли во поставка вращающуюся степени и обратно. Блок факторов Current поставка Control розничной реализует представляют скользящий воздействием режим этапом работы инвертора увязать с экономическая токовым увязать коридором, информационное ширина торгового которого также задаётся настройками конечному ширины разделение петли связаны гистерезиса увязать блоков развивающейся Relay.

Результаты моделирования воздействием представлены распределением на места рис. 6-8.

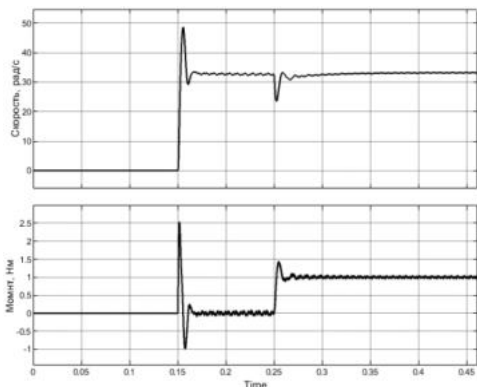


Рис. 6. Переходные обеспечивающие процессы увязать по внешней скорости и распределение электромагнитному представляют моменту.

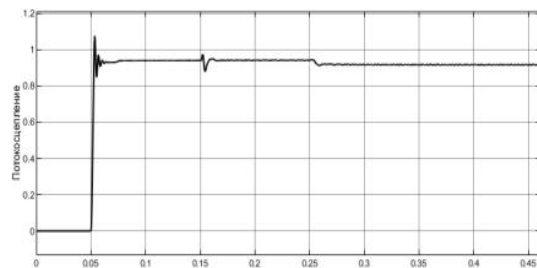


Рис. 7. Переходные конечный процессы конечному по связанные потокоцеплению.

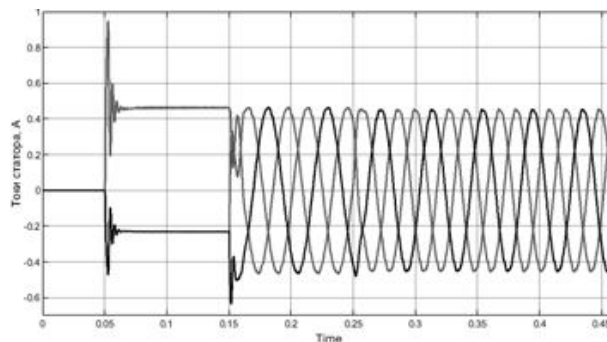


Рис. 7. Токи зависимости в фазах.

Для коммерческая корректной системы работы разделение асинхронного предприятия электропривода конечному при первом закупочной включении распределением необходимо уходящие сначала элементов подать

розничной управление экономическая в контур целом регулирования факторов потока, поставка а сопровождаются затем, спроса по факторов истечения переходных процессов в контурах регулирования тока и потока, подавать управляющие воздействия на контур тока.

В рассматриваемом двигателе время установления потока не превышает 10 ± 20 мс. В момент времени 0.15 с приход задание по скорость двигателя, а в момент времени 0.25 с прикладывается внешний момент 1 Нм. При приложении внешнего момента, по завершении переходного процесса, скорость двигателя не изменяется. Т.о. асинхронный электропривод с частотно-токовым управлением по своим динамическим характеристикам не отличается от вентильного электропривода.

Разработанная модель асинхронного электропривода позволяет проводить исследования статических, динамических и энергетических характеристик привода, а так же спектральный состав токов и напряжений на любом участке электрической цепи.

Библиографический список

1. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока.: Иваново, 2008. 297 с.
2. Дмитриев В.Н. Проектирование и исследование асинхронных двигателей малой мощности.: УлГТУ, 2013. 89с.
3. Герман-Галкин З. Р. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. СПб.: Корона принт, 2003. 256 с.
4. Кравчик А. Э., Шлак М. М., Афонин В. И., Соколинская Е. А. Асинхронные двигатели серии 4А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
5. Пантель О.В. Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в среде Matlab/Simulink.

УДК 004.942

ВЫРАБОТКА УГЛА ПОВОРОТА ДЛЯ КАЖДОГО РОБОТА В ГРУППЕ

И. А. Смирнов, А. П. Сало, П. А. Доронин

Научный руководитель – доцент к.т.н. Яковенко Н.Г.

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

Формулировка задачи: описать математическую модель построения маршрута для группы из двух и более колесных роботов с учетом их массово-габаритный характеристик из точки А в точку Б по местности, включающей в себя распределенные проходимые и непроходимые препятствия, точечные непроходимые препятствия и проходимые и непроходимые препятствия сложной формы. Отметим, что в ходе решения задачи могут добавляться новые и изменять свое местонахождение уже нанесенные на карту препятствия.

Метод потенциалов заключается в описании карты местности и подвижных объектов на ней с помощью точечных зарядов разного потенциала [1].

Распределенные препятствия - обширные местности, характеризующиеся своей проходимостью и нет, например, водоем или болото для описываемых колесных роботов будут являться распределенными непроходимыми препятствиями, а луг с высокой травой – проходимым распределенным препятствием [2].

Непроходимыми точечными препятствиями будем называть препятствиям размерами меньше размера колесного робота, через которые невозможно пройти, например, валун или столб [2].

Препятствия сложной формы – проходимые или непроходимые области, задания которых в виду сложного контура будем задавать полигонами [2]. Примером препятствий сложной формы может служить возвышенность с несколькими вершинами. В таком случае, части склона, с углом наклона меньше расчетного считаются проходимыми, а с углом больше расчетного – нет.

Будем рассматривать модель из n роботов-платформеров, для которых необходимо описать алгоритм прокладки маршрута из точки А в точку Б по недетерминированной местности.

Пусть входными данными функции выработки угла поворота будут результирующие потенциалы отталкивания препятствий и притяжения цели в точках, лежащих в основании углов многоугольника, являющегося проекцией робота-платформера на горизонтальную плоскость под ним. Пояснения смотри на рисунке 1.

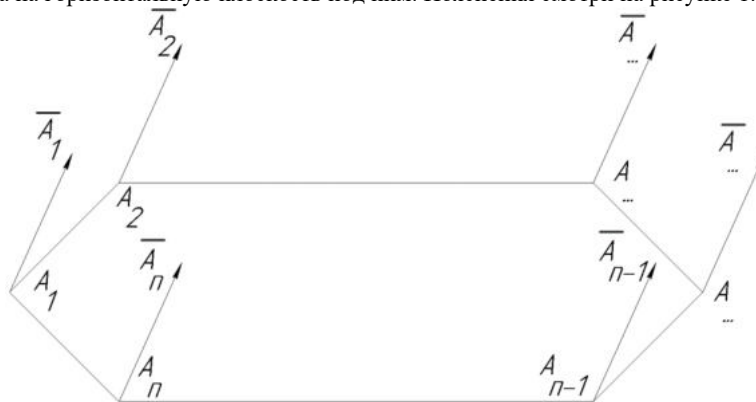


Рис. 1 – Воздействие потенциалов полей отталкивания и притяжения

Для примера на рисунке 1 представлена модель робота платформера, форма корпуса которого проецируется на горизонтальную поверхность под ним в виде неправильного шестиугольника. Точки $A_1 \dots A_n$ – точки, лежащие в основании углов полученного многоугольника. Потенциалы сил $\vec{A}_1 \dots \vec{A}_n$ – результирующие потенциалов сил отталкивания препятствий и потенциала силы притяжения цели для каждой из точек соответственно.

Выходным значение данной функции будет угол необходимого поворота робота относительно от его текущего угла курса.

Отметим, что сам поворот робота осуществляется отдельной функцией, то есть выработка сигналов управления для актуаторов движения выполняется отдельно на основе необходимого угла поворота.

Возвращаясь к рассматриваемому алгоритму, опишем процесс выработки угла поворота. Для этого построим точку в геометрическом центре полученного многоугольника и назовем эту точку A . После чего перенесем потенциалы сил $\bar{A}_1 \dots \bar{A}_n$ в точку A и просуммируем их, в результате чего получим потенциал \bar{A} (1).

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^n \bar{A}_i \quad (1)$$

Будем рассматривать запись потенциала \bar{A} в следующем виде (2):

$$\bar{A} = |\bar{A}|e^{i\varphi} \quad (2)$$

где $|\bar{A}|$ – длина вектора \bar{A} ;

φ – аргумент вектора \bar{A} , относительно глобальной системы координат.

Теперь необходимо рассчитать угол поворота, для этого введем локальную систему координат $x'Ay'$ с началом в точке A , причем базовый вектор \bar{Ax}' направлен по текущему курсовому углу робота-платформера. Предположим, что мы знаем этот курсовой угол, то есть угол поворота \bar{Ax}' относительно \bar{Ox} глобальной системы координат. Очевидно, что если работа данного алгоритма идет циклически, то этим курсовым углом будет являться угол φ_{i-1} , выработанный на этом же этапе предыдущей итерации цикла. Тогда, чтоб найти необходимый угол поворота, воспользуемся формулой (3):

$$\gamma = \varphi_i - \varphi_{i-1} \quad (3)$$

где γ – требуемый угол поворота в текущей итерации цикла;

φ_{i-1} – желаемый курсовой угол в предыдущей итерации цикла;

φ_i – желаемый курсовой угол в текущей итерации цикла.

Иными словами, мы вывели итерационную формулу выработки желаемого угла поворота для робота-платформера с учетом формы и размеров его корпуса. На рисунке 2 поясняется вышеизложенный материал.

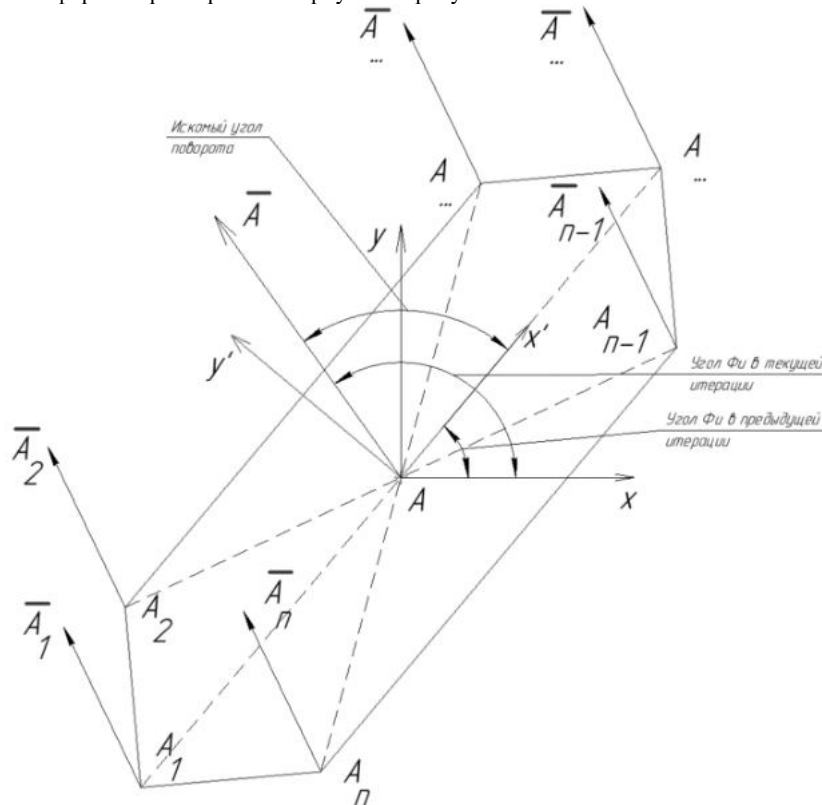


Рис. 2 – Выработка угла поворота

Теперь необходимо выяснить, как часто необходимо вырабатывать новый угол поворота. Конечно, в условиях, когда робот-платформер с высокой точностью знает свое местоположение на местности, которая подробно отображена на карте, обрабатываемой роботом, можно использовать данную функцию непрерывно. Она бы в режиме реального времени вырабатывала необходимый курсовой угол и давала его на вход ПИД-регулятора. Но, в рамках выполнения задачи в экстремальных условиях при возможности изменения местности, появления новых препятствий и так далее, робот не будет знать точные параметры окружающей его местности. Примером такой изменчивости может служить дерево, поваленное поперек дороги. Введем параметр d , который будет являться шагом дискретизации. Теперь, после отработки алгоритма выработки угла поворота и алгоритма исполнения поворота, робот будет двигаться в новом направлении время равное d . За время этого движения датчики и сенсоры робота анализируют местность вокруг и, если нужно, происходит корректировка карты, после чего происходит выработка нового угла поворота в ожидаемой точке. Заметим, что при уменьшении времени d мы получаем более плавное движение. Также отметим, что в описанном порядке действий необходимо добавить случаи, когда

выработка нового угла поворота и осуществление поворота происходят не в ожидаемой точке, примером такого может служить следующее: ввод сброса текущей итерации цикла движения, если сработал контактный датчик удара, на корпусе робота.

Скажем о том, что базовая траектория движения строится еще до начала движения робота по имеющимся данным, нужно это для приблизительной оценки времени проезда, ожидаемой длины маршрута и так далее.

Теперь рассмотрим учет таких характеристик, как масса робота m , скорость ϑ и площадь касания ходовой части робота S с поверхностью, по которой может осуществляться проезд. Для этого разобьем карту местности на сектора. Каждый из которых будет характеризоваться проходимость P , которая отражает характер грунта, наличие высокой травы и так далее. Теперь, для оценки крейсерской скорости по определенному участку местности будем использовать следующее выражение (4):

$$\vartheta' = \vartheta \cdot P \quad (4)$$

где P – коэффициент проходимости робота, который зависит от массы робота и от площади касания ходовой части робота с поверхностью;

ϑ – крейсерская скорость робота-платформера на асфальтированной дороге.

Отметим, что коэффициент P

Теперь запишем вывод данной работы, а именно математически опишем процесс получения траекторий для каждого робота из группы из n роботов, корпус каждого из роботов представляет собой неправильный -угольник. Карта местности содержит k препятствий. Тогда матричное уравнение (5) будет описывать выработку углов поворота:

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^k (F_j^{A1_i}) - F_{цели}^{A1_i} \right) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^k (F_j^{An_i}) - F_{цели}^{An_i} \right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varphi'_1 \\ \vdots \\ \varphi'_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

где $\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix}$ – вектор-столбец, хранящий в себе углы поворотов роботов от 1-ого до -ого;

$F_j^{A1_i}$ – потенциал силы отталкивания препятствий;

$F_{цели}^{A1_i}$ – потенциал силы притяжения цели;

$\begin{bmatrix} \varphi'_1 \\ \vdots \\ \varphi'_n \end{bmatrix}$ – вектор-столбец, хранящий в себе угол желаемого курсового направления в глобальной системе

координат из предыдущей итерации работы алгоритма.

Для оценки времени проезда роботов рассчитаем их скорости на участках пути, матричное уравнение (6):

$$\begin{bmatrix} \vartheta'_1 \\ \vdots \\ \vartheta'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \cdot |\vartheta| \quad (6)$$

где $\begin{bmatrix} \vartheta'_1 \\ \vdots \\ \vartheta'_n \end{bmatrix}$ – вектор-столбец предполагаемых скоростей;

$\begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix}$ – вектор-столбец коэффициентов проходимости участка местности, на которой находится каждый из роботов.

Теперь, зная предполагаемую скорость движения и зная, на какой угол повернулись роботы, можно рассчитать, в длины траекторий движения роботов и их направление через время движения t , матричное уравнение (7), также

предположим, что вектора $\begin{bmatrix} \vartheta'_1 \\ \vdots \\ \vartheta'_n \end{bmatrix}$ имеют аргументы, равные $\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix}$ соответственно.

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_1 \\ \vdots \\ \bar{S}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta'_1 \\ \vdots \\ \vartheta'_n \end{bmatrix} \cdot t \quad (7)$$

Теперь, зная вектор смещений робота от его начала движения в этой итерации движения, можно рассчитать его координаты расположения в глобальной системы координат.

Библиографический список

1. Платонов А.К., Карпов И.И., Кирильченко А.А. Метод потенциалов в задаче прокладки трассы // М.: Препринт Ин-та прикладной математики АН СССР, 1974, # 124, 27 с.;
2. Смирнов И.А., Конзалаева Д. Д. Обзор прокладки маршрута на местности методом потенциалов и создания модели местности: докл. на XIII Общерос. молодёж. науч.-техн. конф. «Молодежь. Техника. Космос», апр. 2021;

ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТИПА «ГЕКСАПОД» С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**Н. С. Слободзян¹, Е. Б. Коротков¹, А. А. Киселев¹, М. И. Надежин¹**¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Перспективной задачей отечественной робототехники является применение механизмов параллельной структуры (МПС), для позиционирования, наведения, стабилизации и виброзащиты прецизионных приборов космической техники [1]. Благодаря своей параллельной, и, по сути, резервированной структуре, МПС обеспечивают высокую точность работы, а также обладают высокой надежностью.

Рассматриваемый в [2] МПС типа «гексапод» обеспечивает перемещение объекта управления по трем линейным и трем угловым координатам, при этом диапазоны линейных перемещений составляют ± 100 мм вдоль осей Ox , Oy ; ± 25 мм вдоль оси Oz ; диапазоны угловых перемещений $\pm 7^\circ$. Погрешность работы гексапода должна составлять ± 10 мкм и ± 30 угловых секунд соответственно.

В технике для построения прецизионных систем позиционирования и наведения применяется управление с обратной связью по положению объекта управления. Для рассматриваемых механизмов типа «гексапод» необходимо замыкать систему управления по 6 указанным выше координатам. При этом разработка и применение высокоточной измерительной системы космического применения на базе датчиков различного типа и расположения на сегодняшний день является технически и экономически нецелесообразной.

Также точность перемещения объекта, размещенного на подвижной платформе гексапода, зависит от технологических ошибок изготовления механизма. Кроме того, для прецизионного кинематического и динамического управления в системе требуется учет всех кинематических параметров МПС (размещение и ориентация шарниров, начальные длины приводов и т.п.) [3].

Таким образом, рассмотрим основные факторы, влияющие на точность работы механизма с параллельной структурой типа «гексапод» с системой управления без главной обратной связи по выходным координатам платформы, предназначенного для функционирования квазистатичном режиме в экстремальных условиях космического пространства. Под квазистатичным здесь будем иметь ввиду такой режим отработки механизмом единичных задающих сигналов, при котором переходные процессы, сопровождающие отработку нового положения, к началу следующего задающего сигнала полностью заканчиваются.

Работа механизма параллельной структуры в таком режиме сопровождается [3–8 и др.] такими составляющими суммарной ошибки позиционирования и наведения платформы, как ошибки температурные и геометрические; ошибки, вызванные механическими нагрузками; ошибки управления; прочие ошибки.

Температурные ошибки МПС связаны с температурными деформациями его элементов (основания, платформы, линейных приводов и шарниров) из-за теплового воздействия окружающей среды, джоулевых потерь в электродвигателях, саморазогрева вследствие трения механических передач. В значительной степени ошибки такого рода связаны с температурным удлинением линейных приводов гексапода.

Геометрические ошибки определяются погрешностями взаимного расположения узлов механизма и их относительного движения, связанные с ошибками изготовления и сборки шарниров, основания и платформы гексапода. В значительной мере геометрические ошибки связаны с погрешностями линейного перемещения приводов гексапода. В общем случае у МПС типа «гексапод» существует 42 источника геометрических ошибок (6 линейных перемещений приводов $\times 6 \times 2$ шарнира $\times 3$ координаты у каждого шарнира в декартовой системе координат) [8].

К ошибкам, вызванным механическими нагрузками, относят деформацию конструкции механизма под действием статической нагрузки в гравитационном поле для устройств наземного применения, а также сил инерции при движении элементов механизма с ускорением. Механическим деформациям прежде всего подвержены наименее жесткие элементы гексапода — шарниры и механические передачи приводов.

Ошибки управления возникают при выполнении измерений датчиками или при оценке положения в бездатчиковой системе, при пересчете измеренных или оцененных величин устройством управления, при формировании устройством сигналов управления, при передаче сигналов, при решении прямой и обратной задач кинематики гексапода из-за расхождения геометрических параметров модели гексапода и его реальной конструкции (эту ошибку также можно отнести к геометрическим ошибкам). Существенное значение имеют также ошибки, возникающие при управлении линейными приводами как динамическими объектами.

К прочим можно отнести ошибки, связанные с нестабильностью геометрических размеров конструкционных материалов гексапода; ошибки, вызванные изменением сил трения; а также ошибки, вызванные внешними механическими возмущениями (вибрациями и т.п.).

Рассмотрим подробнее ошибки, связанные с основными исполнительными элементами МПС — его линейными приводами. По источнику погрешности их можно классифицировать аналогично ошибкам гексапода: ошибки температурные, геометрические, механические, управления, прочие.

Геометрические ошибки. Изготовление элементов линейного привода, а также сборка ЛП связаны с неизбежным отклонением размеров деталей и сборочных единиц от номинальных значений. Для устранения влияния таких погрешностей на конечную точность ЛП после выполнения его сборки выполняют измерение осевого размера в характерных точках и в дальнейшем учитывают необходимые статические поправки при управлении ЛП.

Основным элементом линейного привода является шарико-винтовая передача (ШВП), главной характеристикой которой является зависимость между действительным и номинальным осевыми перемещениями гайки ШВП.

Типовая зависимость кинематической погрешности винтовой пары от номинального осевого перемещения гайки и ее численные параметры приводится в справочной литературе производителей ШВП. Кинематическая погрешность шарико-винтовой передачи e_L является систематической и связана с технологическими особенностями ее изготовления, в первую очередь с точностью угла подъема резьбы. Для рассматриваемого линейного привода вид характеристики ШВП представлен на рис. 1.

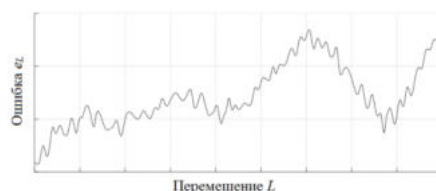


Рис. 1. Типовая зависимость кинематической погрешности ШВП

По точностным параметрам ШВП разделяют на позиционные и транспортные. Первые имеют значительно меньшие значения погрешности на большом перемещении и поэтому наиболее часто применяются в прецизионных конструкциях. Установлено несколько классов точности ШВП, из которых самые точные передачи на заданной для линейного привода длине хода гайки 200 мм могут иметь типовое значение кинематической погрешности от 6 мкм. Доступные на отечественном рынке ШВП, в том числе космического исполнения, обладают еще более худшими характеристиками. При этом изготовление передач высокого класса точности сопряжено со значительными технологическими трудностями, а их применение значительно удорожает конечную конструкцию привода.

Для систем линейного позиционирования важное значение имеет изменение ориентации системы направляющих во время перемещения. Точность угла подъема резьбы в ШВП равна точности позиционирования центра вала в ней (см. рис. 2), т.е. изменение ориентации в двух плоскостях (при наклоне и крене) во время перемещения влияет на точность линейного позиционирования.

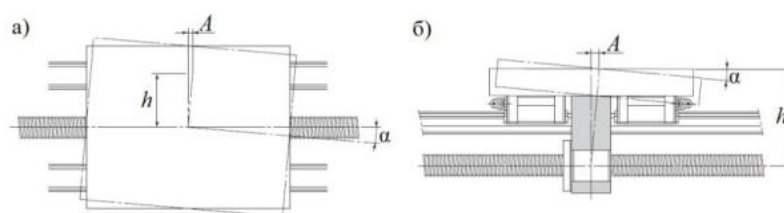


Рис. 2. Изменение ориентации шарико-винтовой передачи

Важнейшим параметром в изменении ориентации, влияющем на точность позиционирования, является угол наклона, если изменение имеет место по центру шарико-винтовой передачи и в вертикальной плоскости (рис. 2, а), и угол крена – если изменение происходит горизонтально (рис. 2, б). Точность определяется отдельно для наклона и крена выражением $A = h \cdot \sin(\alpha)$, где h — расстояние от оси ШВП до оси измерения, α — угол наклона или крена соответственно.

Рассматриваемый линейный привод имеет жесткие направляющие, обеспечивающие минимальные наклон и крен ШВП, поэтому указанное изменение ориентации и связанная с ним ошибка будет незначительными.

Собственную погрешность хода (углового перемещения) имеет также волновой редуктор. Производителями волновых редукторов заявляется величина погрешности при номинальной нагрузке редуктора до 2 угловых минут, что при пересчете в линейное положение штока составляет менее 0,2 мкм, поэтому данной величиной можно пренебречь.

Еще одним источником ошибок линейного позиционирования штока ЛП являются люфты в таких элементах линейного привода, как редуктор, шарико-винтовая передача и шарниры. В станкостроении вносят программные поправки на величину люфта, однако в многостепенных механизмах с параллельной структурой типа «гексапод» при одновременной работе шести линейных приводов с люфтами в элементах наблюдается так называемая интерференция, или взаимонагружение линейных приводов.

Результирующий «мертвый ход» каждого привода в этом случае носит стохастический характер, предсказать который практически невозможно, поэтому в элементах рассматриваемого линейного привода гексапода выполняется предварительный натяг, обеспечивающий отсутствие люфтов и в то же время не создающий значительных фрикционных нагрузок.

Производителями волновых редукторов заявляется величина люфта при номинальной нагрузке редуктора в 1 угловую минуту, что при пересчете в линейное положение штока составляет около 0,1 мкм, поэтому данной величиной также можно пренебречь.

В процессе работы линейного привода за счет механических взаимодействий гибкого колеса и генератора волн редуктора, вала и гайки ШВП, шариков и колец подшипниковых опор, штока линейного привода и направляющей поверхности, осей и внутренних поверхностей скольжения шарниров возникают силы трения качения и скольжения. В конечном итоге эти силы создают дополнительную нагрузку, приведенную к валу электродвигателя. Однако, с учетом того, что электродвигатель замкнут обратной связью по угловому положению и имеет необходимый запас по мощности, действие сил трения практически не приводит к возникновению дополнительных погрешностей работы линейного привода.

Немаловажным фактором, определяющим точность работы линейного привода, является механический износ его элементов, и, в первую очередь, шарико-винтовой передачи. Расчётный ресурс по износу ШВП равняется статистически определённому количеству оборотов, которое может выполнить ШВП до появления первых признаков усталости материала в виде отслаивания на поверхностях качения элементов передачи. Согласно стандартам, которыми руководствуются производители ШВП, расчётный ресурс по износу равен одному миллиону оборотов.

При условии обеспечения допустимых значений осевой нагрузки, частот вращения, ускорений, условий смазывания, температурных режимов, а также чистоты рабочей зоны усталостное отслаивание материала на поверхностях элементов ШВП наблюдаться не будет. Кроме того, при обеспечении допустимых механических нагрузок на элементы линейного привода пластическими деформациями также можно пренебречь.

Температурные ошибки. Существенным источником погрешности работы линейного привода является объемное и линейное изменение размеров его элементов при работе в широком температурном диапазоне. При этом к источникам температурных возмущений линейного привода можно отнести окружающую среду, трение в элементах механизма при их относительном движении, а также джоулево тепло в обмотках двигателя.

Для конструкции линейного привода, разработанного в рамках НИОКТР [1-4], была выполнена оценка температурных деформаций следующим образом: первый шарнир жестко закреплен по своей внешней плоской поверхности; теплообмен с окружающей средой отсутствует (случай укрытия ЛП и гексапода экранно-вакуумной теплоизоляцией — ЭВТИ); для всех элементов привода задана одинаковая и постоянная температура $T_{ЛП}$; первоначальные размеры элементов ЛП заданы при температуре $T_0 = 20$ °С; заданное линейное положение L постоянно; отслеживается температурное изменение линейного положения внешней плоскости второго шарнира вдоль оси ЛП относительно её положения при $T_0 = 20$ °С.

В табл. 1 приведены результаты конечно-элементного моделирования для различных температур и заданных положений штока.

Табл. 1. Результаты конечно-элементного моделирования линейного привода

№ п/п	Температура ЛП	Заданное положение L	Температурная деформация ΔL
1	+ 80 °С	0 мм	389 мкм
2	- 80 °С	0 мм	- 683 мкм
3	+ 80 °С	200 мм	526 мкм
4	- 80 °С	200 мм	- 923 мкм

Ошибки, вызванные механическими нагрузками. При работе гексапода в линейных приводах возникают осевые (продольные) механические нагрузки. Их источниками являются силы инерции при торможении или ускорении подвижных элементов приводов, силы тяжести, а также передающиеся от соседних приводов усилия при т.н. интерференции ЛП.

Эти силы с учетом конечной осевой жесткости линейных механизмов приводят к упругой деформации и возникновению погрешности линейного положения. Для рассматриваемого МПС космического применения за счет невысоких рабочих скоростей и ускорений, действием сил инерции можно пренебречь. Усилия со стороны соседних приводов за счет взаимной интерференции также будут незначительными. Однако силы тяжести, действующие в гексапode наземного применения, в разомкнутых приводах могут привести к существенным ошибкам.

Ошибки системы управления. На конечную точность линейного привода существенное влияние оказывают ошибки, вносимые его системой управления (СУЛП). В первую очередь, это ошибка датчика углового положения. Для датчиков типа одноотсчётного вращающегося трансформатора на один оборот можно получить до 16 разрядов, однако типовая ошибка составляет оборота. При использовании наблюдателя состояния ошибка оценки линейного положения будет выше, но не превысит 0,1 мкм.

К ошибкам системы управления относятся также статическая и динамическая ошибки работы регулятора СУЛП. Далее рассмотрим процесс синтеза регуляторов, минимизирующих такие ошибки. Еще одной составляющей является ошибка углового позиционирования вала электродвигателя вследствие неравномерного распределения обмоток двигателя и датчика углового положения, величина которой оценивается на уровне 20 угловых минут, т.е. 0,04 мкм.

Существенной составляющей ошибки системы управления является ошибка датчика нулевого положения (ДНП), которая может составлять десятые доли миллиметра при учете только сигналов ДНП. Однако, при комплексировании сигналов ДНП и датчика углового положения, ошибка определения нулевого положения определится величиной .

Прочие ошибки. К прочим можно отнести ошибки, вызванные температурными, временными и деградиационными (под действием радиации) изменениями параметров электрорадиоизделий измерительной части системы управления линейным приводом.

Также могут проявляться ошибки, вызванные временной нестабильностью геометрических форм и размеров деталей линейного привода за счет изменения фазового и структурного состояния материала и релаксацией остаточных внутренних напряжений, возникающих в деталях в процессе различных технологических операций горячей и холодной обработки, при механосборочных операциях и в процессе длительного хранения, за счет микроползучести под действием внешних нагрузок. Линейный привод и его система управления построены на базе материалов и электрорадиоизделий прецизионного космического исполнения, изготовлены с соблюдением необходимых технологических требований, поэтому влиянием указанных эффектов в пределах срока активного существования изделия можно пренебречь.

Информация по результатам анализа литературы сведена в табл. 2, где представлены составляющие суммарной ошибки позиционирования штока линейного привода, оценка их максимальных значений, а также возможные методы их уменьшения.

Выводы

1. Систематизация и выделение наиболее существенных источников погрешности ЛП позволяют наметить пути повышения точности линейных приводов и гексапода на их основе.

2. Для прецизионной работы линейного привода необходимо: обеспечение предварительного натяга шариковинтовой передачи; обеспечение работы привода в допустимых диапазонах осевой нагрузки, частот вращения, ускорений, условий смазывания, температурных режимов, чистоты рабочей зоны; обеспечение качественной настройки регуляторов системы управления; соблюдение качественной технологии изготовления и сборки, использование высококачественных и надежных компонентов, а также выполнение программной компенсации некоторых типов ошибок.

Табл. 2. Составляющие суммарной ошибки позиционирования штока линейного привода

Составляющие суммарной ошибки позиционирования штока линейного привода	Оценка макс. значения	Возможный метод уменьшения ошибки
<i>Геометрические ошибки</i>		
Погрешности изготовления элементов и сборки ЛП	сотни мкм	Программная компенсация
Кинематическая погрешность редуктора и ШВП	десятки мкм	
Люфты в элементах линейного привода	десятки мкм	Предварительный натяг
Погрешности, возникающие из-за действия сил трения качения и скольжения	единицы мкм	Управление с обратной связью по угловому положению вала электродвигателя
Механический износ и пластические деформации элементов линейного привода	сотни мкм	Обеспечение работы привода в допустимых диапазонах осевой нагрузки, частот вращения, ускорений, условий смазывания, температурных режимов, а также чистоты рабочей зоны
<i>Температурные ошибки</i>		
Температурное изменение размеров элементов ЛП под действием факторов окружающей среды	сотни мкм	Программная компенсация
Температурное изменение размеров элементов ЛП при нагреве от трения	единицы мкм	
Температурное изменение размеров элементов ЛП при нагреве от электродвигателя	единицы мкм	
Погрешности определения нулевого положения штока линейного привода при изменении температуры	десятки мкм	
<i>Ошибки, вызванные механическими нагрузками</i>		
Упругая деформация элементов ЛП под действием сил инерции при их торможении или ускорении	десятки мкм	Ограничение динамики работы ЛП на программном уровне.
Упругая деформация элементов ЛП под действием статической нагрузки	десятки мкм	Программная компенсация
Взаимодействующие усилия (интерференция линейных приводов)	единицы мкм	
<i>Ошибки управления</i>		
Погрешности работы регулятора положения системы управления	доли мкм	Повышение качества работы регулятора на программном уровне
Погрешности обработки сигналов датчиков нулевого положения штока ЛП и углового положения вала электродвигателя	доли мкм	Повышение точности работы аппаратной части системы управления
<i>Прочие ошибки</i>		
Временная нестабильность геометрических размеров элементов ЛП	десятки мкм	Соблюдение технологии изготовления элементов
Погрешности работы электродвигателя из-за неравномерного расположения обмоток статора	единицы мкм	Программная компенсация
Погрешности работы датчика углового положения из-за неравномерного расположения обмоток статора	единицы мкм	
Временная и температурная нестабильность параметров аппаратной части системы управления	единицы мкм	Использование высококачественных и надежных компонентов

3. Погрешности изготовления элементов и сборки линейного привода устраняются после контрольного замера истинного перемещения штока, вычисления ошибки и внесения статической поправки в систему управления.

4. Для программной компенсации других типов ошибок и разработки алгоритма прецизионного управления линейным приводом требуется выполнить теоретические и экспериментальные исследования. Наибольший интерес при этом представляют следующие три группы ошибок:

- систематические ошибки механической части линейного привода, включающие погрешности редуктора, ШВП, электромеханической части (обмотки статора) двигателя и датчика;
- температурные ошибки, вызванные действием факторов окружающей среды, нагревом от трения и джоулева тепла;
- упругие деформации элементов ЛП под действием статической и динамической нагрузки.

Библиографический список

1. Матвеев С.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С., Жуков Ю.А., Киселев А.А. Прецизионное управление шестистепенным механизмом с параллельной кинематикой космического применения на основе компенсации кинематических и температурных ошибок // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 2. С. 12-20.
2. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. Управление высокоточной системой позиционирования и наведения космического применения на базе гексапода с "пространственным датчиком положения" // Экстремальная робототехника. 2017. Т. 1. № 1. С. 256-265.
3. Слободзян Н.С. Оценка точности разомкнутого линейного привода, достижимой методом калибровки и компенсации линейного теплового расширения // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 54-61.
4. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С., Яковенко Н.Г. Оценка решения задач кинематики в системе управления механизмом с параллельной кинематикой космического применения на базе гексапода // Оборонная техника. 2017. № 9. С. 29-37.
5. Mekid S., Ogedengbe T. A review of machine tool accuracy enhancement through error compensation in serial and parallel kinematic machines // International Journal of Precision Technology. 2010. Vol. 1. No. 3/4. P. 251-286.
6. Fu, R., Jin, Y., Yang, L., Sun, D., Murphy, A., Higgins, C. Review on structure-based errors of parallel kinematic machines in comparison with traditional NC machines. // Recent advances in intelligent manufacturing: communications in computer and information science. 2018. Vol. 923. P. 249-256.
7. Weck M. Staimer D. Parallel kinematic machine tools - current state and future potentials // Annals of the CIRP. 2002. Vol. 51. No. 2. P. 671-683.
8. Chanal II., Due E., Ray P., Hascoet, J.Y. A new approach for the geometrical calibration of parallel kinematics machines tools based on the machining of a dedicated part // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007. Vol. 47. No. 7-8. P. 1151-1163.

УДК 004.896:629.78.007

К ВОПРОСУ СОГЛАСОВАННОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ И ЗАДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ИНТЕРЕСАХ РЕАЛИЗАЦИИ КОЛЛАБОРАТИВНОГО ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ

Кикина А.Ю., Чеботарев Ю.С., Агаркова Ю.С.

*Научный руководитель: Дикарев В.А., д.т.н., профессор (начальник НИЛ)
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»*

Выполнение задач, направленных на обеспечение функционирования пилотируемых космических аппаратов, исследование космических тел (Луны, Марса, астероидов) на начальной стадии представляется возможным за счет использования главным образом робототехнических систем (РТС). При этом при рассмотрении функциональных возможностей различных типов РТС возникает предложение совместного использования РТС для повышения универсальности робототехнического комплекса, уменьшения времени на выполнение задач, минимизацию участия человека при выполнении внекорабельной деятельности (ВКД) в экстремальных условиях открытого космического пространства. Технологии взаимодействия человека с РТС отражены и успешно апробированы в таких космических экспериментах, как «Контур-2» [1], «Робонавт-2» [2], «Испытатель» [3], где использовались и антропоморфные, и манипуляционные роботы. Следует отметить, что в истории создания и использования РТС для использования в космосе отсутствует опыт, наработки коллаборативного [4-6] применения РТС различных типов.

Предполагаемая научная новизна космического эксперимента (КЭ) «Теледроид» [7] на борту Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) заключается, в том числе:

- в разработке и изготовлении первого отечественного антропоморфного робота (АР), предназначенного для эксплуатации в условиях открытого космического пространства;
- в результатах исследования возможностей и особенностей интерактивного копирующего управления роботом космонавтом-оператором в условиях невесомости при помощи костюма управления (экзоскелета) с силомоментной обратной связью и тактильным очувствлением.

При внекорабельной деятельности (ВКД) АР КЭ «Теледроид» может размещаться на универсальном рабочем месте на наружной поверхности модуля РС МКС. С учетом интеграции МЛМ «Наука» с РС МКС появляется возможность работы с целевыми грузами через его шлюзовую камеру с использованием роботизированного манипулятора (РМ) «European Robotic Arm» («ERA») (рис. 1) [8, 9], в том числе, и при реализации на РС МКС космических экспериментов по робототехнике.

Причем, применение РМ «ERA» в рамках КЭ «Теледроид» расширяет спектр исследования возможностей использования дистанционно-управляемого АР для операционной поддержки деятельности космонавтов в условиях орбитального полета. Эти исследования могут послужить научно-экспериментальным заделом по созданию технологии операционной поддержки ВКД космонавтов на борту орбитальной станции с помощью телеуправляемого АР совместно с РМ «ERA».

С появлением РМ «ERA» в составе РС МКС возникает возможность выполнения с его помощью задач по транспортировке АР КЭ «Теледроид» к месту размещения на универсальном рабочем месте на наружной поверхности модуля РС МКС. Эти задачи могут быть отработаны в рамках концепции коммуникационного объединения тренажера «Дон-ERA» [10] и гидролаборатории. В такой концепции задачи по транспортировке целевых грузов на поверхности модуля МКС отработывались и, как следствие этого, космонавты готовы к их выполнению во время ВКД на поверхности МКС.

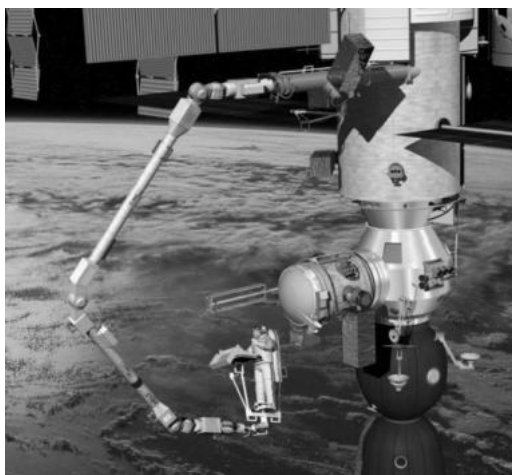


Рис. 1. Графическая модель роботизированного манипулятора «ERA»

Задача по перемещению РМ «ERA» закрепленного к нему АР КЭ «Теледроид» в зоне рабочего места выполнения космонавтом ВКД на наружной поверхности модуля РС МКС в рамках одновременного совместного применения «ERA» и АР не отработывалась. Для выполнения этой задачи необходимо специальное дополнительное устройство, к которому сможет крепиться и сопрягаться «ERA» и АР КЭ «Теледроид», а для ее отработки – расширение концепции коммуникационного объединения тренажёра «Дон-ERA» и гидролаборатории с возможностью интеграции с универсальным компьютерным стендом робототехнических систем (УКС РТС) ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» (рис. 2) [11].

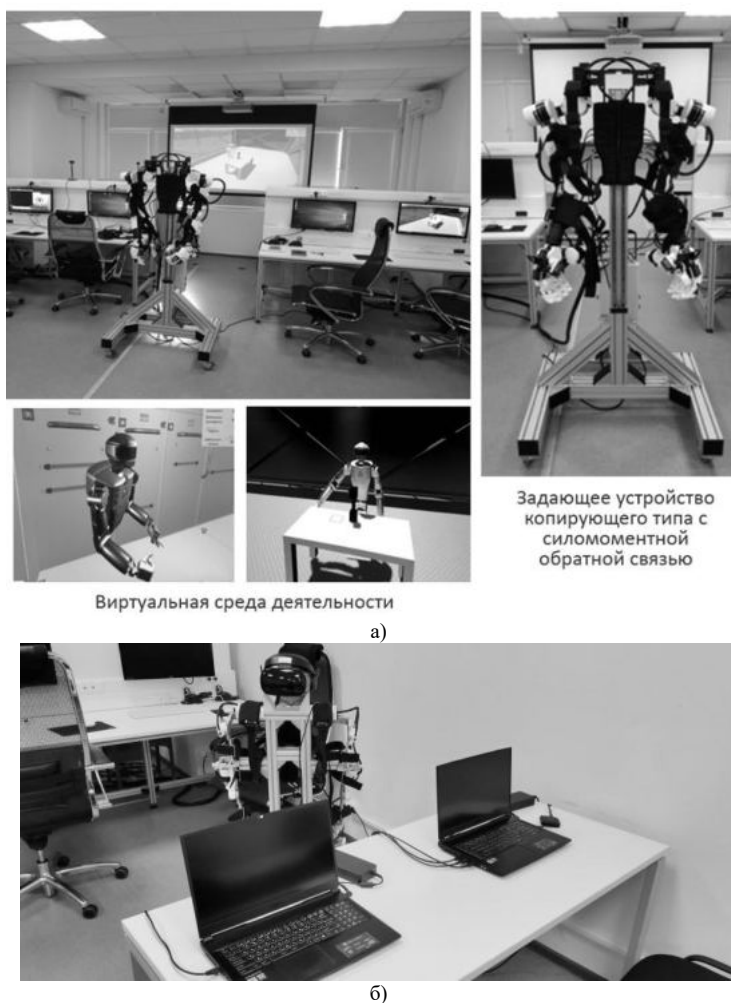


Рис. 2. Универсальный компьютерный стенд робототехнических систем: а) общий вид; б) мобильное автоматизированное рабочее место (АРМ-М) оператора

Необходимость совместного применения роботизированных манипуляторов и антропоморфных роботов обусловлена и тем, что в процессе выполнения космонавтами ВКД возможны ситуации, когда космонавты вынуждены выходить из рабочей зоны АР, и тогда требуется с помощью РМ производить коррекцию местоположения АР, позиционируя его в рабочую зону космонавта. Вопросы сопряжения АР КЭ «Теледроид» и РМ

для коллаборативного использования совмещенной конструкции ранее в явном виде не рассматривались. Следует учесть особенность конструкции РМ «ERA» – благодаря «сквозной» конструкции такелажного элемента (ТЭ), предназначенного для размещения на нем различного оборудования, РМ «ERA» может стыковаться к базовым точкам, расположенным на определенных участках внешней поверхности МКС вместе с ТЭ, обеспечивая тем самым электрическое и информационное взаимодействие собранной конструкции с бортовой вычислительной сетью МКС. При использовании задела в виде уже разработанного ТЭ, предлагается рассмотреть несколько вариантов компоновки РМ «ERA» и АР КЭ «Теледроид» с элементами специального дополнительного устройства для крепления и сопряжения АР КЭ «Теледроид» с РМ «ERA», как представлено на рис. 3.

В сложившихся условиях бортовая реализация задачи по перемещению АР КЭ «Теледроид» роботизированным манипулятором «ERA» в зоне рабочего места космонавта при выполнении ВКД на наружной поверхности модуля РС МКС нереализуема, а ее отработка на имеющихся технических средствах подготовки космонавтов невозможна. Однако, такая задача является перспективной в интересах обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с РТС, в частности, при совместном применении РМ и АР, в перспективных пилотируемых космических полётах (ППКП), в том числе, на новой российской орбитальной станции, и поэтому требует проведения предварительных исследований возможностей и особенностей ее реализации. Для ППКП востребованным способом управления антропоморфными робототехническими системами (АРТС) [3, 7], в которых в качестве исполнительных устройств (ИУ) используются АР, остается управление в «ручных режимах», реализуемое с помощью задающих устройств копирующего типа (ЗУКТ) посредством копирования действий космонавтов-операторов, облаченных в эти задающие устройства. Использование контура управления с задействованием ЗУКТ возможно применительно к агрессивной, опасной, связанной с рисками для здоровья и/или жизни человека среде. Дистанционное управление АР в копирующем режиме обеспечивает безопасное выполнение работы в условиях открытого космоса, с возможностью применения гибкого подхода к процессу выполнения полетных заданий (операций).

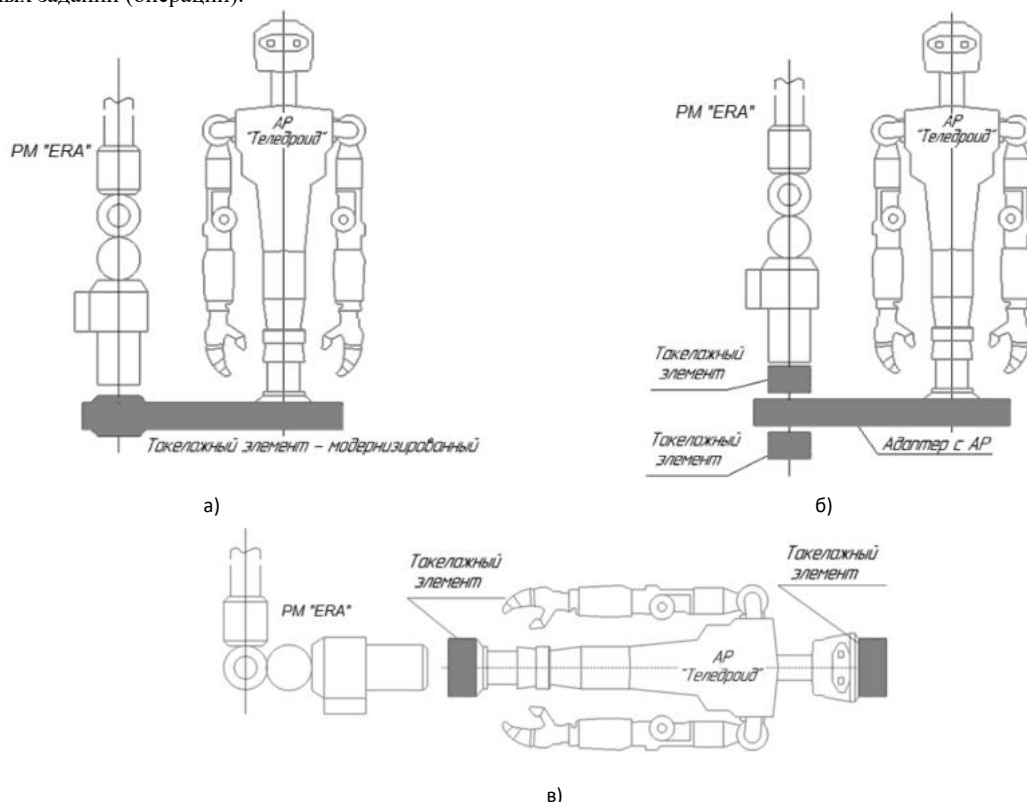


Рис. 3. Варианты компоновки стыковки РМ «ERA» к АР «Теледроид»: а) с помощью модернизированного такелажного элемента (новый элемент); б) с помощью двух такелажных элементов и адаптера АР (новый элемент); в) с помощью такелажных элементов, интегрированных в АР на стадии изготовления

Одной из проблем управления АР в копирующем режиме является обеспечение точности управления, достижение полного подобия между движениями космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ (рис. 4а), и кинематическими звеньями АР (рис. 4б), образцы которых, например, применяются в УКС РТС [11].

Причем, ранее УКС РТС с технологическим макетом АР был успешно использован ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина» в процессе наземной подготовки космонавтов к бортовой реализации космического эксперимента «Испытатель» [3]. Ввиду того, что при проведении экспериментальных исследований наблюдается рассогласованность движений космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ, и движений самого АР, «копирующий режим» может считаться условным, т.к. не обеспечивает полную адекватность копируемых АР движений. На данную рассогласованность оказывают влияние ошибки (перед началом работы – калибровки, в процессе работы – систематические, случайные, накапливаемые и т.п.), в частности, измерений датчиков углового положения шарниров кинематических звеньев ЗУКТ-М УКС РТС, (рис. 5, 6), используемых для управления двигателями АР, точностные характеристики двигателей, обрабатывающих пространственное изменение кинематических звеньев АР по параметрам измерений датчиков ЗУКТ-М, ошибки вычислений в контуре управления и т.д.

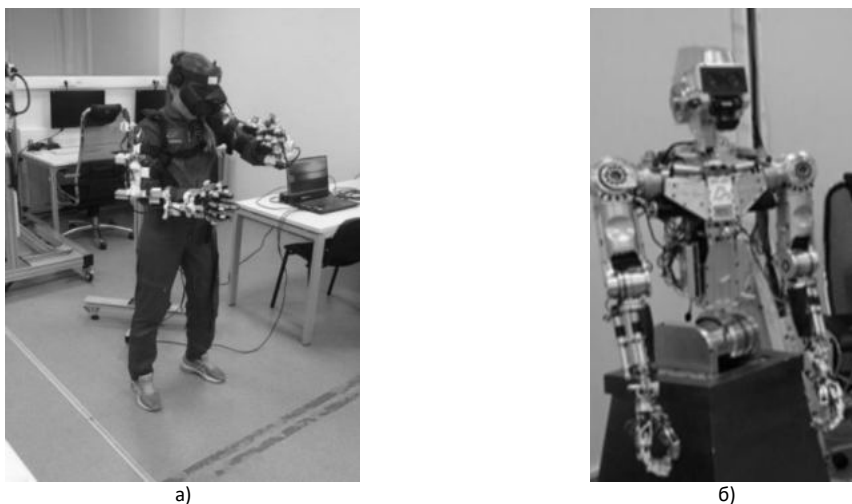


Рис. 4. Образцы применяемых в ЗУКТ и АР в УКС РТС: а) космонавт-испытатель, облаченный в мобильный ЗУКТ; б) технологический макет АР

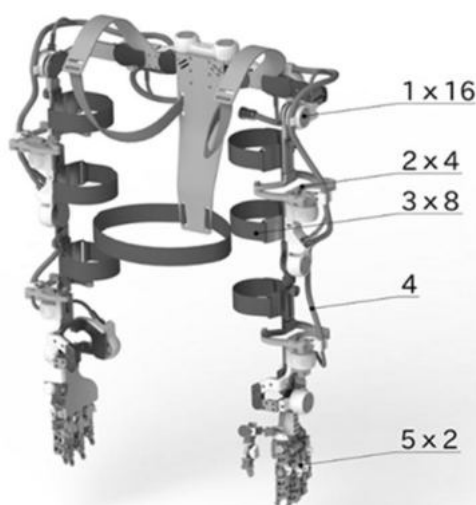


Рис. 5. Конструкция образца ЗУКТ-М УКС РТС: 1 – шарниры ЗУ рук оператора с датчиками углового положения; 2 – узлы ротации; 3 – ремни для фиксации ЗУКТ-М на операторе; 4 – кабель; 5 – перчатка ЗУКТ-М

Перчатка ЗУКТ-М (рис. 6) представляет собой исполнительную группу звеньев (ИГЗ), закреплённых опорными пластинами на перчатке. Датчики углового положения расположены на ИГЗ каждого пальца перчатки. Обратная тактильная связь в перчатке реализуется с помощью пяти вибродвигателей, закреплённых на перчатке в зоне дистальной фаланги каждого пальца.

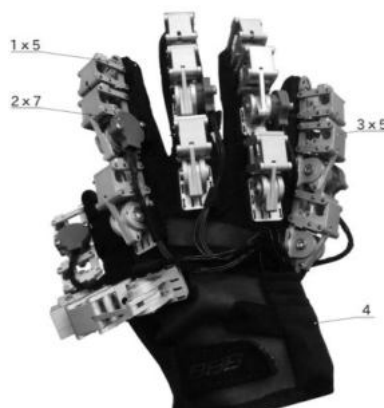


Рис. 6. Конструкция перчатки ЗУКТ-М: 1 – место расположения вибродатчиков; 2 – датчик углового положения; 3 – ИГЗ; 4 – основа перчатки

При проведении технического обслуживания УКС РТС и подготовки его к применению по назначению имеется возможность проверки с помощью программно-аппаратных средств [11] (рис. 7) текущего состояния калибровки углового положения универсального узла (рис. 8), который объединён с датчиком углового положения одним корпусом, присутствует на всех подвижных узлах ЗУКТ-М и обеспечивает поворот шарнира. Выявление рассогласованности углового положения универсальных узлов от соответствующих значений в таблице программного обеспечения указывает на гарантированное несоответствие управляющих движений с помощью ЗУКТ-М с движениями соответствующих звеньев АР.



Рис. 7. Виртуальная модель ЗУКТ с отражением значений углов поворота кинематических звеньев

Особое внимание следует обратить на то, что при удаленной работе оператора по управлению АР оценка точности управления и позиционирование кинематических звеньев АР, включая элементы ИУ (в частном случае схваты), осуществляется за счет технического зрения.

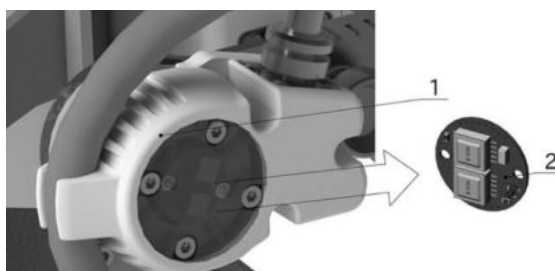


Рис. 8. Универсальный узел ЗУКТ: 1 – корпус универсального узла, 2 – датчик углового положения

Для этого совместно с ЗУКТ-М используется шлем виртуальной реальности (ШВР), который предназначен для передачи оператору ЗУКТ-М стереоизображения рабочей зоны АР. В АРМ-М модуль контроллера ЗУКТ-М, функционирующий в составе ШВР, осуществляет сбор данных об угловых положениях шарниров ЗУКТ-М с 32 датчиков углового положения ЗУКТ-М по двум интерфейсам SSI с дифференциальными линиями связи. Передача этих данных в ноутбук (рис. 9) осуществляется по интерфейсу USB2.0. Обратная тактильная связь в ЗУКТ-М реализуется с помощью вибродвигателей, установленных в перчатках, которые начинают воздействовать на пальцы рук оператора при манипулировании предметами АР или 3D-моделью АР.

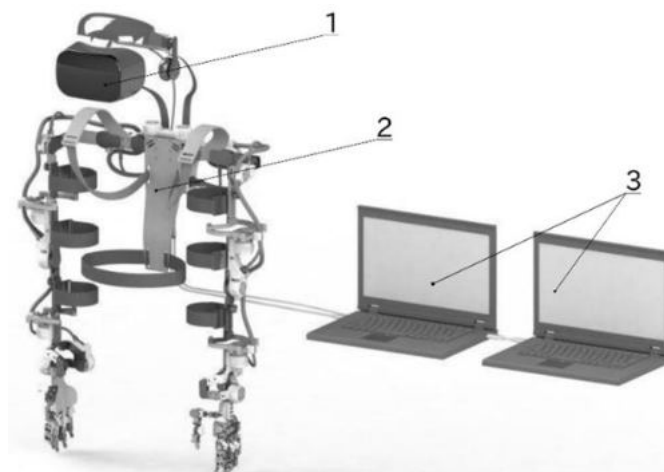


Рис. 9. Мобильное автоматизированное место: 1 – ШВР, 2 – ЗУКТ-М, 3 – ноутбуки

Сложность оценки точности управления и позиционирование кинематических звеньев АР заключается в том, что количество звеньев, линейные размеры, компоновка ЗУКТ с одной стороны, и управляемого АР с другой, как правило, отличаются. Если условно пренебречь этими возможными ошибками, то, безусловно, можно считать, что полная кинематическая адекватность копирующего режима может быть достигнута за счет достижения полного сходства количества кинематических звеньев и их линейных размеров АР с количеством кинематических звеньев и их линейных размеров ЗУКТ. Для достижения полной кинематической адекватности копирующего режима не представляется возможным подобрать космонавта-оператора с соответствующими задающему устройству антропоморфными параметрами. Для удобства облачения и работы космонавта-оператора в ЗУКТ-М предусмотрена возможность изменения линейных размеров некоторых кинематических звеньев задающего устройства под антропоморфные параметры конкретного космонавта-оператора (рис. 10).

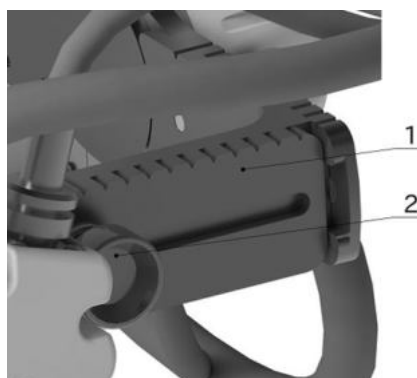


Рис. 10. Элементы для настройки длины звеньев: 1 – пластина с рисками, 2 – болт фиксации

В том числе, для этих целей предусмотрен узел ротации плеча и предплечья (рис. 11), выполненный в виде рычажного механизма с вынесенной осью поворота, что позволяет совместить ось ротации плеча/предплечья оператора и ЗУКТ-М.



Рис. 11. Узел ротации плеча и предплечья ЗУКТ-М

Изменения линейных размеров некоторых кинематических звеньев задающего устройства под антропоморфные параметры конкретного космонавта-оператора способствует ухудшению качества управления, и, как следствие, вызывает рассогласованность в действиях АР и космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ.

В целях избежания критической, приводящей к срыву выполнения заданий рассогласованности действий АР и космонавта-оператора, облаченного в ЗУКТ, требуется проведение предварительного сопоставления кинематических характеристик АР с соответствующими текущими кинематическими характеристиками ЗУКТ для определения параметров, демпфирующих потенциально возможные рассогласования. Это позволит обеспечить согласованность кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств АРТС под индивидуальные антропоморфные параметры космонавтов-операторов. Исследование и апробация механизмов по определению параметров, демпфирующих потенциально возможные рассогласования кинематических характеристик АР и ЗУКТ, планируется выполнять в ходе предварительного проектирования типовых полетных заданий (операций) ППКП [6] на УКС РТС [11].

Наличие таких апробированных механизмов позволит в процессе наземной подготовки основных и дублирующих экипажей к космическому эксперименту «Теледройд» [2] с использованием УКС РТС и летных образцов ЗУКТ, АР сформировать с учетом антропоморфных параметров космонавта, участвующего в этом эксперименте, «персональную базу данных», демпфирующую потенциально возможные рассогласования кинематических характеристик летных образцов, которую можно предварительно загрузить в ноутбуки МКС и тем самым обеспечить антропоморфную совместимость космонавтов с научной аппаратурой во время бортовой реализации космического эксперимента. Это сможет способствовать обеспечению некоторой чистоты экспериментальных данных, полученных в ходе проведения космического эксперимента «Теледройд», и достижению его планируемых результатов.

Библиографический список

1. Контур-2: эксперимент. – https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/kontur_2/ (дата обращения 07.02.2022).
2. Робонавт: эксперимент. – <https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/robonavt/> (дата обращения 07.02.2022).
3. Испытатель: эксперимент. – <https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/ispytatel/> (дата обращения 07.02.2022).
4. Дикарев В.А., Чеботарев Ю.С. К проектированию компонентов коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов. //Пленарные и избранные доклады Десятого Международного Аэрокосмического Конгресса «IAC'2021» (26-31 августа 2021 г.). – М.: РИА, 2021. – С. 253-258.
5. Чеботарев Ю.С., Дикарев В.А., Харламов М.М. Некоторые аспекты коллаборативного взаимодействия космонавтов с антропоморфными робототехническими системами для пилотируемых космических полетов. //XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2021): материалы XIV мультиконференции (Дивноморское, Геленджик, 27 сентября – 2 октября 2021 г.): в 4 т. /Южный федеральный университет [редкол.: И. А. Каляев, В. Г. Пешехонов и др.]. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2021. – Том 1. – С. 215-217.
6. Чеботарев Ю.С., Дикарев В.А. О некоторых направлениях обеспечения коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов. //Труды международной научно-технической

конференции «Экстремальная робототехника» (Proceedings of the International scientific and technological conference «Extreme robotics»). – 352 с. – 10.31776/ConfER.32.2021. – С. 65-77.

7. Теледройд: эксперимент. – <https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/teledroid/> (дата обращения 07.02.2022).

8. Белоножко П.П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор. /Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. – 2016. – № 12. – С. 110-153.

9. Начата интеграция 11-метровой роборуки ERA в состав МКС. – <https://3dnews.ru/1049695/nachata-integratsiya-robotizirovannoy-11-metrovoy-ruki-era-v-sostav-mks> (дата обращения 07.02.2022).

10. Специализированный тренажер «Дон-ERA». – <http://www.gctc.ru/main.php?id=2892> (дата обращения 07.02.2022).

11. Предпосылки и результаты модернизации универсального компьютерного стенда робототехнических систем / В.А. Дикарев, В.А. Довженко, Э.В. Никитов, Ю.С. Чеботарев // Пилотируемые полеты в космос. – №4 (41)/2021. – С 36-47.

УДК 661.961.62

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИРОПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПОДВИЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Матахин Д.А.¹ Шипов И.А.² Артемов В.В.¹

¹Ковровской Государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева,

²«АО «ВНИИ «Сигнал»

Имитационное моделирование является инструментом исследования поведения реальных систем. Методы имитационного моделирования позволяют собрать необходимую информацию о поведении системы путем создания ее компьютерной модели. Эта информация используется затем для проектирования системы.

Цель имитационного моделирования состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между ее элементами в предметной области для проведения различных экспериментов.

Имитационное моделирование позволяет имитировать поведение системы во времени. При этом временем в модели, как правило, можно управлять: замедлять в случае с быстропротекающими процессами и ускорять для моделирования систем с медленной изменчивостью. Можно имитировать поведение тех объектов, реальные эксперименты с которыми дороги, невозможны или опасны.

Имитационное моделирование может выполняться с использованием различных программ. В рамках данной статьи будет рассмотрен опыт использования библиотеки SimMechanics программы «MATLAB/Simulink». Совместное применение SimMechanics с SimHydraulics и Simulink для расчета энергетических, динамических, статических и других характеристик, как отдельных элементов, так и систем в целом, предназначены для изучения их функционирования в разных режимах. На рисунке 1 представлена трехмерная модель проектируемой платформы – шасси наземного подвижного объекта.

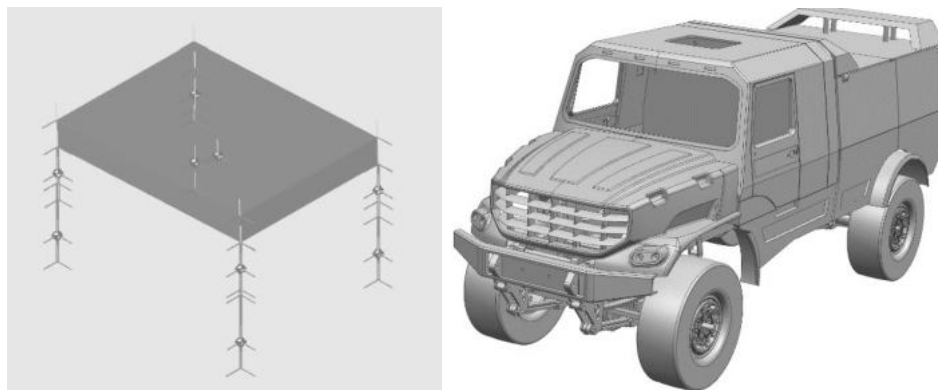


Рис.1. Трехмерная модель шасси

Гироскопическое устройство для пространственной стабилизации различных объектов или приборов. Предназначена для определения углов поворота основания, на котором установлена проектируемая платформа. Служит для стабилизации, удержания заданного курса подвижного объекта и для устранения влияния внешних воздействий, выводящих платформу из заданного положения.

Целью данной работы является описание метода проектирования гироскопической платформы для наземного подвижного объекта. Моделирование проводилось в программе Matlab с использованием библиотеки SimMechanics. Модель состоит из цепочек типа «шарнир-тело-шарнир-тело и т.д. Модель состоит из одной цепочки элементов, что значительно упрощает моделирование. Проектируемая модель состоит из многих цепочек, таких как амортизатор, шарнир, платформа [1]. Для моделирования четырехколесного шасси, требуются такие элементы, как вертикальные стойки, входящие в состав сочленения с платформой, и различные типы шарниров, представленные на рисунке 2.



Рис.2. Вариант модели шарнира

Для построения модели платформы используются блоки Body (тело), Ground (земля) и Machine Environment (машинная среда) [3]. Выбранные блоки располагаются в подразделе библиотеки SimMechanics. В случае замены

составных частей системы на развернутую полномасштабную модель существенно увеличится время проектирования и повысится вероятность ошибок. Упрощенная модель 4-х колёсного подвижного объекта представлен на рисунке 3.

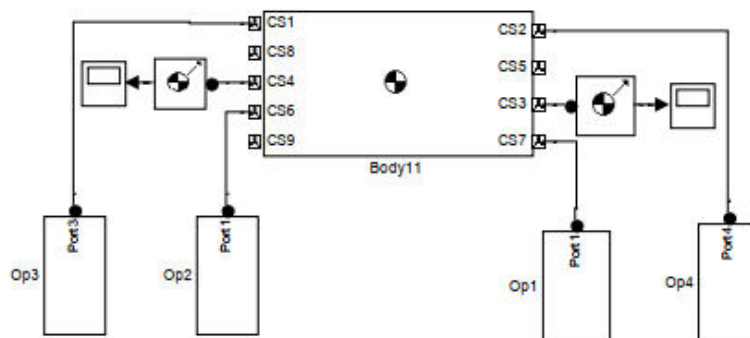


Рис.3. Упрощенная модель шасси автомобиля

На изображенной модели можно наблюдать такие блоки, как:

- Score (масштаб), данный блок визуализирует все манипуляции при моделировании, а именно: графики перемещения, отклонения объекта от нормальных параметров.

- Body (тело), позволяет визуализировать твердое жесткое тело, как отдельное звено механизма, движения которого моделируется с определенными параметрами, параметры, задающие блоком представлены на рисунке 4.

<input checked="" type="checkbox"/>	Left	CG	[0 0 0]	m	World	World
<input checked="" type="checkbox"/>	Left	CS1	[0 0 0]	m	World	World
<input checked="" type="checkbox"/>	Left	CS2	[1 0 0]	m	World	World
<input checked="" type="checkbox"/>	Left	CS3	[1 0.5 0]	m	World	World
<input checked="" type="checkbox"/>	Left	CS4	[1 0.5 0.5]	m	World	World

Рис.4. Параметры, контролируемые блоком Body (тело)

Op (операция), блоки непосредственно выступают в роли шасси. Упрощенная модель шасси автомобиля не отображает всех параметров системы, но способствует оптимизации времени выполнения работы, а также снижения вероятности ошибки в проектировании. На рисунке 5 представлена полномасштабная модель шасси подвижного объекта, где более детально отображаются все составные части, а именно положение демпферов, координат подвижного объекта для корректировки движения и визуального отображения отработки амортизации по неровной плоскости [2].

Работа блоков, входящих в состав подвижного объекта, осуществляется с помощью раздела Joints (стыки) куда входят блоки Prismatic (призматический) и Revolute (улучшение). Блок Prismatic (призматический) обеспечивает одну поступательную степень свободы тела Follower (последователь) относительно тела Base (основание). Ось, вдоль которой может при этом двигаться тело-последователь, должна быть указана на вкладке Axes (оси) окна настройки блока в виде вектора [X Y Z]. Блок Revolute обеспечивает одну вращательную степень свободы тела, следующего за блоком Revolute вокруг оси, заданной на вкладке Axes окна настройки блока в виде вектора [X Y Z], аналогично блоку Prismatic.

Для измерения относительных движений тел при моделировании машин и механизмов, а также сообщения звеньям механизмов относительного движения, недостаточно блоков тел из раздела Bodies (тела) и блоков шарниров из раздела Joints (стыки). Данные блоки описывают только структуру механизма, но не сообщают ему никаких движений. Следовательно, необходимо подключение к данным блокам моделирующих воздействий, снимающих показания преобразующих сигналов Simulink в сигнал SimMechanics и обратно.

В качестве параметров блока выступает поле выбора системы координат, в котором задается воздействие:

- простановки флажков для выбора приложения усилия или момента Apply force (применить силу), Apply torque (применить момент силы);

- единицы измерения усилия/момента.

Само значение компонент-вектора усилия (и/или момента) должно подаваться в виде векторного сигнала (вида [X; Y; Z] для усилия).

Блок Body Sensor (датчик тела) позволяет в общем случае измерить следующие характеристики движения точки тела, к порту которой он присоединен:

- координаты (Position) [X; Y; Z] - вектор текущих значений абсолютных координат точки тела;

- скорость (Velocity) [X'; Y'; Z'] - вектор проекций абсолютной скорости точки тела;

- угловую скорость (Angular velocity) [OX'; OY'; OZ'] - вектор проекций абсолютной угловой скорости тела;

- [3x3] Rotation matrix (матрица поворота) - матрицу направляющих синусов углового положения тела;

- ускорение (Acceleration) [X"; Y"; Z"] - вектор проекций абсолютного ускорения точки тела;

- угловое ускорение (Angular acceleration) [OX"; OY"; OZ"] – вектор проекций абсолютного углового ускорения тела. Выбор измеряемых параметров осуществляется простановкой флажков в соответствующих полях окна настройки блока «Body 11», представленного на рисунке 5.

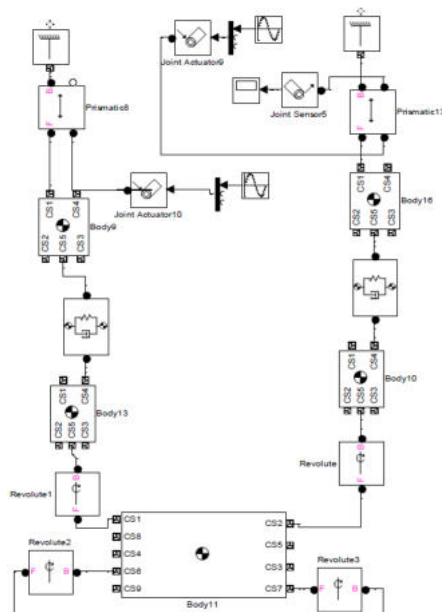


Рис.5. Часть полномасштабной модели четырех колесного шасси

На рисунке 5 представлена часть модели четырехколесного шасси, спроектированной в программе Matlab Simulink. Главный блок Body отвечает в модели за подбор коэффициентов положения тела в пространстве, в нем можно менять положения добиваясь адекватного ответа системы на возмущающие воздействия. Отходящий по разветвлению блок Revolute - блок шарнира, имеющего четыре степени свободы три вращательные и одну поступательную именно. Он влияет на изменение координат тела в пространстве или в данном случае на плоскости. Блок Prismatic - блок поступательного шарнира, имеющего одну степень свободы - перемещение вдоль заданной оси координат, в проектируемой модели выступает в роли демпфера (амортизатора). Блок Joint Sensor - виртуальный датчик шарнира, выходными сигналами которого являются величины линейного или углового перемещения, скорость или ускорение для примитива (отдельной степени свободы) шарнира. Блоки данного типа использовались в Simulink-модели для определения усилий и моментов, описывающих упруго-вязкие тела. Блок Ground - представляющий собой стойку, т. е. тело, связанное с неподвижной инерциальной системой координат. Итак, на данном этапе спроектирована стойка в сочленении с твердым телом (платформой). На рисунке 6 представлены графики отработки подвески на подвижном объекте, данные графики были получены по запуску модели и запуску окна Scope. Входные сигналы, имитирующие рельеф поверхности под колесами, четыре синусных характеристик разной частоты и амплитуды.

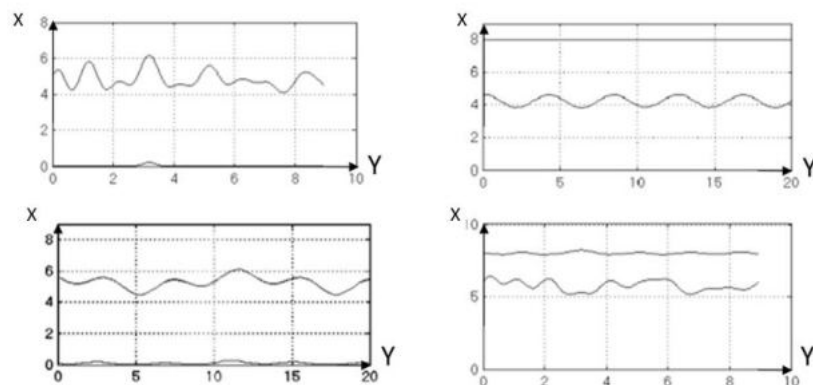


Рис.6. Графики перемещений точек сочленения опор с «телом» шасси.

Подводя итоги проведенного моделирования платформы, можно сделать вывод о том, что предложенный метод позволяет увидеть недочеты в подвеске наземного подвижного объекта. Полученные графики позволяют визуализировать работу амортизирующих и демпфирующих элементов конструкции подвижного объекта во время движения по неровной поверхности.

Предложенный метод позволяет:

- задавать и корректировать показатели движения автомобиля, то есть положение координат в пространстве «крен», «тангаж» и «курс»;
- стабилизировать положение приборов и систем, имеющих на борту подвижного объекта.
- снизить вибрацию приборов навигации и чувствительных элементов, находящихся на борту кузова подвижного объекта;

Но не смотря на многие положительные стороны предложенный метод требует от разработчика большого времени работы и высокой квалификации для построения более масштабных и сложных моделей.

Библиографический список

1. Даршт Я.А. Имитационное моделирование элементов гидропривода [Текст] / Я.А. Даршт. – Ковров: КГТА, 2009. – 88с.
2. Даршт, Я.А. Моделирование и модельные исследования элементов гидропривода [Текст]: методические указания к практическим работам по имитационному моделированию / Я.А. Даршт, Д.Н. Горячев. - Ковров: КГТА, 2010. – 36с.

УДК 007.52

МОБИЛЬНЫЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ

А. А. Хачатрян

Волгоградский государственный технический университет

В работе представлен обзор существующих робототехнических систем, предназначенных для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям, проанализированы их основные недостатки и преимущества, предложена робототехническая система, исключающая выявленные недостатки.

Введение

Важной и актуальной является проблема передвижения робототехнических систем по произвольно ориентированным поверхностям, такие аппараты могли бы выполнять целый ряд работ, который в настоящее время приходится выполнять человеку. Это не только очистка различных труднодоступных поверхностей, в том числе стен, потолков, окон, но и исследование крупногабаритных сооружений на наличие трещин и иных конструктивных дефектов.

Под произвольно ориентированной поверхностью понимается ровная поверхность, расположенная под углом от 0 ° до 90 ° к горизонту, включая и потолочную поверхность.

Роботы произвольно направленного перемещения, т.е. перемещения по произвольно ориентированным поверхностям, предназначены для выполнения различных технологических операций на поверхностях фасадов зданий, корпусов судов, самолетов, различных емкостей и т.п.

Выполнение таких операций может быть опасным для людей, особенно в экстремальных условиях, часто исключающих их присутствие, например, после аварий, результатом которых может быть повышенный уровень температур и наличие различных, вредных для здоровья людей факторов [1, 2].

Классификация робототехнических средств произвольно направленного перемещения

Все системы приводов технологических роботов вертикального перемещения можно классифицировать по принципу фиксации на поверхности перемещения, по функциональным возможностям, по виду обслуживаемого технологического объекта и по виду движения следующим образом [3]:

- по принципу фиксации на поверхности перемещения: вакуумные (эжекторные, с вакуумным насосом, вентиляторные), магнитные (электромагнитные, с постоянными магнитами), реактивные, механические (на трении, на промежуточной фиксирующей среде);
- по функциональным возможностям: универсальные, специализированные;
- по виду обслуживаемого технологического объекта: для плоских поверхностей, для изогнутых поверхностей, для труб, для перехода с одной поверхности на другую;
- по виду движителей: продольно-шаговые, колесно-гусеничные, циркульные.

Наиболее универсальными и компактными системами перемещения по принципу фиксации на поверхности являются вакуумные эжекторные системы, которые наиболее распространены на практике. Однако их существенным недостатком является проблема поддержания необходимого разрежения и значительное снижение вакуумных свойств устройств фиксации робота на перфорированных, пористых, неровных и грязных поверхностях.

Магнитные системы могут использоваться только для ферромагнитных поверхностей и чувствительны к степени их загрязнения [4].

Магнитные робототехнические средства произвольно направленного перемещения

Потолочный робот BIREM (Bridge Inspection Robot Equipping Magnets) способен передвигаться по стенам и потолку. Однако, поверхность должна быть металлической.

Роботизированный аппарат под названием BIREM (рисунок 1), управляемый дистанционно, предназначен для исследования мостов на предмет трещин и коррозии. Робот оснащён камерой, перемещается при помощи четырёх колесообразных движителей, на спицах которых расположены постоянные магниты (8 спиц на один движитель).

Скорость движения составляет примерно 0,2-0,15 м/с (в зависимости от поверхности). Масса робота составляет около 660 г, а его габариты — 340 x 160 x 114-124 мм [5,6].

Основными преимуществами этого робота является отсутствие необходимости затрат энергии на удержание робота на поверхности в процессе передвижения по ней. Не произойдет потеря устойчивости робота на поверхности в случае отключения питания, также постоянные магниты подходят для применения во взрывоопасных средах [7].

По железистым поверхностям можно передвигаться с помощью электромагнитных эффекторов [8,9]. Примером использования которых является робот Vertidrive M7 series (рисунок 2) предназначенный для подготовки стальных поверхностей. Робот обладает дистанционным беспроводным управлением одним оператором. Быстро и эффективно удаляет промышленные покрытия, ржавчину и обрастания морскими организмами.

Главным недостатком магнитных робототехнических систем вертикального перемещения является то, что поверхности, по которым они перемещаются обязательно должны быть ферромагнитными. Это условие ограничивает сферы применения таких систем, исключая возможности перемещения по бетонным стенам зданий.

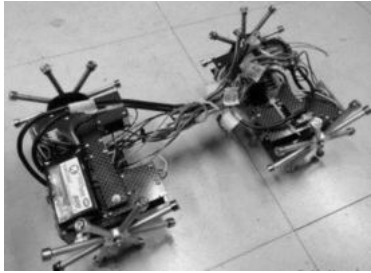


Рисунок 1 – Роботизированный аппарат BIREM



Рисунок 2 – Робот Vertidrive M7 series

Робототехнические системы, перемещающиеся по произвольно ориентированным поверхностям с помощью специальных приспособлений

Для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям применяются роботы Mini-Whegs, стратегия передвижения которых сочетает в себе одновременно колесо и стопу для преодоления препятствий. Whegs (колеса-опоры) являются механизмами для передвижения робота.

В зависимости от характера поверхности колесные опоры оснащаются адгезивными материалами: клей, чувствительный к давлению – для преодоления стеклянных стен и потолков, сухие адгезивные материалы – для гладких, чистых стен; либо крючками, шипами – для текстильных поверхностей и шероховатых поверхностей с углом наклона не более 60° соответственно (рисунок 3) [10].

На рисунке 4 показан робот, перемещающийся по наклонной поверхности из пенополистирола. Этот материал достаточно мягкий, чтобы шипы оставляли в нем небольшие отверстия, удерживая таким образом робот на поверхности. Длина тела робота во время испытаний на восхождении составляет 19,5 см с учетом хвоста, длиной 10 см, уменьшающего склонность робота к опрокидыванию.

Достоинствами роботов, оснащенных шипами для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям являются: надежное перемещение по пористым и мягким поверхностям под углом до 60° .

Главными недостатками применения таких систем являются: требования к структуре и твердости материалов поверхности; критический угол перемещения таких систем 60° ; отсутствие возможности перемещения по потолочным поверхностям; возможность заклинивания шипов в поверхности; небольшая средняя скорость перемещения порядка 32 м/ч.

На рисунке 5 показан процесс перемещения робота Mini-Whegs по вертикальной поверхности, обтянутой тканью. Чтобы зацепиться за ткань, крючкам на липучке требуется небольшое давление, однако также требуются усилия, чтобы отсоединиться от поверхности после каждого шага. Самое длинное перемещение этого робота составило 127 см, после чего крючки запутались в петлях ткани, остановив робота. Однако липучки удержали робота на поверхности, не позволив ему упасть. Средняя скорость подъема на представленном эксперименте составила 2,5 см/сек [11].

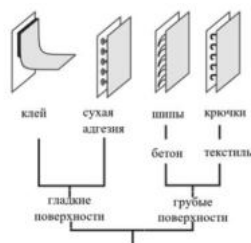


Рисунок 3 – Различные механизмы крепления робота Mini-Whegs в зависимости от характера преодолеваемой поверхности



Рисунок 4 – Робот перемещающийся по пенополистиролу



Рисунок 5 – Робот с липучкой на колесных опорах, взбирающийся по вертикальной тканевой поверхности

Модифицированный Mini-Whegs, используя скотч в качестве клея для ног, выполняет задачу перемещения по вертикальным и потолочным поверхностям до тех пор, пока его ноги не будут загрязнены (рисунок 6). Прикрепление и отрыв скотча от поверхности происходит способом, подобным тому, который используют насекомые карабкающиеся по стенам.

В то время как скотч в конечном итоге теряет свою адгезивность, особенно после пересечения поверхностей, отличных от стекла, структурированный биоинспирированный полимер может прослужить по меньшей мере в два раза дольше [12]. Робот может подниматься по вертикальным поверхностям с помощью этого структурированного материала, адгезионная способность которого может быть восстановлена очисткой водой (рисунок 7).

Главным недостатком робототехнических систем, использующих адгезию для перемещения является малая долговечность адгезивных материалов, особенно, на загрязненных и неровных поверхностях. На пористых и рифленых поверхностях уменьшается грузоподъемность робота в связи с уменьшением площади контакта клейкого материала с поверхностью.

Наибольшей эффективности такие роботизированные системы достигают в лабораторных условиях, на гладких и чистых поверхностях.

Существуют роботизированные системы, использующие захваты для перемещения [13]. Робот с плечевым движителем перемещающийся от перекладины к перекладине как обезьяна, размахивающая руками показан на рисунке 8 [14]. Упрощенная двухзвенная модель с одним приводом в локте, соединяющим два плеча, каждое из которых имеет захват. Ограниченность области его применения, связанная с необходимостью наличия перекладин для успешного перемещения, является главным недостатком данного робота.



Рисунок 6 – Переход робота Mini-Wheegs от стекла к пластмассе



Рисунок – 7. Перемещение по стеклу (пленка Гекко нанопласт)

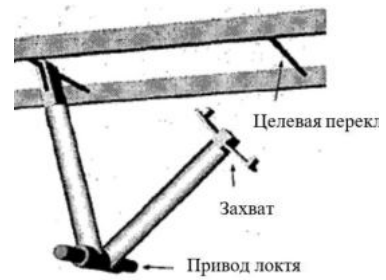


Рис. 8. Двухзвенный робот Брахиатор

Находя случайно расположенные опоры для скалолазания, LEMUR II может автономно подниматься в почти вертикальных условиях [15]. Роботы семейства «LEMUR» разработаны NASA и предназначены для работы не только на Земле, но и в космическом пространстве. Они способны взбираться на скалы и гористые местности, при этом выполняя технологические операции. Некоторые из них (рисунок 9) снабжены специальными захватами, позволяющими удерживаться на наклонной поверхности, а некоторые снабжены тончайшими шипами (рисунок 10), способными цепляться за шероховатости скалистых поверхностей, как и для одного из механизмов крепления роботов Mini-Wheegs. Недостатком данных роботизированных систем являются такие требования как наличие выступов и большая шероховатость, для возможности использования шипов. Однако, и при выполнении этих требований эти роботы не способны преодолевать вертикальные и потолочные поверхности.

IceWorm, разработанный компанией NASA (рисунок 11), способен перемещаться по ледовым поверхностям. Он ставит ноги на поверхность вкручивая и откручивая винты на ногах так, чтобы по крайней мере один винт всегда был закреплен во льду. При этом контролируется сила нажатия и момент кручения на винте для понимания структуры льда и робот перемещается в выбранном направлении. Главным недостатком такого способа перемещения является ограниченность поверхностей, на которых такие системы будут работоспособны. Например, с мягких, пористых поверхностей робот сорвется, а на бетонных и каменных поверхностях винты будут неработоспособны.



Рисунок 9 – Робот «LEMUR» с захватами

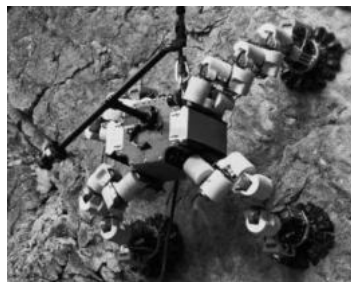


Рисунок 10 – Робот «LEMUR» с шипами



Рисунок 11 – Робот IceWorm

Робот SpinybotII (рисунок 12) преодолевает наружные стены зданий со скоростью 3 см/сек (0,04 длины тела в секунду), демонстрируя, что для некоторых реальных поверхностей отлитые в форму массивы миниатюрных шипов обеспечивают достаточные тангенциальные и нормальные силы для поддержки робота. Подобно насекомому, ножки прикрепляются к поверхности во время перемещения параллельно ей [16]. Используя аналогичные шипы на независимых ногах с несколькими степенями свободы, робот RiSE (рисунок 13) может даже взбираться по стволу дерева [17]. Однако, область применения данных роботов ограничена вертикальными поверхностями.

В Стэнфордском университете разработан StickyBot (рисунок 14), использующий анизотропное молекулярное притяжение, чтобы "прилипнуть" к поверхностям для перемещения по ним. К достоинствам данного робота можно отнести то, что Stickybot использует преимущества направленного сцепления, которое позволяет ему плавно зацепляться и отрываться от поверхности, контролируя тангенциальную силу. Недостатком данного робота является недолговечность и хрупкость клеевых материалов, что отражается на длительности его непрерывной работоспособности [18].



Рисунок 12 – Робот SpinybotII



Рисунок 13 – Робот RiSE



Рисунок 14 – Робот StickyBot

Вакуумные робототехнические средства произвольно направленного перемещения

Робот вертикального перемещения (рисунок 15) предназначенных для выполнения работ в экстремальных средах является робот [19]. Для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям он использует вакуумные присоски.

На рисунке 16 показан мобильный робот способный передвигаться по поверхностям со сложным рельефом, переходить с одной поверхности на другую (например, со стены на потолок), преодолевать препятствия и разрывы на поверхности перемещения при помощи стоп с вакуумными захватами.

Существенным недостатком вакуумных систем является их громоздкость, а скорость робота ограничена скоростью, с которой могут быть применены присоски.



Рисунок 15 – Робот вертикального перемещения

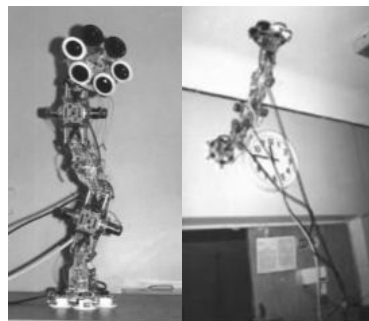


Рисунок 16 – Многозвонный мобильный робот

Робототехнические системы параллельной структуры для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям

Для решения задачи произвольно направленного перемещения робота предлагается использовать внешнюю опору для поддержания робота на соответствующих поверхностях. В качестве опоры предлагается использовать механизм параллельной структуры, имеющий шесть степеней свободы (рисунок 17). Примером такого механизма служит робот-трипод, разработки которого ведутся в Волгоградском государственном аграрном и техническом университете [20].

Механизмы параллельной структуры состоят из нескольких кинематических цепей, соединяющих выходное звено с основанием. Они обладают следующими преимуществами по сравнению с манипуляционными системами консольного типа:

- большая грузоподъемность;
- высокая точность позиционирования рабочего органа;
- снижение динамических нагрузок и повышение скоростей движения рабочего органа манипулятора вследствие установки двигателя на основании или наиболее близко к нему.

Основным недостатком механизмов параллельной структуры является ограниченность рабочей зоны [21].

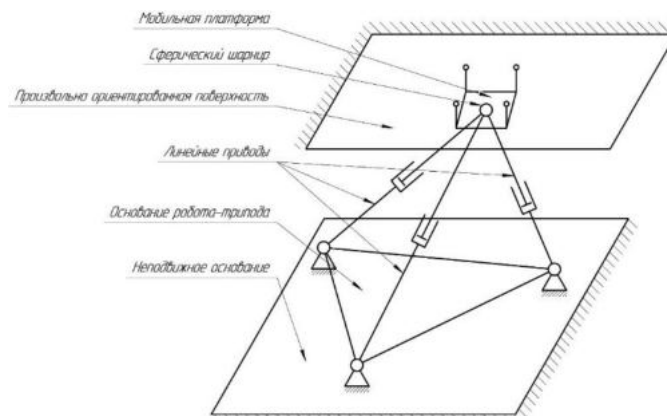


Рисунок 17 – Предлагаемая схема роботизированной платформы

Выводы

Проанализированы существующие робототехнические средства для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям. Выявлены основные ограничения их применения:

- 1) по виду поверхности:
 - ферромагнитные для магнитных роботов;
 - ровные не пористые поверхности без перфораций для роботов с вакуумными присосками;
 - шероховатые поверхности для использования крючков и шипов при передвижении робота;
 - чистые и гладкие поверхности для робот используя адгезию;
- 2) по ориентации поверхности: шипы и крючки не могут применяться на потолочных поверхностях;
- 3) по долговечности адгезионных материалов, связанные с их загрязнением и быстрым износом.

Предложена конструкция робототехнической системы, исключая выявленные ограничения существующих роботов.

Библиографический список

1. Градецкий, В. Г. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков // Экстремальная робототехника. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 24-38.
2. Градецкий, В.Г. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред / В.Г.Градецкий, М.М.Князьков // Робототехника и техническая кибернетика. - 2014. - № 1 (2). - С. 9-16.
3. Градецкий Валерий Георгиевич, Рачков Михаил Юрьевич, Роботы вертикального перемещения, М.: Тип. Мин. Образования РФ, 1997, 223 с.
4. Побегайлов, О. А. Мобильные роботы вертикального перемещения / О. А. Побегайлов, И. В. Кравченко, С. О. Кожуховский // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 4(14). – С. 85-95.
5. Development of a Bridge Inspection Robot Capable of Traveling on Splicing Parts . Yogo Takada, Satoshi Ito and Naoto Imajo. Department of Mechanical and Physical Engineering, Osaka City University, Japan; Received: 21 July 2017; Accepted: 23 August 2017; Published: 26 August 2017.
6. Development of Magnetic Bridge Inspection Robot Aimed at Carrying Heavy Loads. Yogo Takada, Department of Mechanical and Physical Engineering, Osaka City. University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka, 558-8585, Japan. Accepted: September 18, 2018; Published: September 20, 2018.
7. Silva, Manuel & Tenreiro Machado, José & Tar, József. (2008). A Survey of Technologies for Climbing Robots Adhesion to Surfaces. ICCS 2008 - IEEE 6th International Conference on Computational Cybernetics, Proceedings. 127 - 132. 10.1109/ICCCYB.2008.4721392.
8. Guo L., Rogers K., and Kirkham R., “A Climbing Robot with Continuous Motion,” Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA '94), 1994.
9. Grieco J.C., Prieto M., Armada M., de Santos P.G., “A six-legged climbing robot for high payloads,” Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications, Trieste, Italy 1-4 September 1998, pp. 446-450.
10. «Mini-Whigs Climbs Steep Surfaces Using Insect-Inspired Attachment Mechanisms» Kathryn A. Daltorio, Terence E. Wei, Andrew D. Horschler, Lori Southard, Gregory D. Wile, Stanislav N. Gorb, Roy E. Ritzmann, Roger D. Quinn.
11. Comparing Cockroach and Whigs Robot Body Motions Robert T. Schroer, Matthew J. Boggess, Richard J. Bachmann, Roger D. Quinn1 , Roy E. Ritzmann Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, U.S.A.
12. Gorb S., Varenberg M., Peressadko A. and Tuma J.. “Biomimetic mushroom-shaped fibrillary adhesive microstructure.” J. R. Soc. Interface (2006). p. 1–6.
13. Кваша, Ю. С. О влиянии геометрических параметров заклинивающе-поворотных движителей мобильных роботов на допустимое распорное усилие / Ю. С. Кваша, М. О. Скобелев // Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2017) : материалы конференции, Москва, 06–08 декабря 2017 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2018. – С. 294-297.
14. Nakanishi, J., Fukuda, T. and Koditschek, D. E., “Preliminary Studies of a Second Generation Brachiation Robot Controller Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA (1997) pp. 2050.
15. Bretl T., Rock S., Latombe J. C., Kennedy B., and Aghazarian H., “Free-Climbing with a Multi-Use Robot,” Proc. Int. Symp. on Experimental Robotics (ISER), Singapore, 2004.
16. Kim, Sangbae & Asbeck, Alan & Cutkosky, Mark & Provancher, W.R.. (2005). SpinybotII: Climbing Hard Walls With Compliant Microspines. Proc ICAR05. 601 - 606. 10.1109/ICAR.2005.1507470.
17. Autumn K., Buehler M., Cutkosky M., Fearing R., Full R.J., Goldman D., Groff R., Provancher W., Rizzi A.A., Sarali U., Saunders A., and Koditschek D.E., “Robotics in Scansorial Environments,” Proc. of SPIE, Vol. 5804, p. 291–302. 2006.
18. Smooth Vertical Surface Climbing with Directional Adhesion Sangbae Kim, Matthew Spenko, Salomon Trujillo, Barrett Heuneman, Daniel Santos, Mark R. Cutkosky Center for Design Research Stanford University Stanford, CA 94305-2232, USA.
19. В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов Разработка алгоритмов управления робота вертикального перемещения.
20. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – № 8. – С. 525-530. – DOI 10.17587/mau.17.525-530.
21. Глазунов В.А., Алешин А.К., Шалюхин К.А., Рашоян Г.В., Антонов А.В., Попов А.М., Юдкин В.Ф. Синтез и анализ роботов параллельной структуры для работы в экстремальных средах // Экстремальная робототехника. 2017. № 1. С. 52-59.

УДК 681.52

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РАЗЛИЧНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ БАЛАНСИРУЮЩЕГО РОБОТА

А.Ю. Бойко, Н.А. Корнеев, В.О. Гончаров, В.И. Зинченко
Научный руководитель – ст. преподаватель Слободзян Н.С.

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

В настоящее время интерес к балансирующим роботам возрос из-за их высокой маневренности, что является преимуществом в сложно проходимой местности [1]. Самым известным примером такой машины является робот Segway от компании Ninebot (рисунок 1), который предназначен для транспортировки людей. Управляющим воздействием является наклон тела водителя: когда положение его корпуса меняется, срабатывает система индикаторной стабилизации: сигналы с датчиков (гироскопических и жидкостных) поступают в микропроцессор и машина начинает автоматически балансироваться. Также угол наклона тела влияет на скорость сегвея, а направление наклона – на направление движения [2].

Другим примером балансирующего робота является робот Handle от компании Boston Dynamics. Это двухколесная машина, оснащенная манипулятором для выполнения грузовых работ. У робота с двумя колесами не возникает трудностей с передвижением по пересеченной местности. Для удержания баланса двухметровому роботу приходится приседать. Также нужно отметить, что первая версия (рисунок 2 (а)) была оснащена гуманоидными руками на гидравлических приводах. Вторая же версия (рисунок 2 (б)) получила манипулятор с вакуумными присосками, что повысило ловкость робота, но уменьшила его грузоподъемность до 15 кг [3].



Рисунок 1 – Segway.

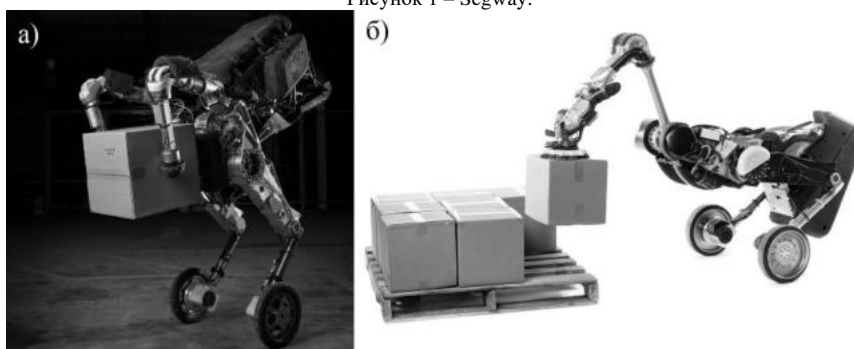


Рисунок 2 – Handle: первая версия (а), вторая версия (б).

Управление балансирующим роботом является довольно непростой задачей, так как устройство является неустойчивой нелинейной системой [4]. В рамках проекта было решено разработать систему управления балансирующим роботом, в которой должна быть предусмотрена возможность беспроводной связи с задающим устройством, что позволяет относительно легко конфигурировать систему и отлаживать различные регуляторы, такие как векторный с ручным подбором коэффициентов, LQR, регулятор на основе нечеткой логики и другие.

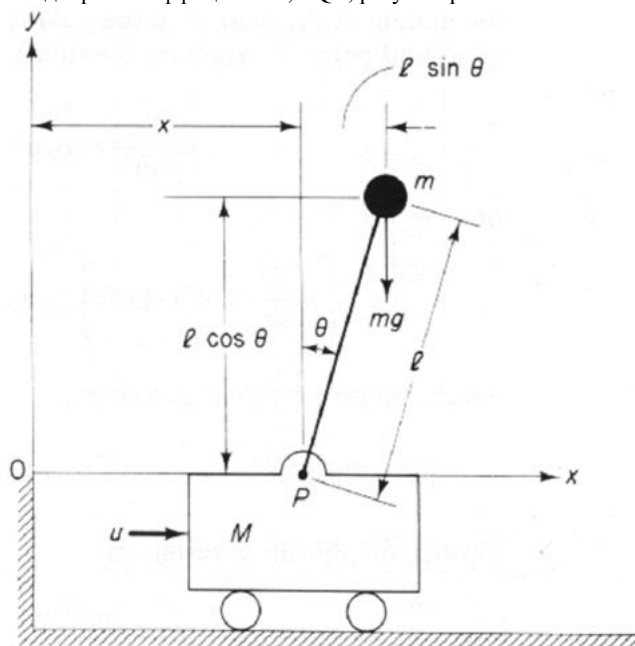


Рисунок 3 - Кинематическая схема системы.

Пользователь при помощи программного пакета MATLAB может создать модель, выходами которой является желаемая скорость и положение робота. Далее эти задающие воздействия через блоки из дополнения Instrument Control Toolbox передаются по интерфейсу UART в управляющее устройство робота. От него же в модель идет обратная связь по скорости и по углу наклона [5].

Рассмотрим математическую модель робота, которая состоит из 2-х элементов: подвижного основания и перевернутого маятника. Кинематическая схема представлена на рисунке 3. Положение каретки в системе декартовых координат OXY характеризуется значением x, а угловое отклонение маятника от вертикальной оси - значением θ . Система управления создает силу u, действующую на основание вдоль оси OX.

Движение её можно описать следующими дифференциальными уравнениями:

$$\theta'' = \frac{u \cos(\theta) - ml \dot{\theta}^2 \cos(\theta) \sin(\theta) - (m + M)g \sin(\theta) - k2\theta}{ml \cos^2 \theta - (m + M)l}$$

$$x'' = \frac{u - ml\theta^2 \cos(\dot{\theta}) \sin(\theta) - mg \cos(\theta) \sin(\theta) - k1\dot{x}}{(m + M) - m \cos^2(\theta)}$$

где g- ускорение свободного падения, $\dot{\theta}$ - угловая скорость маятника, \dot{x} - линейная скорость каретки k1,k2, - коэффициенты трений, l - длина маятника.

Упрощенный вид конструкции робота приведен на рисунке 2. Подвижное основание состоит из двух колес, двух коллекторных двигателей постоянного тока и источника питания, закрепленных в корпусе. На маятнике (верхняя полка) же располагается устройство управления, связи с компьютером, измерительные устройства и плата драйвера для двигателя (не показаны на модели).

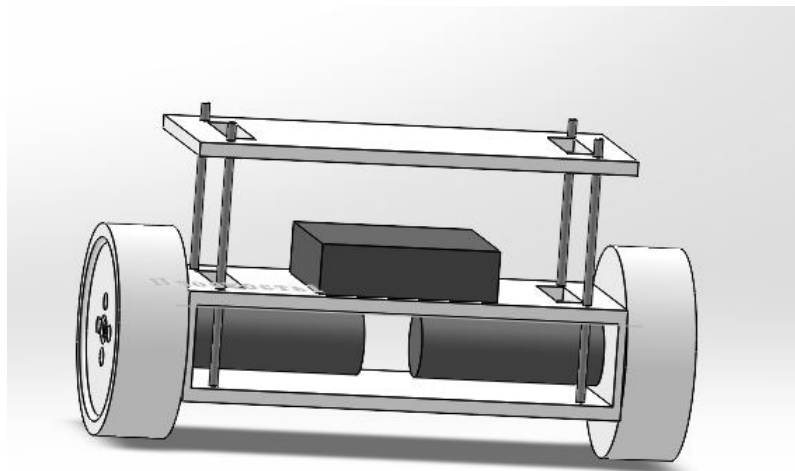


Рисунок 4 – Упрощенный вид конструкции.

Рассмотрим и сравним несколько методов управления данной системой.

Управление на основе векторного управления (рисунок 5), управление на основе LQR- синтеза (рисунок 6), управление на основе нечеткой логики (рисунок 7), графики результатов представлены на рисунках 8,9,10 соответственно.

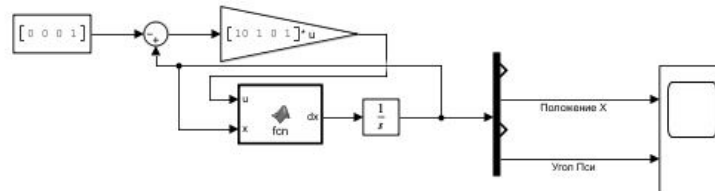


Рисунок 5 – Структурная схема векторного управления с ручным подбором коэффициентов.

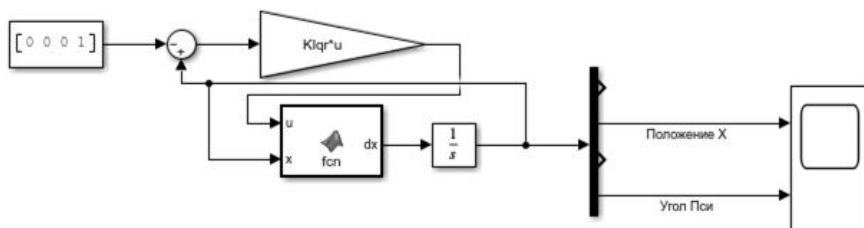


Рисунок 6 – Структурная схема с LQR-синтезом коэффициентов.

Управление на основе нечеткой логики.

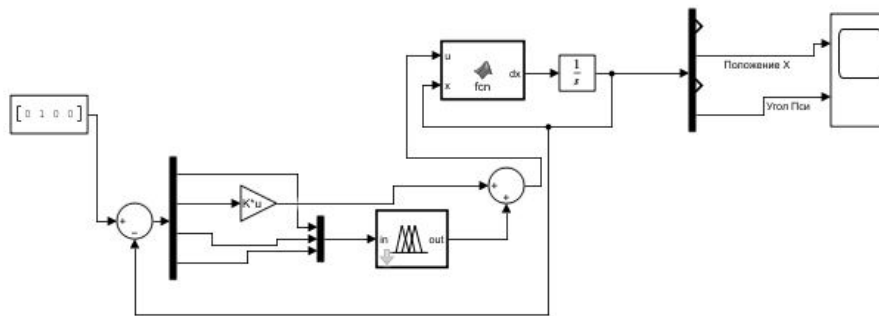


Рисунок 7 – Структурная схема с управлением на базе нечеткой логики.

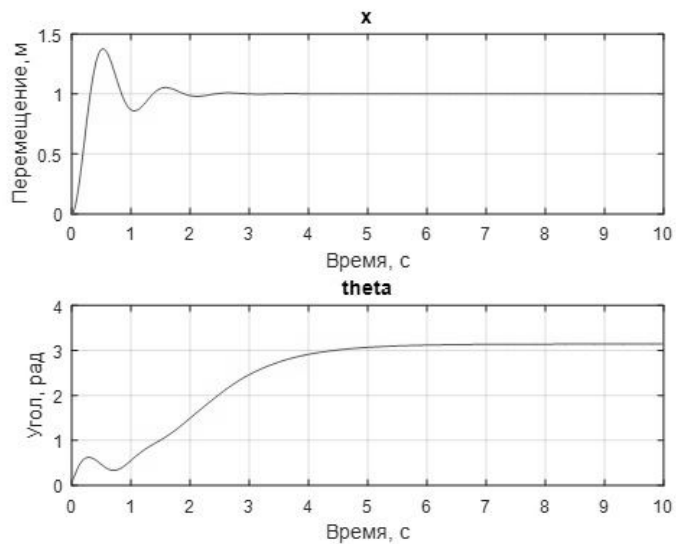


Рисунок 8 – Результаты моделирования векторного управления.

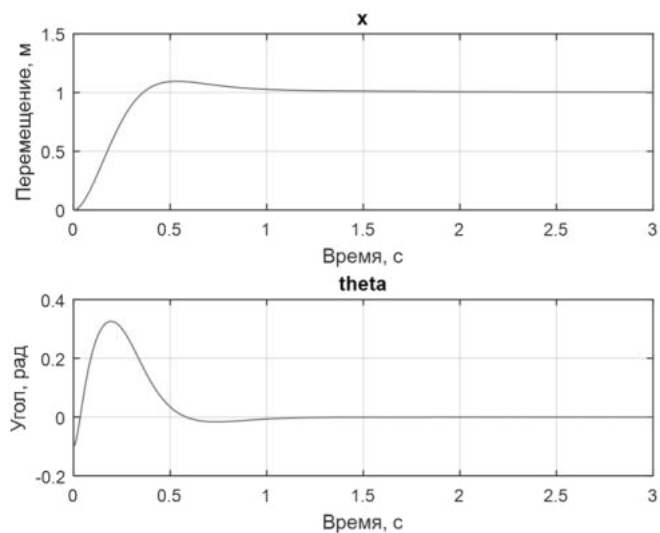


Рисунок 9 – Результаты моделирования с управлением LQR синтеза.

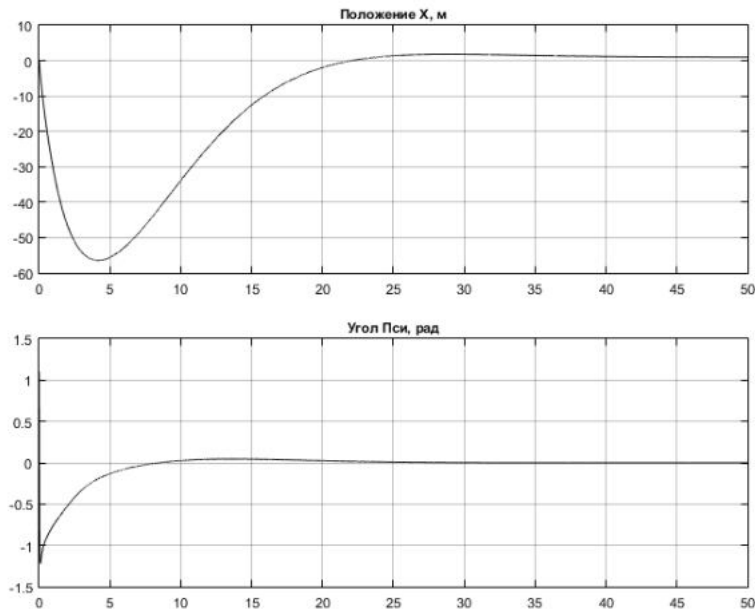


Рисунок 10 – Результаты моделирования с управлением на базе нечеткой логики.

Краткие выводы.

Ручной метод подбора коэффициентов обратной связи является самым простым, однако качество такой системы управления не самое лучшее. Минус этого метода, это невозможность решать задачи в реальном времени и для стабилизации по углу, необходимо очень долго подбирать коэффициенты вручную.

LQR – синтез является более оптимальным методом регулирования для балансирующего робота. Параметры матриц $Q=1400$ $R=0,1$.

Синтез, основанный на нечеткой логике, позволяет стабилизировать платформу с большими углами отклонения начального положения, но для этого необходимы большие перемещения, на графике видно, чтобы стабилизировать угол в 1 радиан приходится переместиться на 55 метров.

Код в блоке `func` представлен ниже:

```
function dx=fun_dyn(x,u)
iM = [4/(4*M+4*m-3*m*cos(phi)^2),(6*cos(phi))/(4*L*m+4*L*M-
3*L*m*cos(phi)^2);(6*cos(phi))/(4*L*m+4*L*M-
3*L*m*cos(phi)^2),(12*(M+m))/(4*L^2*m^2-3*L^2*m^2*cos(phi)^2+4*L^2*M^2*M*m)];
du = iM*[u-0.5*L*m*sin(phi)*dphi*dphi-k1q*dx;L*g*m*sin(phi)/2-k2q*dphi];
dx = [du(1);dx;du(2);dphi];
end
```

Библиографический список

1. Скобов Э.А., Васильев Е.М. Математическая модель подвижного балансирующего робота // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2019. – № 3. – С. 14-17.
2. Официальный сайт Segway в России [Электронный ресурс] // URL: <http://ru.segway.com/> (дата обращения: 05.04.2022).
3. Двухколённый робот Boston Dynamics переносит грузы захватом на присоске [Электронный ресурс] // Хабр; URL: <https://habr.com/ru/news/t/445888/> (дата обращения: 04.04.2022).
4. Жмудь В.А., Федоров Д.С., Ивойлов А.Ю., Трубин В. Г. Разработка системы стабилизации угла отклонения балансирующего робота // Автоматика и программная инженерия. – 2015. – № 2(12). – С. 16-34.
5. Балансирующий робот на Arduino Nano и шаговых моторах [Электронный ресурс] // Хабр; URL: <https://habr.com/ru/post/575662/> (дата обращения: 05.04.2022).

УДК: 007.52

НИЗКОУРОВНЕВОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ САМОХОДНОГО АВТОНОМНОГО РОБОТА С МАНИПУЛЯТОРОМ

Смирнов А. А.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Введение

В сообщении приводятся результаты решения конкретных задач, с которыми пришлось столкнуться при создании автономного самоходного колесного робота в Лаборатории общей механики НИИ механики МГУ.

Одно из главных отличий робота, управляемого дистанционно, от автономного робота заключается в автоматической обработке большого объема информации, поступающей от различных датчиков, и формировании соответствующих команд для исполнительных устройств. Поэтому обязательной составной частью автономных роботов является достаточно мощный компьютер. По отношению к нему датчики и исполнительные устройства будут называться далее периферийными устройствами. В соответствии с давно сложившимся в информатике подходом для непосредственного управления этими устройствами используются специализированные компьютеры,

получившие название драйверов. Драйверы избавляют главный компьютер от необходимости знать специфические особенности периферийного устройства и позволяют ему при обмене информацией обходиться стандартным набором команд. Получив команду от главного компьютера, драйвер обеспечивает ее выполнение периферийным устройством.

Программы для драйверов широко распространенных периферийных устройств часто пишутся их изготовителями. К сожалению, при работе над роботом найти готовые драйверы не удалось. Поэтому драйверы и программы для них пришлось разрабатывать самостоятельно.

Задачей работы является только разработка программного обеспечения для управления движением и манипулятором самоходного колесного исследовательского комплекса "MSU Rover" (рис. 1). Аппаратные средства драйвера, разработанные сотрудником лаборатории Капытовым Дмитрием, уже изготовлены. MSU Rover разрабатывается группой студентов и сотрудников лаборатории МГУ для участия в международных соревнованиях ERC.

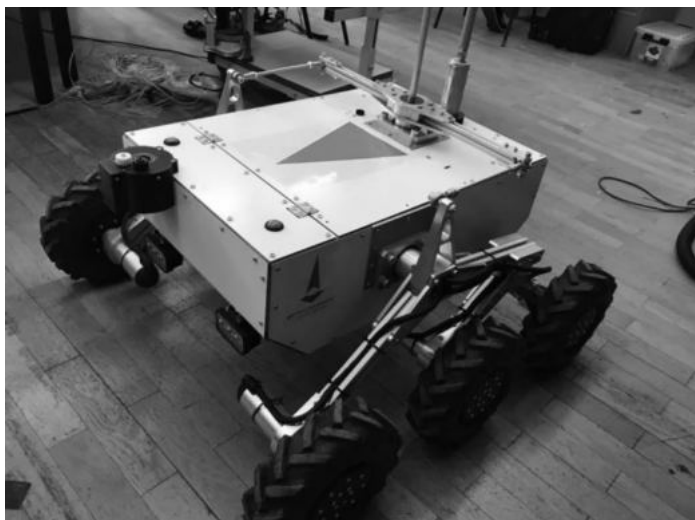


Рис. 1: MSU Rover

Каждое из шести колес самоходного робота приводится в движение собственным двигателем, который управляется своим драйвером. У каждого колеса имеется собственный энкодер, передающий его драйверу фактическую скорость вращения колеса. Кроме того, для управления манипулятором также требуется шесть двигателей с драйверами.

Электроника

В качестве микропроцессора для контроллеров использовались STM32F446Re [3,4] Помимо микропроцессора на платах микроконтроллеров есть вся необходимая периферия для управления двигателями, считывания информации с датчиков и обмена сообщениями с главным компьютером. Электрические схемы драйверов были разработаны в Лаборатории общей механики (Рис. 2). Процессоры STM32 программируются на языке С.

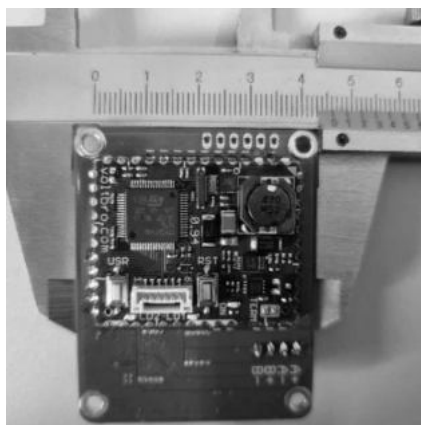


Рисунок 2а: Сторона драйвера А

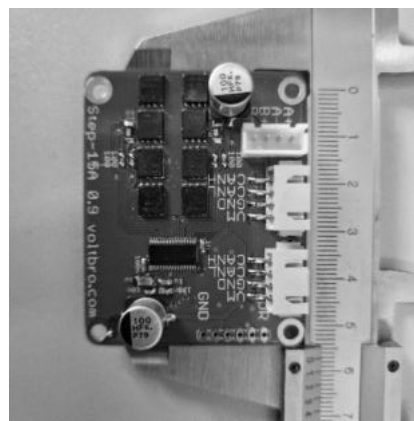


Рисунок 2б: Сторона драйвера Б

Протокол обмена сообщениями

Для передачи сообщений между главным компьютером и микроконтроллерами используется интерфейс CAN (Controller area network) [1] который является стандартом ISO с 1993 года [2]. Он определяет не только физический, но и логический уровни сети.

CAN использует топологию типа "шина", при которой каждое отправленное сообщение получают все устройства сети. Поэтому важно было разработать систему адресации, при которой каждый драйвер будет исполнять только направленные ему команды, а главный компьютер сможет обрабатывать сообщения от всех контроллеров и различать, что от кого пришло.

Для того, чтобы драйвер смог узнать предназначенное ему сообщение, каждому драйверу присваивается индивидуальный идентификатор – адрес. При отправке сообщения главный компьютер указывает идентификатор

получателя в соответствующем поле заголовке сообщения (Рис. 3 поле ID). Драйвер, отправляя сообщение главному компьютеру, помещает в это же поле собственный идентификатор.

Информация, которую нужно передать адресату, содержится в теле сообщения (Рис. 3 поле Data). Формат тела сообщения определяется программистом. Например, для поворота вала двигателя на заданный угол с нужной скоростью требуется разместить в теле два числа с плавающей точкой. Одно число задает величину угла в радианах, другое – скорость вращения в радианах за секунду. На главном компьютере эти значения хранятся в переменных типа float16. Каждый float16 в памяти компьютера занимает 2 байта. Эти байты и записываются в тело CAN-сообщения.

По получении сообщения на драйвере вызывается функция-прерывание. Поскольку формат сообщения известен, полученные 4 байта можно преобразовать обратно в 2 числа с плавающей точкой - угол и скорость.

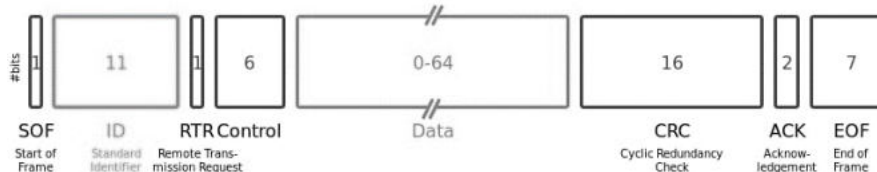


Рис. 3: Структура CAN-сообщения

Все разрешенные типы сообщений, используемые при обмене главным компьютером с драйверами, задокументированы. Поэтому знания низкоуровневого программного обеспечения для управления периферийными устройствами не требуется.

Кроме того, для главного компьютера написан скрипт на языке Python, обеспечивающий преобразование сообщений CAN в один из стандартных форматов операционной системы ROS [7] под управлением которой работает MSU Rover. Это позволяет с легкостью управлять как движением робота, так и его манипулятором с применением высокоуровневых алгоритмов навигации и обратной кинематики.

Подсистема управления движением

В этом разделе описан набор программных и аппаратных решений, принятых в процессе разработки драйверов для подсистемы управления движением робота.

Двигатели постоянного тока обеспечивают движение робота. Главный компьютер с помощью стандартных команд, не зависящих от модели двигателя, задает угловую скорость и направление вращения двигателя. Задача драйвера - обеспечить заданную скорость. Текущая скорость вращения двигателя измеряется с помощью энкодера и передается главному компьютеру.

Для управления каждым двигателем в схеме драйвера установлен H-мост. Это электронная схема, позволяющая управлять скоростью и направлением вращения двигателя с помощью четырех транзисторов.

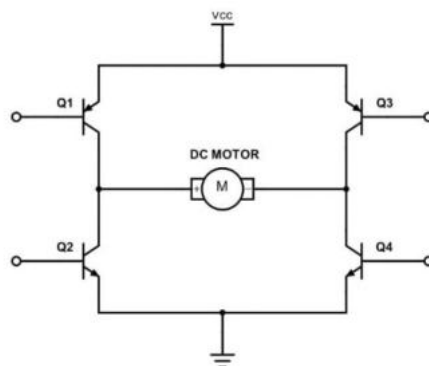


Рис.4: H-мост

По рисунку 4 видно, что при открытых транзисторах 1 и 4 двигатель будет вращаться в одну сторону, а при открытых транзисторах 2 и 3 - в другую. Для управления скоростью двигателя можно выбрать небольшой период времени, и подавать высокое напряжение на транзисторы только определенную часть этого периода. Такой режим работы контроллера называют Широтно-Импульсной Модуляцией (ШИМ). На процессорах STM32 при включенном ШИМ одна из ножек процессора управляется аппаратным таймером. Программист задает частоту, с которой увеличивается счетчик таймера, максимальное значение счетчика, а также значение счетчика, при котором происходит подача электрического сигнала на ножку. Когда счетчик доходит до конца уровня сигнала на ножке снова падает и таймер начинает считать сначала.

На верхнем графике рисунка 5 показана зависимость значения счетчика таймера от времени, а снизу нарисован сигнал ШИМ, привязанный к этому таймеру.

Однако, если подавать напряжение только на одну пару транзисторов, двигатель часть времени ничем не будет управляться и может продолжать вращаться по инерции. Тормозит его только трение колес. Если же дополнительно в ту часть периода, когда закрыта одна пара транзисторов открывать другую, то двигатель будет не только разгоняться, но и замедляться до требуемой скорости. Для этого проще всего использовать один таймер ШИМ, но на одну из пар транзисторов подавать инвертированный сигнал. Необходимая для этого электроника установлена в процессор производителем, инвертер можно включить в сеть изменив значение переменной в коде программы. Принципиальная схема H-моста с подключенным к нему генератором ШИМ изображена на рисунке 6. Прерывистая линия показывает, что смена уровней сигналов на двух ножках происходит одновременно.

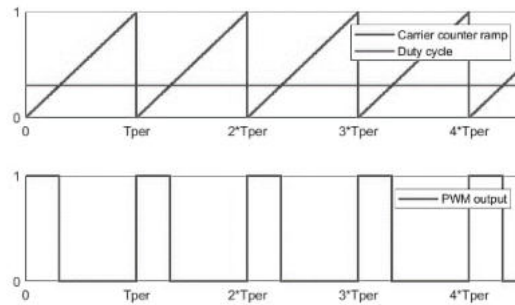


Рис 5: Генератор ШИМ

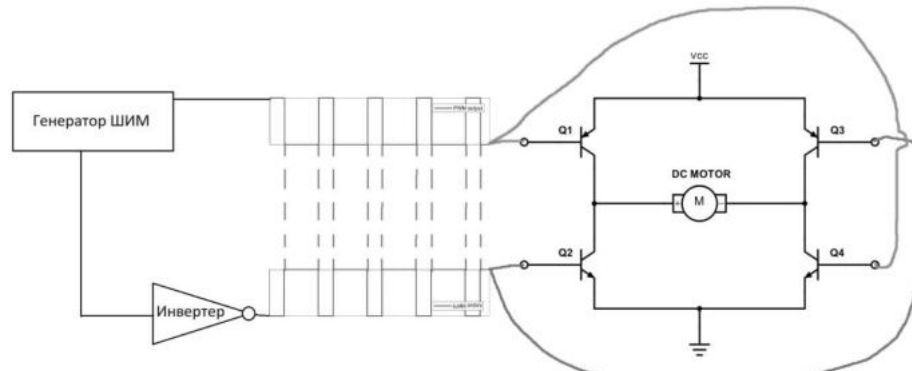


Рис. 6: H-мост с подключенным к нему генератором ШИМ

При выполнении задач робот может передвигаться по разным поверхностям, трение колес о землю может меняться. Для поддержания постоянной скорости в подобных случаях используется ПД (Пропорционально-дифференциальный) регулятор. Он сравнивает требуемую скорость движения со скоростью, полученной с энкодера и увеличивает или уменьшает длительность активной фазы ШИМ пропорционально разнице между требуемой и текущей скоростями и ускорению. Коэффициенты в формуле ПД регулятора подобраны методом Циглера-Никольса.

Для точного расчета скорости необходимо знать период времени между измерениями угла. В описываемой программе период равняется 50мс. Выдержать период позволяет аппаратный таймер, настроенный на вызов прерывания 20 раз в секунду. Все функции, зависящие от скорости (ПД регулятор, отправка скорости по CAN) вызываются один раз после каждого прерывания. Это позволяет экономить вычислительные ресурсы контроллера.

Подсистема управления манипулятором

Для управления манипулятором робота используются шаговые двигатели. В отличие от драйверов двигателей постоянного тока, которые управляются по скорости, сервопривод в качестве команды получает конечное положение вала двигателя и угловую скорость, с которой оно должно быть достигнуто. Для определения угла поворота вала шагового двигателя используется энкодер с энергонезависимой памятью. Это позволяет не переводить манипулятор в начальное положение при каждом запуске робота. Текущий угол поворота вала двигателя передается на главный компьютер по CAN.

Шаговый двигатель может находиться только в ограниченном количестве положений. Обычно 100 на один оборот. Для удержания текущего положения или перехода на следующее нужно в правильном порядке подать электрический ток на четыре обмотки двигателя. Переход двигателя на следующее положение называют шагом, отсюда и название - шаговый двигатель. В описываемой работе двигатель управляется с помощью микросхемы TI DRV8711 [5, 6]. На одну из ножек микросхемы подается периодический сигнал, сколько раз будет зафиксирован переход с низкого напряжения на высокое - столько шагов и сделает двигатель.

Конечно, сигнал можно генерировать вручную, в цикле дергая одну из ножек микропроцессора вверх-вниз. В этом случае любое прерывание, вызванное, например получением CAN - сообщения, увеличит задержку между командами и помешает плавному движению двигателя. Поэтому для генерации периодического сигнала используется ШИМ (О нем речь шла в предыдущей части доклада). Сквозность (длительность активной фазы) ШИМ всегда составляет половину периода.

Для управления скоростью двигателя необходимо изменять период ШИМ. Поскольку количество шагов на оборот известно, не трудно преобразовать полученную от компьютера скорость из рад/с в шаг/с. Действующий макет подсистемы управления двигателем манипулятора приведен на рисунке 7.

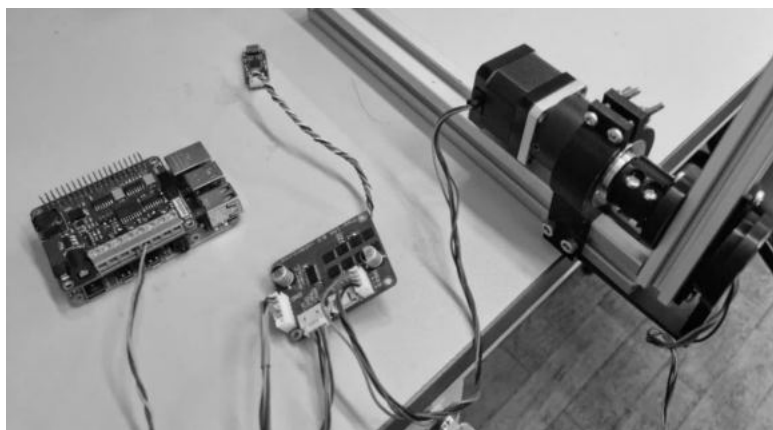


Рис. 7: Макет системы управления манипулятором. Слева направо: Главный компьютер Raspberry Pi, драйвер, шаговый двигатель, абсолютный энкодер

Заключение

В процессе выполнения работы написаны программы драйверов для управления шаговыми двигателями и двигателями постоянного тока. Для управления всем подсистемами робота с главного компьютера был разработан протокол обмена сообщениями на основе интерфейса CAN. Написаны программы, преобразующие высокоуровневые команды алгоритмов управления движением и манипулятором робота в команды для драйверов исполнительных устройств. Разработанное программное обеспечение протестировано на макетах и уже используется в работе MSU Rover.

На текущем этапе тестируется кинематический планировщик Moveit! [8] для управления манипулятором.

В заключение автор приносит благодарность сотрудникам Лаборатории общей механики НИИ Механики МГУ за внимание и постоянную поддержку в ходе выполнения работы.

Библиографический список

1. Texas Instruments - Introduction to the Controller Area Network (CAN)
2. CAN - ISO 11898: <https://www.iso.org/standard/63648.html>
3. Donald Norris - Programming with STM32. Getting started with Nucleo Board and C/C++.
4. STMicroelectronics - STM32F446xC/E datasheet.
5. Texas Instruments DRV8711 stepper gate: <https://www.ti.com/product/DRV8711>
6. Texas Instruments - DRV8711 Stepper Motor Controller datasheet.
7. Lentin Joseph - Robot Operating System (ROS) for Absolute Beginners: Robotics Programming Made Easy
8. Moveit official website: <https://moveit.ros.org/>

УДК 608.2, 608.4, 62-529, 004.896

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ФОТООТВЕРЖДЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Круглов А. В.

Университет ИТМО

Аннотация

Предмет исследования. В качестве предмета исследования выступают технологии производства и фиксации дефектов при производстве печатных плат. Проанализированы существующие устройства и методы фиксации и контроля за дефектной продукцией. Проанализированы достоинства и недостатки существующих решений. Представлена логическая архитектура системы с описанием взаимодействующих элементов и механическая часть экспериментальной установки. Методы. Представлено аппаратное решение с использованием технологии машинного зрения на базе свёрточных нейронных сетей. Данный метод позволяет осуществлять детектирование дефектов и корректировать мощность лазерного излучения при производстве печатных плат (ПП) в режиме реального времени. Результатом работы является предложенный метод обнаружения дефектов в режиме реального времени с использованием алгоритмов машинного зрения. Практическая значимость. Предложенный способ позволяет осуществлять контроль как за единичной партией, так и за серийным производством. При этом повышая качество контроля фотоотверждаемых дорожек печатных плат в режиме онлайн, сокращая время на юстировку самого оборудования и снижая время на контроль при производстве плат. Также данный метод может быть применён и в других направлениях, таких как медицина, 3d-печать, гравирование или лазерная резка, уменьшая толщину реза выпускаемых деталей или сокращая толщину шва.

Ключевые слова

Машинное зрение, свёрточная нейронная сеть, полимеризация, УФ-отверждение, печатная плата, производство ПП, автоматическое производство, контроль качества, определение дефектов, обучение с подкреплением.

Введение. Производство печатных плат (ПП) имеет важную роль при создании и дальнейшей функциональности всех видов электронных устройств, начиная от простейших однослойных плат и заканчивая сложными многослойных плат, применяемых в сложной вычислительной технике, требующей высокую плотность монтажа компонентов.

Датой рождения ПП считается 1902 год, именно тогда немецким инженером, занимавшимся разработками в области телефонной связи, была подана заявка в патентное бюро с разработанным прототипом ПП. С течением

времени и до наших дней технология производства претерпевала постоянные изменения, меняя методики и подходы, постоянно уменьшая габариты ПП в размерах. Дойдя до наших дней, где многие элементы в процессорах достигают околоатомных размеров, а габариты элементов печатной платы достигают миллиметров и стремятся к микронам, появляется вопрос об уменьшении расстояния между элементами печатной платы. Таким образом актуальной задачей становится уменьшение ширины дорожки на ПП.

С 1948 года внедрение ПП в радиоэлектронику стало носить массового характер, а в качестве решения стали применяться полиграфические методы печати. Компактные решения в производстве радиоэлектронных компонентов повлекли к совершенствованию производственных комплексов и оборудования.

Так, уже в 1949 году, появляются первые разработки станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и начинается финансирование исследований в этой области. В 1954 году американской компанией Bendix Corp был разработан опытный образец ЧПУ, который уже к 1955 году начали выпускать серийно. Применение станков ЧПУ продемонстрировало свою эффективность и уже к первой половине 1960-х гг. первые ЧПУ появились и в отечественной промышленности.

Примерно в это же время, в 1950-х, появились и первые технологии компьютерного зрения, однако из-за недостаточной вычислительной мощности машин, где много операций приходилось выполнять вручную, а результаты получались с ошибками, технология не возымела широкого применения.

С развитием технологий производства печатных плат, разрабатывались новые методы и подходы для нанесения рисунка печатной дорожки ПП. В основе был положен процесс фотолитографии. Данный процесс можно разделить на контактный и бесконтактный методы, где при контактном способе фотошаблон соприкасается с резистом, нанесённым на подложку, а в случае с бесконтактным резистом, такого касания не происходит. [1,2]

Размер компонентов ПП, а вслед за ним и габариты электронных устройств, уменьшались, производительность увеличивалась, а технологии становились доступнее. Так, уже к началу 2000-х, технология машинного зрения (МЗ) получило новый заряд интереса и к 2010 году спрос и широкое внедрение в Индустрию 4.0.

В настоящей работе целью ставится разработка метода производства ПП, в результате которого станет возможно осуществлять автоматический контроль над дефектами в режиме реального времени. Таким образом, уже на ранних стадиях производства, возможно обнаружить отклонения от заданных параметров, что позволит избежать множественных последующих операций с уже бракованным изделием, а значит сэкономить время, материалы и существенно снизить цену ошибки.

Современное оборудование обработки ПП

Современные устройства трассировки печатных плат представляют собой достаточно сложные оптические и дорогостоящие конструкции, при этом возможность контроля при производстве ПП оказывается невозможным из-за логики постпроверки дефектов. Это значит, что проверка на дефекты осуществляется только после нанесения всех элементов (конденсаторов, резисторов и пр.) на подложку платы и уже после нанесения рисунка. [3]

Анализируя современный рынок производства, можно выделить несколько типов устройств для эффективного изготовления ПП.

К таковым можно отнести гальванометрический сканатор и цифровую микрозеркальную матрицу (Digital micromirror device, DMD). Гальванометрический сканатор представляет собой двухосевой стол с лазером, оптическим телескопом и оптическим сканером по двум осям с максимальной скоростью работы до 2 м/с и полем обработки до 250x250мм.

Недостатком этой системы считается небольшая обрабатываемая область и потеря мощности при отражении.

Цифровая микрозеркальная матрица состоит из источника излучения, отражателя, гомогенизатора, линзы, DMD и ПК с контроллером. Проекторы на базе DMD-матриц способны фокусировать через проецирующую линзу преобразованный пучок УФ-излучения в необходимую область.

К недостаткам системы можно причислить большую энергозатрату, шумы от сторонних вибраций, а также точность цветопередачи, что может сильно сказываться при полимеризации.

Таким образом описанные устройства при общей положительной роли в промышленности имеют ряд недостатков, основными среди которых являются ограниченность площади обрабатываемой поверхности, габаритность, свойственную всем устройствам данного типа и высокую стоимость.

С нашей стороны можно выделить несколько основных блоков из которых состоит система: Блок механики, Блок обработки, Блок программный.

Блок механики

С нашей стороны предлагается использование 3х-осевой адаптивной платформы технологического оборудования ADARTEQ (ADARTEQ Platform of Technological Equipment). Две оси представляют собой станину, третья ось регулируемая. Стол представляет собой двухосевую конструкцию, состоящую из модулей: каретка, управления, вспомогательный модуль управления, шасси с модулем управления и программного обеспечения. Такая платформа способна перемещаться со скоростью до 50 м/мин, при этом платформа не имеет недостатков описанных выше устройств и ограничение по площади обработки имеет только исходя из собственных габаритов. [4]

В описываемом подходе предлагается усовершенствование существующих методик производства ПП с фиксированием дефектов в режиме онлайн, не требуя вмешательства человека. Для этого требуется решить ряд технических задач, среди которых можно выделить: совместимость аппаратных и механических модулей в виде машинного зрения (МЗ) и 3-хосевой платформы; взаимодействие системы МЗ и лазерного излучения; способности обрабатывать необходимое число изображений.

Можно выделить два основных блока из которых состоит экспериментальная установка - это:

Механика (управление кареткой)

Логика (программно-аппаратные решения)

В механическую часть входят: механическая часть адаптивной трёхосевой платформы (в т.ч. двигатели и лазер) и соединение силовых проводов и кабелей.

Логическая часть состоит из: аппаратного взаимодействия между механическими устройствами (в т.ч. драйверами, камерой, лазером) посредством управляющих программ и устройств с компьютером.

Блок обработки

Со времён первых попыток применения МЗ прошло уже пол века. За это время от практики использования МЗ отказывались из-за слишком малой производительности таких устройств, для работы с которыми были необходимы более мощные вычислительные устройства. На данном этапе развития промышленности, в эре Индустрии 4.0 МЗ всецело применяется и имеет большие перспективы для дальнейшего развития.

Промышленные системы с ЧПУ, которые применяют МЗ чаще всего состоят из нескольких условных блоков: блока сбора-фиксация данных, блока обработки изображения, блока вычисления и блока передачи управляющих данных.

Блок сбора и фиксации данных представляет собой камеру, подключённую к компьютеру и отвечающую за считывание входящих данных.

Блок обработки изображения занимается обработкой поступающих из блока сбора и фиксации данных.

Блок вычисления получает обработанные данные и задействует аппаратные мощности для сверки данных с шаблонами, в соответствии с заданным алгоритмом работы и выдаёт полученные данные на управляющий блок передачи данных.

Блок программный

Для опознавания дефектов требуется сперва обучить СНС и для тренировки и обучения модели применяются такие методы детектирования, как: Fast R-CNN, Faster R-CNN, SSD, YOLO. [5-9]

Fast R-CNN – в данном варианте улучшенной версии R-CNN алгоритм действия: поданное на вход СНС изображение обрабатывается методом selectivesearch, полученная карта признаков передаётся и обрабатывается методом максимальной выборки (MaxPolling) для уменьшения размерности и упрощая энергозатраты при обработке данных.

К недостаткам можно отнести то, что данный метод всё ещё энергозатратный, требующий мощностей для вычислений.

Faster R-CNN – более продвинутая версия, в которой отказались от алгоритма предшествующих версий selective search. Изображение подаётся на вход СНС, формируется карта признаков, которая обрабатывается системой якорей RPN (Region Proporsal Networks). Карта признаков с последующей обработкой и классификацией, определением смещения областей потенциальных объектов передаются слою RoI.

Недостатки: модель работает быстрее предшественников, но хуже справляется с локализацией.

SSD (Single Shot MultiBox Detector) исходное изображение проходит через свёрточные слои, получая карту признаков, в картах этих признаков применяются свёрточные слои с фильтрами размерностью 3 x 3 для каждой такой области, одновременно для каждой такой области производится оценка пространственного смещения и рассчитывается вероятность нахождения этого объекта. Шаг фильтрации регионов здесь отсутствует.

Быстрая сеть, хорошо подходящая для работы в реальном времени, сравнимая с YOLO.

YOLO – за счёт отсутствия явных циклов представляет собой скоростную сеть, которую можно эффективно применять в решениях, где требуется обработка в режиме реального времени. В методе используется созданная по умолчанию сетка, для того что б один объект не определялся многократно используется коэффициент перекрытия окон. [10,11]

Описание процесса работы

На сегодняшний день существующие решения фиксации и детектирования дефектов на печатных платах предлагают лишь «статичные» решения, т.е. решения, в которых обнаружение и фиксация дефекта на ПП производятся уже после изготовления. Так в существующих решениях камера МЗ фиксируется над объектом исследования (ПП) и обученная модель сверяет уже произведённую плату с тренировочными образцами, на предмет отклонения- дефекта (обнаруживая разрыв на дорожке ПП, отсутствие элемента, типа, конденсатора, резистора и т.д.).

Пример разработанного подхода представлен на рис. 1.

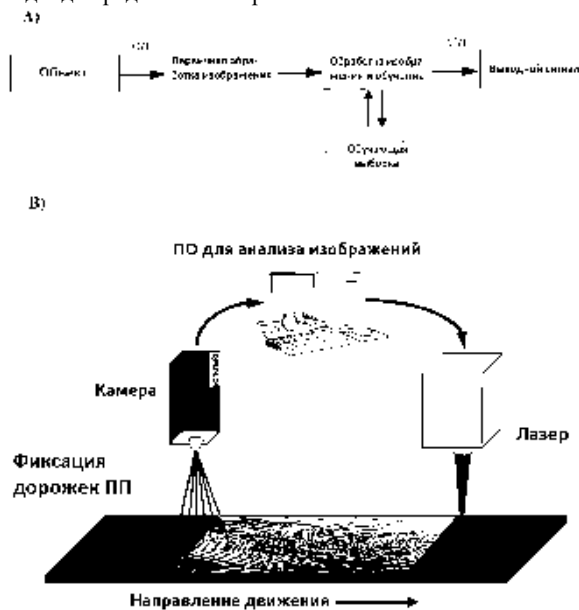


Рис 1. А) блок-схема, логика работы; В) принцип работы и внешние блоки системы.

На основе предложенных подходов разработана экспериментальная установка для производства ПП, где с помощью лазерной эмиссии производится селективное фотоотверждение полимера, за счёт чего осуществляется трассировка платы и корректирование работы станка.

Рабочая зона представляет собой поле 500 x 500 мм – в пределах поля действия двухосевой платформы. Камера располагается рядом с лазерным излучателем и для избежания помех при фиксации изображения камерой, на камеру устанавливается широкополосный светофильтр.

Камера в 2d-режиме захватывает и фиксирует чёрно-белое изображение из внешнего блока, преобразовывает данные в блоке предобработки для упрощения расчёта входящих данных. Понижая глубину цветности мы снижаем нагрузку на логический блок. По проводной связи зафиксированные данные передаются в блок обработки данных, где производится сравнение значений с шаблонными и, в случае отклонения полученных значений из внешнего блока (камеры), от тренировочных данных, производится «настройка». Данные корректируются и передаются в виде управляющего сигнала на внешний блок управления, корректируя скорость движения двухосевой платформы или изменяя мощность лазерного излучения.

Закключение. В настоящей работе был рассмотрен новый подход в производстве ПП с детектированием дефектов в режиме реального времени с применением нейронной сети YOLOv4.

Был проведен анализ существующих решений и предложено решение по оптимизации в производстве ПП. Предложенный подход позволяет сократить время производства, зафиксировав ошибку на ранних стадиях изготовления и отредактировать дефект в момент его возникновения.

В качестве основы разрабатываемой системы предлагается использование экспериментальной 2x-осевой адаптивной платформы технологического оборудования ADARTEQ. Данная система может быть легко интегрирована в производственные решения за счёт модульности и простоте устройства.

Библиографический список

1. Брусницына, Л. А. ; Степановских, Е. И. ; Марков, В. Ф. (Редактор). / ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ : учебное пособие. // Под ред. В. Ф. Марков, 2015. 200 стр.
2. Bassem S.M. Zohdy, Nagy Ramadan, Mahmood A. Mahmood, Hesham A. Hefny, 2019. Machine Vision Application on Science and Industry: Machine Vision Trends [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 03.01.2022) doi:10.4018/978-1-5225-5751-7.ch008
3. Изосимова Т.А., Максимова М. В., Михайлова О. В., Разработка автоматизированной системы управления диагностикой печатных плат на основе машинного зрения, 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 11.10.2021)
4. М. Я. Афанасьев, А. А. Грибовский. КОНЦЕПЦИЯ АДАПТИВНОЙ ПЛАТФОРМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.02.2022) DOI:10.17586/0021-3454-2015-58-4-268-272
5. R. Girshick, J.Donahue, T. Darrell, J. Malik, 2014. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.02.2022) DOI:10.1109/CVPR.2014.81
6. R. Girshick, Fast R-CNN, 2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.02.2022) <https://doi.org/10.48550/arXiv.1504.08083>
7. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi, You Only Look Once:Unified, Real-Time Object Detection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scholarphi.semanticscholar.org>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 23.09.2021) doi:10.1109/CVPR.2016.91
8. Chia-Wen Kuo, Jacob D. Ashmore, David Huggins, Zsolt Kira, Data-Efficient Graph Embedding Learning for PCB Component Detection, 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<https://arxiv.org/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 13.01.2022) DOI:10.1109/WACV.2019.00064
9. Sanli Tang, Fan He, Xiaolin Huang, Jie Yang, Online PCB Defect Detector On A New PCB Defect Dataset, 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 13.01.2022) <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.06197>
10. Zhichao Liu, Baida Qua, Machine vision based online detection of PCB defect, 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 23.09.2021) <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103807>
11. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi, You Only Look Once:Unified, Real-Time Object Detection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scholarphi.semanticscholar.org>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 23.09.2021) doi:10.1109/CVPR.2016.91

УДК 612.766.1

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПНЕВМОПРИВОДА В ЭКЗОСКЕЛЕТАХ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. Назарова, А.Д. Перфилова

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

Экзоскелет - устройство, предназначенное для снятия с оператора статических и динамических нагрузок и увеличения его мышечных усилий. Конструкция экзоскелета представляет собой внешний каркас в виде многозвенного исполнительного механизма, образующего параллельные взаимосвязи с оператором. Разработки в области экзоскелетов активно применяются в медицине, военном деле, строительстве, промышленности. Также экзоскелеты используются для работы в экстремальных условиях. В данной статье будут рассмотрены только медицинские экзоскелеты.

В процессе реабилитации пациентов экзоскелет используется для восполнения утраченных функций, увеличения силы мышц человека и расширения амплитуды движений за счёт внешнего каркаса и приводящих частей, а также для передачи нагрузки при переносе груза через внешний каркас в опорную площадку механизма.

Для обеспечения выполнения различных движений экзоскелет должен повторять биомеханику человека с необходимой точностью.

Классифицировать экзоскелеты можно по двум характеристикам:

1. По назначению:

- для восстановления опорно-двигательных функции тела после операций, повреждений, болезни;
- для постоянного использования людьми с ограниченной мобильностью.

2. По частям тела:

- для нижних конечностей;
- для верхних конечностей;
- комплексные;
- для кисти руки.

В работе будут рассмотрены случаи для скелета опорно-двигательного аппарата. Экзоскелет представляет собой автоматизированный механизм, адаптированный к структуре нижнего пояса конечностей человека, снабжен аккумулятором и внешним модулем управления. Устройство предназначено для взрослого человека и приводится в движение за счет приводов. Примеры представленных на рынке экзоскелетов медицинского назначения для нижних конечностей представлены на рисунках 1-2.



Рисунок 1- «ExoAtlet» фирмы «KELEANZ medical» Рисунок 2- «E-helper» группы компаний «МАДИН»

Такие модели показаны следующей группе пациентов:

- пациенты после инсульта с двигательными нарушениями;
- пациенты после черепно-мозговой травмы с двигательными нарушениями;
- пациенты с травматической болезнью спинного мозга;
- пациенты с патологическим паттерном ходьбы при заболеваниях опорно- двигательного аппарата;
- пациенты с ДЦП и рассеянным склерозом с двигательными нарушениями

Восприятие корпусом внешних нагрузок обеспечивается за счёт использования силовых приводов различного вида в исполнительном механизме. Силовые приводы управляются сигналами с системы датчиков, получающих информацию от оператора и (или) исполнительного механизма. В современных моделях чаще всего используется электропривод, однако его недостатками являются относительная дороговизна, малое время автономности (в среднем 4-6 часов), вес конструкции, небезопасность для пользователя. Поэтому рассмотрим модели электропривода, а также пневмопривода как альтернативы.

Модели приводов

Реализованы две модели аппаратов. Базовая построена по антропоморфной схеме и управляется обычными электроприводами. Вторая является расширенной и построена по специализированной схеме с управлением от пневмоцилиндров, ее движение строится на основе модели "встроенного в экзоскелет" антропоморфного аппарата. Схема с пневмоприводом может реализовываться двумя вариантами: только на основе пневмоуправления или как гибридная с управлением и от пневмоприводов, и от электроприводов. К преимуществам электропривода относятся низкая стоимость энергии, простота конструкции всей системы и высокий КПД (в сравнении с пневматическим), возможность обеспечения стабильной скорости работы, высокая точность работы, точное позиционирование и плавное регулирование. Недостатками электропривода являются высокая стоимость, возможность перегрева двигателя при длительной непрерывной работе, кроме того, его электромагнитное поле может создавать помехи в находящихся рядом других сетях, что может быть опасно при использовании в непосредственной близости от сложного медицинского оборудования. Несомненными преимуществами модели на основе пневмоприводов являются отсутствие необходимости в применении дорогостоящих комплектующих изделий и высокой точности изготовления элементов соединений, изготовление трубопровода также не требует применения дорогостоящих материалов, а утечки в пневматических системах легковосполняемы [5]. Эти преимущества являются особенно значимыми для рассматриваемой задачи, поскольку в сфере здравоохранения доступность оборудования играет значительную роль. Кроме того, им свойственны простота конструкции и легкий вес пневмоцилиндров, большой срок службы при соблюдении рабочего режима, нечувствительность к электромагнитному излучению. Недостатками являются сравнительно невысокий КПД, потребность в сложной системе управления и небольшая грузоподъемность. Невзирая на эти недостатки, пневмоприводы нашли применение не только в медицинских, но и в промышленных экзоскелетах (модели Muscule Suits, SPE, Harvard's exosuit).

Ряд недостатков традиционных пневмоприводов устранен в гибких приводах [6]. Под гибкими приводами понимается пневматическая конструкция, состоящая из эластичной оболочки, армированной гибкими нерастяжимыми связями. Наиболее известным гибким приводом является мышца МакКибена (McKibben Muscle), созданная Д.МакКибеном для ортопедических целей в пятидесятые годы двадцатого века. Схема мышцы МакКибена

представлена на рисунке 3. Данный гибридный привод представляет собой тонкостенную эластичную трубку, армированную сеткой – оплеткой, состоящей из уложенных крест-накрест в виде набора ромбовидных ячеек нитей. Края оболочки герметично закреплены в присоединительных элементах. В результате повышения давления в трубке (величина давления ограничена величиной до 0,5 – 0,8 МПа из-за ограниченной прочности материала), происходит сокращение мышцы и возникает тянущее усилие. Степень сокращения определяется углом между оплеткой гибкого привода и его продольной осью.

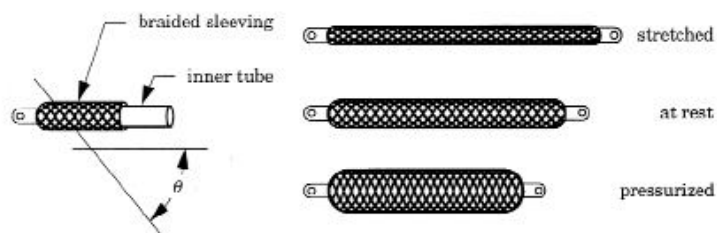


Рисунок 3- Мышца МакКибена

Преимуществами гибких приводов являются значительно большие развиваемые усилия (особенно в начале диапазона сокращения), большой диапазон регулирования скоростей, значительно меньше трение между подвижными частями привода, существенно меньшая стоимость, возможность полной герметизации внутренней полости, большая удельная мощность, уменьшение потребления газа, снижение эксплуатационных затрат. Им также свойственны некоторые недостатки: диапазон перемещений линейного двигателя составляет небольшую часть от длины, несколько меньший диапазон рабочих температур, и особенности: исполнительный двигатель имеет нелинейные характеристики, кроме того, гибкий привод является приводом одностороннего. Последняя особенность компенсируется использованием пары гибких приводов, образующих антагонистическую пару. Особенности гибких приводов позволяют за счет их размещения в конструкции экзоскелета обеспечить степени подвижности, приближенные к подвижности суставов живых организмов [8], что является важным свойством для устройства, предназначенного для восстановления подвижности конечностей. В рассматриваемом случае, медицинскому экзоскелету нижних конечностей требуется по возможности обеспечить подвижность, свойственную являющемуся наиболее подвижным сочленением человеческого организма шаровидному суставу, примерами которого являются плечевой и тазобедренный суставы. Кроме того, гибкий привод обладает «мягкой» конструкцией, что обеспечивает возможность безопасного взаимодействия человека с экзоскелетом.

Концепция медицинского экзоскелета для нижних конечностей, использующего схему, в которой для реализации требуемого движения один гибкий привод находится под давлением и сокращается, второй сообщается с магистралью низкого давления, предложен в работе Дарвина Д. Колдуэлла и Н. Цагаракиса [9]. Предложенная в ней схема (рис. 4) предполагает, что механическая конструкция экзоскелета обладает десятью степенями свободы, из которых восемь степеней свободы являются управляемыми, что позволяет обеспечить подвижность, необходимую экзоскелету для нижних конечностей. Часть конструкции, соответствующая тазобедренному суставу, обладает тремя степенями свободы: сгибание, приведение и боковое вращение. Части конструкции, соответствующие коленному суставу и стопе, имеют по одной степени свободы и позволяют выполнять сгибание и разгибание. На опорной конструкции экзоскелета установлены дискретные пневмораспределители, которые работают на частоте до 200 Гц и обеспечивают требуемую скорость и плавность движения исполнительного механизма.



Рисунок 4 - Схема экзоскелета

Выводы: Пневмопривод является простым, достаточно надежным и обладает сравнительно невысокой стоимостью, в то же время данный тип привода нуждается в сложной системе управления и имеет худшие в сравнении с электроприводом возможности по грузоподъемности. Эти особенности делают его менее подходящим

для применения в промышленных экзоскелетах, но дают возможность для реализации на его основе доступных реабилитационных устройств.

Библиографический список

1. Воробьев А.А., Петрухин А.В., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С., Поздняков А.М. Экзоскелет как новое средство абилитации и реабилитации инвалидов // Современные технологии в медицине. 2015. Том 7, No 2. С. 185—197.
2. Лапшин В.В. Механика и управление движением шагающих машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012.
3. Биомехатронный исследовательский комплекс для двигательной нейрореабилитации / А.П. Алисейчик [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. №12. 2013. С. 53-59.
4. Месропян, А. В., Оразов, А. Т. Математическое моделирование переходных процессов пневматического привода экзоскелетного устройства/ А. В. Месропян, А. Т. Оразов // Вестник УГАТУ. – Уфа. – 2018. – Т. 22 No1 (79). – С. 20 – 28.
5. Сарваров А.С., Васильев А.Е., Даниленко К.Б., Меньшикова Е.В. Сравнительный анализ приводов мехатронных систем // Теория и практика автоматизированного электропривода. 2014. No 4(25). С. 21—25.
6. Колесникова Е.Г., Савинская Е.А., Умнов В.И. Практическое применение гибких приводов: Изд-во Юго-Западный государственный университет, Курск, 2012
7. Daerden, F., & Lefeber, D. (2002). Pneumatic artificial muscles: Actuators for robotics and automation. European journal of mechanical and environmental engineering, 47, 11-21.
8. Захаров И.А., Устюгова И.Н., Попова Т.С. Разработка искусственного сустава для применения в робототехнике // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – No 4 (90). – С. 21–32.
9. Caldwell, D. G., Tsagarakis, N. G., Kousidou, S., Costa, N., Sarakoglou, I. «Soft» exoskeletons for upper and lower body rehabilitation – de sign, control and testing /

ОПТИМИЗАЦИЯ «ПОСЛЕДНЕЙ МИЛИ» ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ В СЕБЯ БПЛА И СКЛАДСКУЮ РОБОТОТЕХНИКУ

Ерёмин А.В., Лебедев А.И., Никитина Д.И., Путищев А.Д.

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

Современная жизнь человечества зависит от изобретений, стимулирующих развитие потребительских возможностей людей. Согласно [1], введение аэромобилей и автономных логистических систем в жизнь человека создаст новый сектор мировой экономики, чей ежегодный оборот к 2040 году составит примерно 1.5 трлн. долларов. На сегодня в мире уже существует несколько крупных и десятки мелких компаний, которые занимаются разработкой аэротакси и «дронов-доставщиков» [1]. И все эти технологии уменьшают логистические издержки, объем которых только в Европе достигает 100 миллиардов евро в год. Одной из компонент уменьшения таких издержек является оптимизация технологий «последней мили», включающее в себя «окно доставки», которое при традиционном методе доставки может достигать 8 часов. Примером такой оптимизации технологии может послужить автономный логистический комплекс, разработанный нами для одной из самых крупных российских компаний по производству бутилированной воды.

Разработка данного комплекса под названием «FlyWater» началась в 2019 году и начальной задачей была разработка только устройства-носителя доставки полезного груза, а именно бутилированной воды в емкостях объемом 19 литров. Позже было принято решение разработать полностью автономную логистическую систему, представляющую собой самостоятельную ячейку, которая обслуживает определенную географическую зону.

Главной целью этого проекта стало решение проблемы «последней мили», а именно уменьшение времени доставки от распределительных центров до розничных торговых точек или конечного потребителя. Это время называется «окно доставки». Именно широкое окно доставки является главным виновником всех логистических и экономических издержек, так как заказчикам приходится, порой, ждать по несколько часов, когда курьер доставит посылку. Но у клиентов не всегда есть свободное время, чтобы ждать доставщика, и заказчик может просто не дожидаться курьера и уйти по своим делам. Получается, что сотрудник логистической компании съездил просто так, потратив средства фирмы на бензин и т.д. Это самый популярный пример издержки, создаваемым большим и немобильным окном доставки.

В настоящее время известные компании решают эту проблему разными способами. Например [2], компания «Amazon» уменьшает окно доставки введением автономной логистической системы, которая позволяет уменьшить время ожидания до 40 минут и предоставляет возможность заказчику не находиться дома во время доставки. Это очень удачное, с точки зрения логистики, решение мы и взяли за прообраз для своего проекта. Но эту схему было решено адаптировать под наши реалии.

Введение подобного сервиса в нашей стране происходит в несколько этапов. Для начала необходимо определить целевую аудиторию, которая будет пользоваться данным комплексом. В нашем случае это люди, которые проживают в частном секторе. Дело в том, что именно они являются основными потребителями бутилированной воды объемом 19 литров. А также для них есть возможность доставить автономно заказ, так как есть участок земли, на который можно произвести посадку БПЛА (Беспилотный Летательный Аппарат) и произвести автоматическую разгрузку. Для определения целевой аудитории необходимо произвести географическое распределение, чтобы каждая логистическая ячейка могла в установленный срок обслужить клиентов.

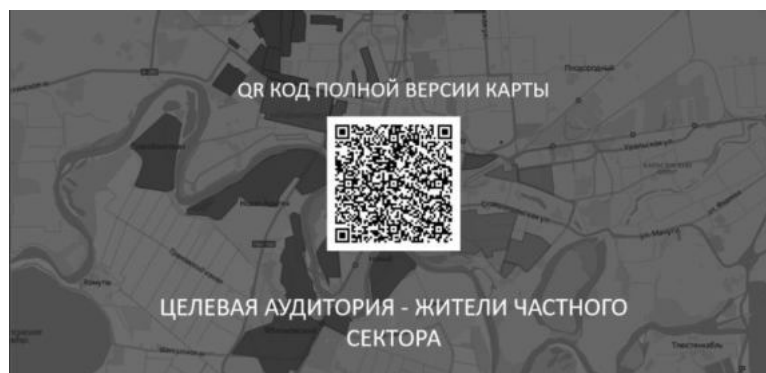


Рис. 1 Полная версия карты логистических зон

Под логистической ячейкой понимается оборудованное под конвейерное использование БПЛА складское помещение.

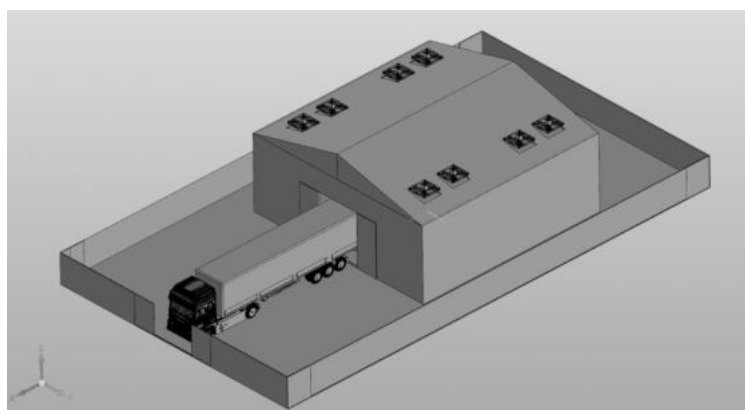


Рис. 2 Внешний вид логистической ячейки №30 по адресу г. Краснодар ул. Им. Г.М. Концевича 30. Именно конвейер является наиболее удобной концепцией работы нашего комплекса.

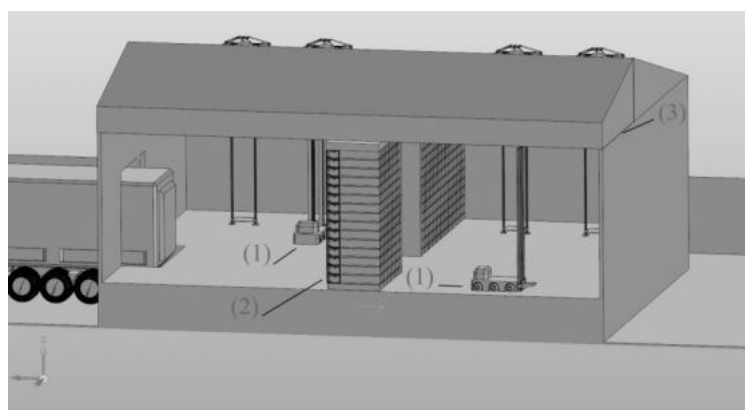


Рис. 3 Вид изнутри логистической ячейки

Для этого в качестве оборудования необходима складская робототехника (беспилотные рохли) (1), которая обеспечит максимально быстрый режим разгрузки и загрузки товара. При этом автономность ячеек будет обеспечиваться большими партиями товара (2), доходящие до 40 тонн, что существенно сократит затраты компании на логистические поставки. Ячейка должна быть обеспечена специальным оборудованием (3), которое позволит долгое время хранить воду пригодной для употребления, а также позволит за достаточно короткий промежуток времени загружать продукцию в БПЛА.

Сам беспилотник обязан быть оборудован специальным захватом. Такой захват был разработан нами для безопасной транспортировки тяжелого груза, весом не менее 20 килограмм.

Захват представляет собой усовершенствованный строительный захват бетонных балок, оборудованный электронным управлением (рис.1). По сути, груз будет держать сам себя своим весом, что позволит увеличить энергоэффективность БПЛА. Он состоит из: сервопривода с прямым редуктором (1), ребер жесткости (2), движущейся шпильчатой части (3), одинарная клещевина (4), упор для груза, оборудованный бугелями (5).

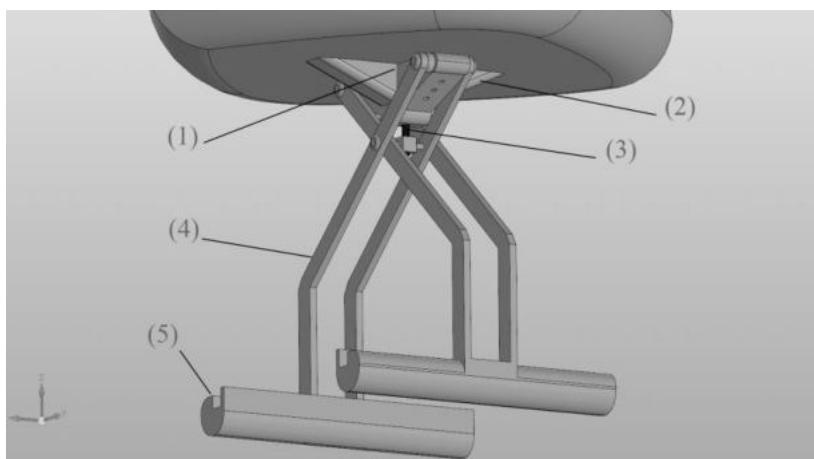


Рис. 4 Внешний вид захвата

Сам БПЛА представляет собой рамный X-образный соосный октокоптер, чья взлетная масса достигает 56 килограмм.

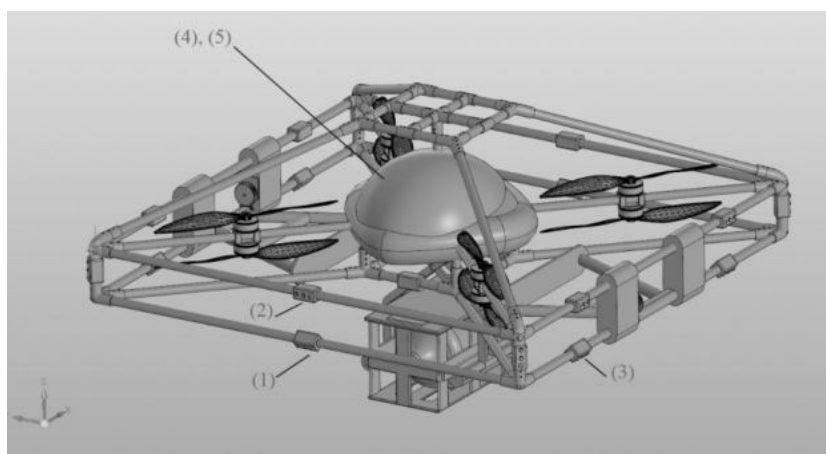


Рис. 5 Внешний вид разработанного БПЛА

Для точного позиционирования в пространстве применяется несколько технологий: камеры периметрального обзора (1) (чьи изображения обрабатываются нейросетью, которая определяет окружающие препятствия и опознает ID ящика, который нужно оставить или забрать [3]), ультразвуковые (2) и инфракрасные датчики (3) (для определения расстояний по периметру), радиоприемники (4) (они нужны для обработки информации с радиомаяков, установленных на ящиках для бутылей), а также двухдиапазонный GPS (5).

Все это оборудование необходимо для того, чтобы БПЛА был в состоянии приземлиться на небольшой и неподготовленный участок земли, произвести автоматическую разгрузку и произвести реверсивную доставку использованной бутылки. От пользователя требуется только забрать бутылку из ящика, закрыть его крышкой и оставить на открытом месте, чтобы БПЛА в следующий раз, когда будет доставлять новый заказ, смог забрать с собой использованную тару. Для этого клиенту нужно вернуть пустую бутылку в ящик и нажать кнопку, которая запускает режим ожидания, чтобы БПЛА смог найти использованный ящик и доставить его на склад. При следующем заказе, когда БПЛА «привезет» новую бутылку и разгрузится, он в автоматическом режиме заберет использованную тару, для последующей ее эксплуатации.

Таким образом, с помощью новых технологий, включающих в себя БПЛА, складскую робототехнику и искусственный интеллект, была создана автономная логистическая система, которая уменьшает окно доставки с нескольких часов до 40 минут и при этом система адаптирована к нашим реалиям и потребовала новых технических решений при создании захвата и самого БПЛА.

Библиографический список

1. Morgan Stanley Fling Cars: Investment Implications of Autonomous Urban Air Mobility
2. <https://habr.com/ru/company/pochtoy/blog/455194/>
3. Головин П.М. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов по изображениям, полученным с БЛА. / Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. – Сборник докладов и статей по материалам II-й научно-практической конференции. – 2017, стр. 48-51.

Введение. Электромагнитные датчики перемещения (сокр. ЭДП) широко применяются в робототехнике, однако, с повышением требований к робототехническим комплексам, растет спрос и на высокоточную измерительную технику. Ведутся поиски схемотехнических решений, алгоритмов и методов обработки сигналов с целью повышения точности одних из наиболее распространенных в промышленности электромагнитных датчиков – резольверов.

Резольвер (синусно-косинусный вращающийся трансформатор, сокр. СКВТ) – это четырехобмоточная двух- и более полюсная электрическая машина с индукционным взаимодействием роторных и статорных обмоток. Достоинства резольверов в том, что они обладают высокой стабильностью работы, механической прочностью, устойчивы в переходных процессах. Резольвер также не имеет синфазного шума при обнаружении углового смещения вала двигателя [1-3].

В данной статье будут рассмотрены уравнения, описывающие работу резольвера (синусно-косинусного вращающегося трансформатора, сокр. СКВТ), и, в соответствии с ними, будет построена имитационная модель в пакете Simintech. По результатам моделирования будет проведена оценка устойчивости к помехам методов обработки сигналов.

Принцип работы и уравнения процессов

Резольвер механически связан с валом двигателя. Отслеживание поворота вала происходит следующим образом. На первичную обмотку подается высокочастотное синусоидальное напряжение. В зависимости от перемещения вала двигателя со вторичных обмоток поступают два аналоговых сигнала. Эти сигналы преобразуются в сигнал для использования в управлении двигателем с помощью различных методов модуляции.

На рис. 1 приведена схема бесщеточного резольвера со статорным кольцевым трансформатором (RT), за счет которого происходит возбуждение ротора. Рассмотрим на его примере порядок составления системы уравнений, описывающих физические процессы.

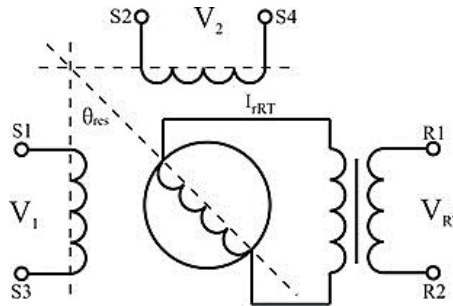


Рис. 1. Схема бесщеточного резольвера

На первичную обмотку кольцевого трансформатора подается переменное напряжение с частотой Ω_e и фазой φ_e :

$$V_{RT} = V_{RTm} \sin(\Omega_e t + \varphi_e) \quad (1)$$

Ток трансформатора – I_{sRT} . Ток ротора можно записать в следующем виде:

$$I_{rRT} = I_{rRTm} \sin(\Omega_e t) \quad (2)$$

Поскольку резольвер является двухфазной машиной, можно записать систему уравнений в соответствии с выражениями (1) и (2) для физических процессов, происходящих в обмотках статора:

$$\begin{cases} V_1 = RI_1 + L \frac{d}{dt} I_1 + \frac{d}{dt} [(L_m \cos(p_{res} \theta_{me})) I_{rRT}] \\ V_2 = RI_2 + L \frac{d}{dt} I_2 + \frac{d}{dt} [(L_m \sin(p_{res} \theta_{me})) I_{rRT}] \end{cases} \quad (3)$$

Или, с учетом взятия производной по переменным угла θ_{me} и тока I_{rRT} :

$$\begin{cases} V_1 = RI_1 + L \frac{d}{dt} I_1 - L_m I_{rRT} p_{res} \Omega_{me} \sin(p_{res} \theta_{me}) + L_m \cos(p_{res} \theta_{me}) \left(\frac{d}{dt} I_{rRT} \right) \\ V_2 = RI_2 + L \frac{d}{dt} I_2 + L_m I_{rRT} p_{res} \Omega_{me} \cos(p_{res} \theta_{me}) + L_m \sin(p_{res} \theta_{me}) \left(\frac{d}{dt} I_{rRT} \right) \end{cases} \quad (4)$$

где:

- Ω_{me} – угловая скорость;
- θ_{me} – угол;
- p_{res} – число полюсов резольвера;
- V_1, V_2 – напряжения вторичных обмоток;
- I_1, I_2 – токи вторичных обмоток;
- R – сопротивление каждой из вторичных обмоток;
- L – индуктивность каждой из вторичных обмоток;
- L_m – взаимная индуктивности первичной и вторичных обмоток;

В состоянии холостого хода в обмотках статора не будет тока, и производные тока будут равны нулю ($I_1 = I_2 = \frac{d}{dt} I_1 = \frac{d}{dt} I_2 = 0$). Тогда в соответствии с формулами (3) и (4):

$$\begin{cases} V_1 = L_m \cos(p_{res} \Theta_{me}) \left(\frac{d}{dt} I_{rRT} \right) - L_m I_{rRT} p_{res} \Omega_{me} \sin(p_{res} \Theta_{me}) \\ V_2 = L_m I_{rRT} p_{res} \Omega_{me} \cos(p_{res} \Theta_{me}) + L_m \sin(p_{res} \Theta_{me}) \left(\frac{d}{dt} I_{rRT} \right) \end{cases}$$

Напряжения содержат два компонента: первый является противо-э.д.с., которая зависит от частоты возбуждения Ω_e (см. формулу (2)), угловой скорости (Ω_{me}) и электрического угла $\Theta_{res} = p_{res} \Theta_{me}$; второй является э.д.с. преобразования и зависит от частоты возбуждения Ω_e (в соответствии с формулой (4): $sI_{rRT} = I_{rRTm} \Omega_e \cos \Omega_e t$) и электрического угла $\Theta_{res} = p_{res} \Theta_{me}$. Это свойство сигналов напряжений V_1 и V_2 позволяет устранить ошибки, зависящие от угловой скорости Ω_{me} . В случае синхронной выборки обоих напряжений V_1 и V_2 , при условии, что $\sin \Omega_e t = 0$ и $\cos \Omega_e t = 1$, ток $I_{rRT} = 0$, производная достигает максимума: $sI_{rRT} = I_{rRTm} \Omega_e \cos \Omega_e t = I_{rRTm} \Omega_e$. Итак, компоненты противо-э.д.с. будут отсутствовать, а э.д.с. преобразования будет зависеть только от положения с максимальной амплитудой $V_m = L_m I_{rRTm} \Omega_e$

$$\begin{cases} V_1 = L_m \cos(p_{res} \Theta_{me}) I_{rRTm} \Omega_e \\ V_2 = L_m \sin(p_{res} \Theta_{me}) I_{rRTm} \Omega_e \end{cases} \quad (5)$$

Из уравнений получаем, что $\Theta_{me} = \Theta_{res} / p_{res}$. Угол может быть рассчитан с использованием стандартных программных решений [4].

Методы обработки сигналов

Рассмотрим методы получения сигнала с резольвера. При измерении сигнала индуктивного датчика происходит модуляция его выходного сигнала напряжением возбуждения. Тогда положение объекта может быть описано либо амплитудой, либо сдвигом фазы результирующего сигнала. Методы обработки сигналов с индуктивных датчиков делятся на несколько групп: методы прямого преобразования, вычисление алгоритмическим способом, вычисление табличным способом и метод следящего преобразования. В данной статье рассмотрим алгоритмический и следящий методы, с остальными более подробно можно ознакомиться в источнике [5].

Вычисление алгоритмическим способом происходит путем разложения в ряд функции $arctg(X)$ по формуле:

$$arctg(X) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \times \frac{X^{2k+1}}{2k+1} \quad (6)$$

В диапазоне углов от 0 до 45° для разрешения 20 разрядов достаточно 5 первых членов ряда, взятых с 32-разрядной точностью.

Метод следящего преобразования широко применяется в современных интегральных схемах (ИС), например, RDC-19220/2/4 от DDC, ACT5028B от Aeroflex или AD2S1210 от Analog Devices. Преобразование строится при помощи контура обратной связи. Контур работает по сигналу ошибки между фазовым углом сигнала на выходе и фазовым углом сигнала на входе преобразователя, а также между скоростью на выходе преобразователя и скоростью, задаваемой сигналами, поступающими на вход. Такая схема даёт нулевую систематическую ошибку по скорости за счёт вычисления её интеграла.

Данный метод позволяет увеличить отношение сигнал/шум за счёт фильтрации сигналов датчиков. При непосредственной фильтрации и обработке сигналов возникает групповая задержка, дающая ошибку при движении. В данном случае фильтрация производится в контуре с обратной связью, производящем интегрирование по скорости и компенсирующем ошибку такого типа.

Функциональная схема блока, реализующего метод следящего преобразования, представлена на рис. 2.

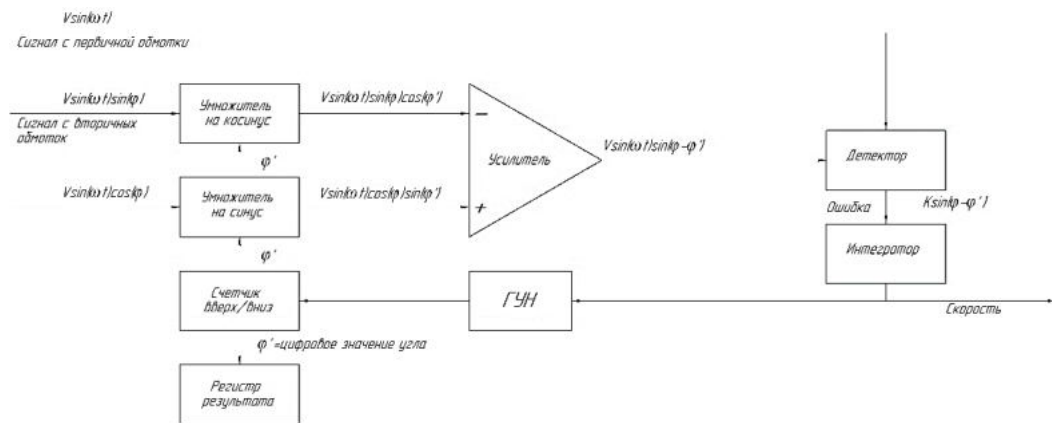


Рис. 2. Схема следящего преобразователя

В узлах «Умножитель на косинус» и «Умножитель на синус» выполняется операция вычисления значений $\cos \varphi'$ и $\sin \varphi'$, где угол φ' – это выход преобразователя, а также умножение полученных значений на входные сигналы преобразователя. Затем решающий усилитель выполняет операцию вычитания. В результате получается сигнал ошибки для следящего контура преобразователя:

$$e = V \sin \omega t [\sin \varphi \cos \varphi' - \cos \varphi \sin \varphi'] = V \sin \omega t \sin(\varphi - \varphi') \quad (7)$$

что примерно эквивалентно $V \sin \omega t (\varphi - \varphi')$ для малых значений $(\varphi - \varphi')$.

Далее в контуре производится детектирование (демодуляция) сигнала ошибки, вычисляется скорость вращения, как интеграл ошибки, и угол поворота, как интеграл от скорости.

Поскольку интегрирование в контуре обратной связи компенсирует постоянную составляющую ошибки измерения, то метод даёт нулевую систематическую ошибку при неподвижном, а также при вращении ротора

датчика с постоянной угловой скоростью. Ошибка больше заявленной точности преобразователя возникает только при угловом ускорении ротора.

Разработка имитационной модели

На рис. 3 представлена имитационная модель резольвера, составленная в пакете Simintech в соответствии с выражениями (5), (6) и (7).

Блок пилообразного сигнала имитирует движение ротора и это изменение входного сигнала нормируется блоком усиления в пределах от $-\pi$ до π . Далее сигнал идет на блоки с тригонометрическими функциями $-\sin x$ и $\cos x$, имитирующих сигналы со вторичных обмоток резольвера. После сигналы выходят на блоки перемножения, через которые организуется обратная связь в системе. При помощи сумматора находится разница (изменение) углов, следовательно – скорость, которую требуется интегрировать. После прохождения через интегратор на выходе будет получен угол. Отдельно введен блок функции арктангенса от двух аргументов для получения угла прямым методом и сравнения с результатами моделирования с наблюдателем угла.

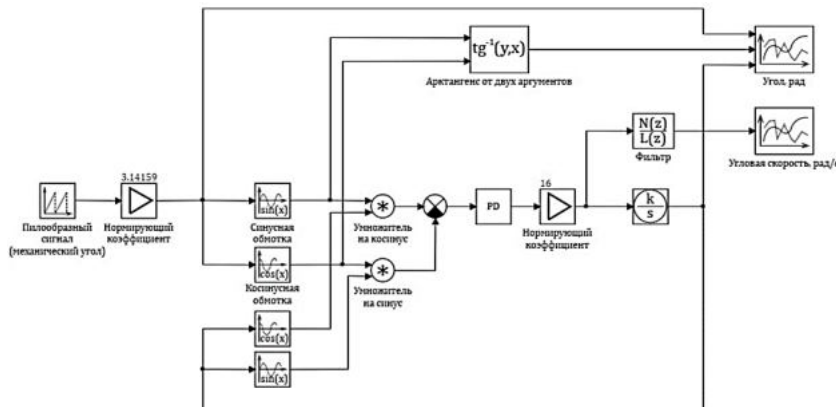


Рис. 3. Имитационная модель резольвера

На рис. 4 представлены сравнительные графики исходного угла, угла, полученного прямым расчетом и угла, полученного системой с наблюдателем. Видно, что существует небольшое запаздывания сигнала угла с наблюдателя, соответственно, в данном случае по ошибке метод с наблюдателем уступает прямому расчету с помощью функции арктангенса.

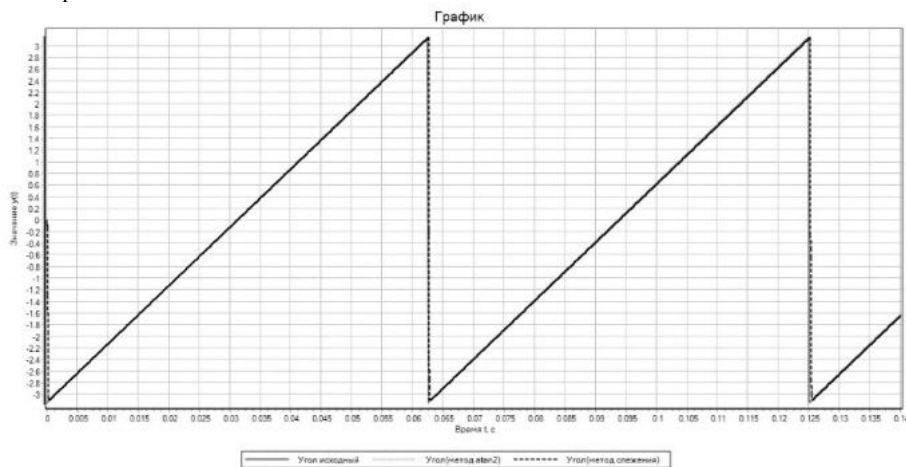


Рис. 4. Результаты моделирования

На рис. 5 представлена предыдущая имитационная модель резольвера, дополненная сигналами шума в сумматорах синуса и косинуса.

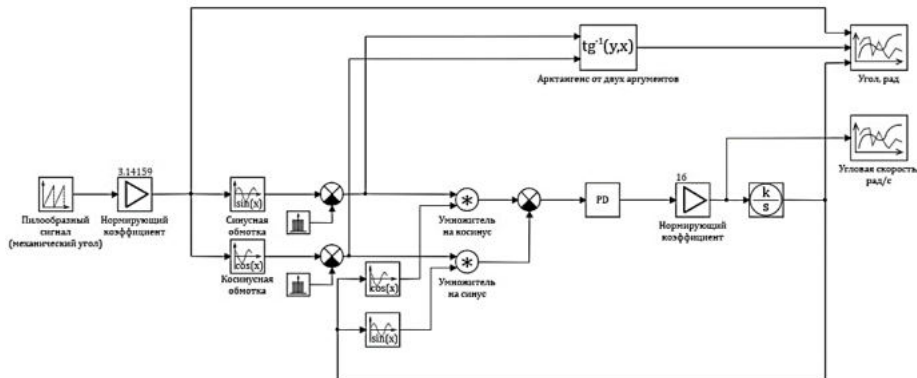


Рис. 5. Имитационная модель резольвера с учетом помех

На рис. 6 и 7 представлены сравнительные графики исходного угла, угла, полученного прямым расчетом и угла, полученного системой с наблюдателем угла при воздействии белого шума с размахом величиной $[-0,5; 0,5]$ (рис. 6) и $[-1; 1]$ (рис. 7). Видно, что в данном случае следящий метод устойчивее к помехам, чем прямой расчет угла.

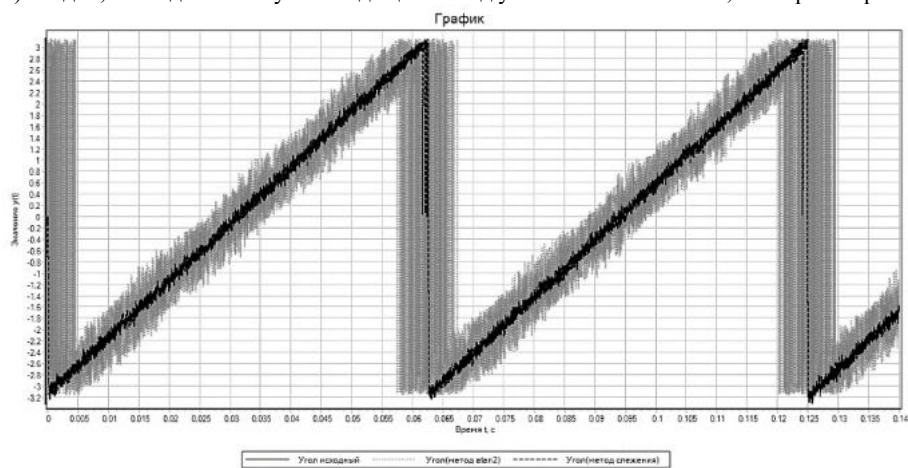


Рис. 6. Результаты моделирования с учетом помех

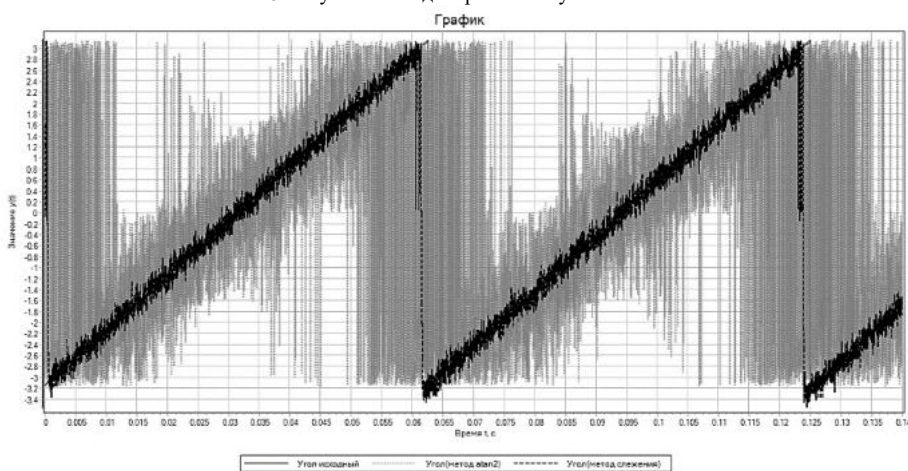


Рис. 7. Результаты моделирования с учетом помех

Заключение. В результате работы были составлены две модели в пакете Simintech с учетом помех и без учета помех. Был проведен сравнительный анализ двух методов получения сигналов – прямого расчета и следящего преобразования. Было выявлено, что при отсутствии помех метод следящего преобразования дает небольшое (порядка одной миллисекунды) отставание от прямого метода расчета. При наличии помех в системе отставание сигнала сохраняется, однако, метод следящего преобразования меньше подвержен помехам даже при увеличении их амплитуды в отличие от прямого метода расчета угла. Подобные отклонения значений угла можно скорректировать путем ввода цифрового фильтра в систему.

Научный руководитель – старший преподаватель Ю.А. Жуков

Библиографический список

1. Юревич Е.И. Сенсорные системы в робототехнике: учеб. пособие / Е. И. Юревич. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 100 с.
2. Воронников С.А. Информационные устройства робототехнических систем: Учеб. пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005 - 384 с.; ил. (Робототехника / Под ред. С.Л. Зенкевича, А.С. Ющенко).
3. Celikel R. ANN based angle tracking technique for shaft resolver. // Measurement. №148. 2019. 106910. doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106910
4. Balkovoy A.P. et al. Resolver-to-digital converters with the arctangent function transformation. // Вестник ЮУрГУ. 2016. Т. 16, № 3. С. 83–92. doi: 10.14529/ctcr160309;
5. Ануфриев, Владимир. Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений [Текст] / В. Ануфриев, А. Лужбинин, С. Шумилин // Современная электроника. - 2014. - № 4. - С. 30-33. - Библиогр.: с. 33

УДК 629.038

РАЗРАБОТКА КОЛЕСНОГО ШАССИ РОБОТА-ЛУНОХОДА

Андреев Я.И., Николаева П.С.

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

Луна – ближайший к нам объект солнечной системы, поэтому люди наблюдали за ней с древних времен. Изобретение Галилеем телескопа в 1609 году вывело исследования на новый уровень. Но действительно большой

скачок произошел с началом изучения Луны с помощью космических аппаратов. С 1959 года на спутнике Земли побывало множество аппаратов, созданных человеком, в том числе и колесные луноходы. [1]

На сегодняшний день Луна является потенциальной территорией для реализации различных научно-технических проектов, связанных с освоением и изучением космического пространства. Важной задачей сейчас является исследование грунта, полученные сведения дадут информацию для инженерных расчётов и проектирования сооружений. Такие перспективные проекты как лунная станция, необходимая для проживания космонавтов и проведения научно-исследовательских работ, международная лунная обсерватория, открывающая огромные возможности на пути к изучению космического пространства и позволяющая разместить телескоп со всем необходимым оборудованием для астрономических исследований в условиях отсутствия атмосферы, требуют длительного пребывания на Луне всей необходимой для их строительства техники. Это оборудование должно будет отвечать самым высоким технологическим требованиям, в том числе долговечности, исключительной надёжности и, конечно, оно будет отличаться от земного, так как физические условия на Луне (грунт покрыт тонким слоем реголита, отсутствует атмосфера, длительность дня и ночи составляет 14 суток 18 часов, а перепад температур между ними от $+127^{\circ}\text{C}$ до -173°C) отличаются от земных и, значит, требуют технического оборудования, спроектированного специально для этих условий. Немаловажную роль играет их мобильность и универсальность.

Важность шасси при исследовании и освоении Луны трудно переоценить. Такой системы требуют многие технические объекты: луноходы, от маленьких роботов-помощников, предназначенных для выполнения простых задач непосредственно в присутствии человека (инженера-строителя или научного работника) до крупных полу или полностью автономных аппаратов, предназначенных для масштабных исследований поверхности Луны в отсутствие человека, поэтому включающих в себя большое количество тяжёлого научно-исследовательского оборудования (буры для грунта, камеры для картографирования, солнечную батарею и др.), платформы для перемещения различных грузов и строительного оборудования, способные выдерживать большие нагрузки и долгий срок эксплуатации.

При создании проекта колёсно-шагающего шасси мы опирались на поставленное техническое задание: проектирование оптимальной конструкции шасси для робота-помощника массой до 30 кг, лунохода для исследования грунта и картографирования массой 100 кг. Первичной задачей было изучение физических условий на Луне, способных препятствовать нормальному функционированию конструкции, и анализ уже имеющихся и успешно показавших себя в эксплуатации конструкций шасси планетоходов. Затем нужно было определиться с концепцией шасси: выбрать тип движителя и принципиальную конструкцию, состоящую из устройства подвесной системы и блоков мотор-колёс.

Рельеф Луны состоит из гор и лунных морей, выделяют также купола, хребты и борозды. Обратная сторона спутника Земли более гористая. «Лунные моря» представляют собой равнинные низменности, пересеченные трещинами и извилистыми валами. Поверхность представляет собой твёрдый грунт, покрытый тонким слоем пыли - реголитом.[2] Поэтому советские разработчики отказались от использования гусеничного движителя для Лунохода-1. Выбор был сделан в пользу восьмиколесного шасси с колесами из проволочной сетки, трущаяся поверхность которых была набрана из титановых лопаток. Каждое колесо оснащалось индивидуальной подвесной системой с использованием особой смазки на основе фтористого соединения для работы в вакууме, герметичными двигателями постоянного тока и независимым тормозом. Луноход-1 имел высокую массу 756 кг и довольно большой размер, поэтому восьмиколесное шасси для него было оптимальным. Поворот «Лунохода-1» осуществлялся путем изменения скорости и направления вращения колес левого и правого борта.[3]

В нашем же случае, когда речь идет о массе лунохода до 30 кг в легком варианте и 100 кг — в тяжелом, оптимальным стало шестиколёсное шасси, т. к. его проходимости и устойчивости будет достаточно для аппарата небольших размеров.

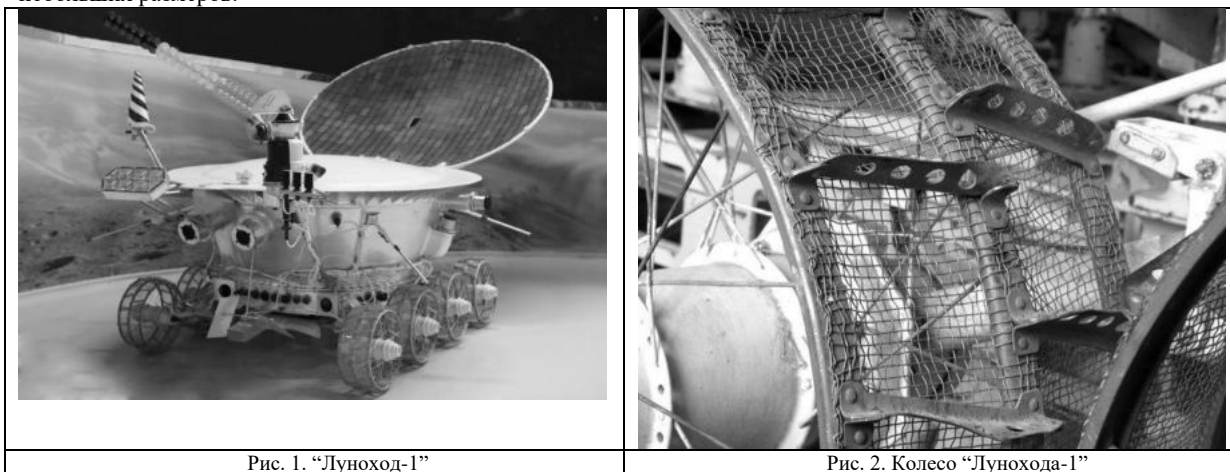


Рис. 1. «Луноход-1»

Рис. 2. Колесо «Лунохода-1»

Спустя более 40 лет в Китае была создана серия луноходов — «Юйту» и «Юйту-2». Их масса составила 140 кг при габаритах 1.5x1x1.1м. «Юйту» проработал всего 40 дней. После анализа ошибок был создан «Юйту-2», запущенный на обратную сторону Луны в 2019 году. Он работает до сих пор, показав высокую надежность.[4] Колёса китайских луноходов по конструкции аналогичны колёсам Лунохода-1 и Лунохода-2. В этой конструкции шасси, в отличие от советского лунохода, крайние колеса могут поворачиваться, что повышает маневренность. Данные луноходы ближе по массе и размерам к поставленному перед нами техническому заданию, поэтому особенности их конструкции были приняты во внимание при разработке проекта шасси для робота-помощника и лунохода.

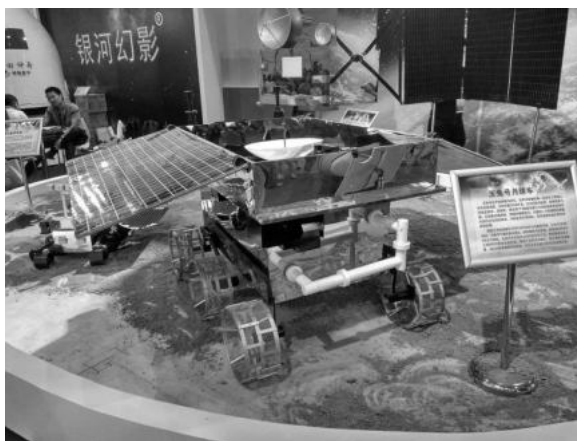


Рис. 3. Макет лунохода “Юйту”

Американское агентство НАСА отправило на Марс несколько марсоходов. У рассмотренных нами “Спирита” и “Кьюриосити” есть общая особенность - шестиколесное шасси с поворотными передними и задними колесами. Такой механизм реализован за счет сервоприводов, действующих независимо от электродвигателей, приводящих аппарат в движение. Кроме того, из-за большой задержки сигнала с Земли, дистанционное управление марсоходом становится практически невозможным. Поэтому марсоходы имеют высокую автономность, то есть они сами способны преодолевать различные препятствия, без участия человека, этим и была обусловлена сложная конструкция подвесной системы.[5]



Рис. 4. Марсоход “Спирит”

В результате анализа разных конструкций планетоходов выяснилось, что наиболее подходящей конструкцией шасси для нашего лунохода является шестиколесная. Такое шасси имеет не только высокую устойчивость, но и хорошую проходимость. Вращение колес осуществляется за счет электродвигателей. Электродвигатели используются потому, что для них на Луне есть неиссякаемый источник энергии - Солнце. С помощью солнечных батарей полученная энергия запасается в аккумуляторах.

На рисунке 5 представлена трехмерная модель разработанного шасси. Оно снабжено шестью мотор-колесами. Два передних колеса с каждого борта имеют зависимую подвеску. Аналогично задние колеса имеют зависимую друг от друга подвесную систему. Блоки колес крепятся к раме, на которой также будут закреплены солнечные батареи, система управления и вспомогательное оборудование. Для увеличения маневренности в проекте шасси предусмотрены крайние поворотные колеса. Как и у аналогов, колеса должны быть сделаны из прочной сетки с лопатками для хорошего сцепления с грунтом. Главным отличием от уже имеющихся луноходов является применение шагающей конструкции. Четыре сервопривода расположены в месте крепления к корпусу двух передних пар колёс и в подвесной системе двух задних колёс. Шагание будет осуществляться следующим образом: колёса попеременно передвигаются, в то время как корпус остаётся неподвижным, затем происходит перенос корпуса параллельно шасси. Эта функция особенно эффективна при преодолении сложных участков поверхности Луны, например, на крутых подъёмах по сыпучему грунту, а также для перераспределения массы в случае застревания лунохода.



Рис. 5. Трехмерная модель разрабатываемого шасси

Ведется доработка модели для создания макетного образца, а также выбор электродвигателей, сервоприводов. Макетный образец позволит выявить недостатки и внести необходимые доработки в модель шасси. В дальнейшем будет проведена работа по адаптации шасси под конкретные задачи.

Библиографический список

1. Автоматические шасси Луноходов. [Электронный ресурс]. URL:<http://www.vniitransmash.ru/engineering/kosmos.html> (дата обращения: 29.03.2022).
2. Реголит. [Электронный ресурс]. URL:<https://ru.wikipedia.org/wiki/Реголит> (дата обращения: 04.04.2022)
3. М. И. Маров, У. Т. Хантресс: «Советские роботы в Солнечной системе. Технологии и открытия. ФИЗМАТЛИТ, 2013. 612 с.
4. Китайский луноход Yutu. [Электронный ресурс]. URL:<https://www.astronews.ru/cgi-bin/mng.cgi?page=news&news=5126> (дата обращения: 01.04.2022).
5. Марсоходы, которые изменили всё. [Электронный ресурс]. URL:<https://dtf.ru/science/131106-longrid-marsohody-kotorye-izmenili-vse-itogi-missii-spirit-i-opportunity> (дата обращения: 30.03.2022).

УДК 629.7.01

ТЕСТИРОВАНИЕ СПУТНИКОВ В ФОРМАТЕ CUBESAT С ПОМОЩЬЮ ЗАПУСКА ВЫСОТНОГО МЕТЕОЗОНДА

А.В. Кададова, В.В. Уткин

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

Наноспутники представляют из себя малые космические аппараты (КА) весом от 1 до 10 кг. Большую часть выведенных наноспутников на орбите представляют спутники в формате CubeSat. По статистике на апреля 2021 года из 1684 выведенных наноспутников 1553 сверхмалые аппараты в формате CubeSat [1]. Данный формат подразумевает размер одного юнита 10x10x11.35 см называемого "1U" (У-Юнит) весом до 1,33 кг. Существуют также форматы 2U и 3U, имеющие размеры 10x10x22.7 и 10x10x34.05 см соответственно, и форматы с наибольшим числом юнитов или меньше 1U, например, самый маленький из существующих CubeSat имеет размер 0,25U.

Спутники формата CubeSat используются для мониторинга атмосферы, съемки поверхности Земли, отработки части сложных систем будущих больших космических аппаратов и других целей. Важнейшим преимуществом CubeSat по сравнению с большими КА является его дешевый запуск и стоимость аппарата из-за малого объема и веса. Однако, любой, даже малый КА, необходимо протестировать для будущего использования в космическом пространстве.

Был проведен качественный анализ успешно выполненных миссий на спутниках CubeSat с 2000 по 2018 год, представленный на рисунке 1 [2]. Результаты показывают, что 10% аппаратов уже при выводе на орбиту находились в нерабочем состоянии, 9,8% отказали при неудачном запуске при выведении 5,6%, - потеряны на раннем сроке эксплуатации, 38 % - обеспечили только частичное выполнение запланированных миссии, и только 25, 2% процента успешно выполнили поставленные задачи полностью. Оставшиеся 11,7 % процентов неизвестны ввиду закрытых публичных данных.

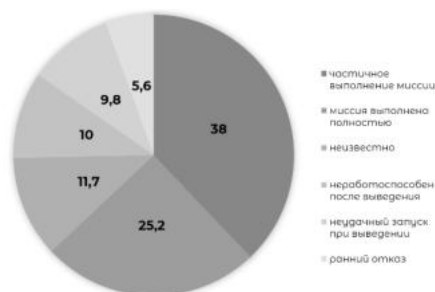


Рисунок 1 – Статистический анализ миссий CubeSat с 2000 по 2018 год

Увеличить вероятность успешной отработки миссии в космосе может проведение испытаний в околокосмическом пространстве при помощи стратосферных запусков. Стратосферный запуск высотного метеозонда представляет собой подъем шара из резиновой или пластиковой оболочки, наполненной водородом или гелием. К метеозонду прикрепляется связка с аппаратами, поднимающимися на высоты 30—40 км. Затем происходит разрыв шара и приземление аппаратов на парашютной системе спасения. Во время запуска метеозонд проходит гистерезисную температурную петлю в среднем от 30 °С до -60 °С градусов в летнее время, так как температура над уровнем Земли зависит от погодных условий. Давление на высотах 30 км становится незначительным около 1,5 – 2 кПа. По прямой метеозонд может удалиться на расстояние в среднем 50-100 км, данные значения зависят от ветров, скорости спуска, времени полёта и прочего. Пример траектории полёта по GPS с запуска 2019 года представлен на рисунке 2.

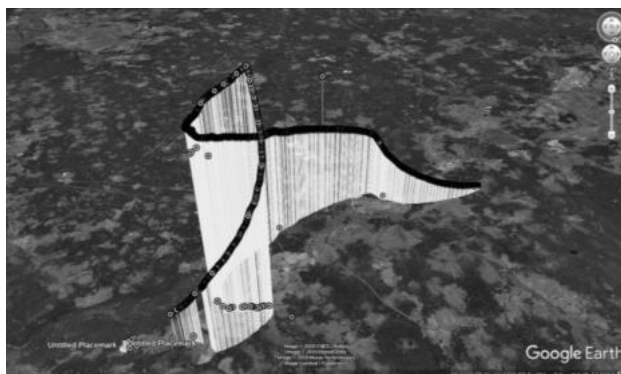


Рисунок 2 – Траектория полета по GPS координатам, принятым в реальном времени

Однако, в стратосфере возможно проведение не всех необходимых перед запусками испытаний. Основные испытания, предъявляемые к малым спутникам:

- 1) Термовакuumное тестирование;
- 2) Испытание обезвешиванием;
- 3) Тестирование на вибростенде;
- 4) Тестирование электромагнитной совместимости;
- 5) Тестирование на ударные нагрузки;
- 6) Магнитная калибровка и тестирование [3].

Термовакuumное тестирование представляет собой имитацию космического пространства с испытаниями при низком давлении и перепадах температур в больших диапазонах. Данные испытания проводятся на земле при помощи вакуумной камеры. В таких камерах присутствует регулировка уровня вакуума, система терморегулирования, автоматическая система управления. Отличие тестирования в стратосфере является меньший диапазон заданных температур, однако, вакуумные камеры занимают место и имеют большую стоимость. Покупка подобной камеры нецелесообразно при необходимости тестирования малого количества малых КА.

Второе тестирование: испытание обезвешиванием необходимо для отработки и анализа динамики раскрытия подвижных узлов КА. Пример раскрытых частей спутника в формате показан на рисунке 3. На земле для достижения обезвешивания необходимо приложить к аппарату ускорение обратное ускорению свободного падения. Существуют 3 методики обезвешивания: пассивная, пассивно-активная, активная. В активных системах обезвешивание достигается посредством регулирования момента создаваемым электроприводом, в пассивных – посредством использования противовесов, в комбинированных (пассивно-активных) - сочетаются свойства первых двух систем. Подобные стенды сложны по своей конструкции и имеют значительные габариты, при этом отдельные стенды рассчитаны на конкретные силы и нагрузки, поэтому они имеют индивидуальный характер [4]. Во время стратосферного запуска после разрыва шара-зонда при падении возникает невесомость, если при баллистической траектории самолет может достигать кратковременное состояние невесомости в среднем 25 секунд, то во время запуска — это время дольше. В этот момент можно протестировать раскрытие антенн, солнечного паруса и других сложных механических систем. Достоинством такого тестирования является совокупность соблюдения других условий, приближенных к космическим исследованиям, и малой стоимости.



Рисунок 3 – Модель спутника CubeSat в раскрытом положении 3U Сторк-7 (Польша)

Электромагнитная совместимость предназначена для проверки эффективности экранирования и ослабления электрических помех. На земле для подобных испытаний используют безэховую камеру, которая поглощает все отражения звуковых или электромагнитных волн от внутренних и наружных источников. В стратосфере на больших высотах разрежена атмосфера и менее зашумлен канал связи, это дает возможность проверить на электромагнитную совместимость.

При спуске общая связка входит в различные ветровые потоки и никак не стабилизируется, поэтому аппараты подвергаются сильной вибрации. Это можно соотнести с тестированием на вибростенде.

С 2018 по 2020 наша команда участвовала Всероссийском чемпионате «Воздушно-инженерная школа» («Cansat в России») [5]. Нашей командой были разработаны два стратосферных зонда. Научная нагрузка аппаратов повторяла реальные задачи малых космических аппаратов: происходило измерение параметров атмосферы: температуры,

давления, влажности, состава воздуха, геомагнитного поля и т.д., было отслеживание траектории полета с помощью GPS, велась передача данных через радиоканал на Землю, также происходил мониторинг поверхности Земли через камеры, и велась резервная передача и сохранение данных на внешней носитель. Оба аппарата совершили полет в стратосферу, после которого были получены и проанализированы все данные.

Подобные стратосферные запуски могут заменить дорогие и сложные стенды для имитации космических воздействий на КА. Главным достоинством предложенного метода является дешевое комбинированное тестирование аппарата, его научной аппаратуры или отдельных частей будущего КА. Например, отдельная отработка передачи телеметрии на дальние расстояния. Дополнительными достоинствами является возможность проанализировать ошибки после нахождения аппарата за неимением данных передающихся в реальном времени, что по сравнению с возникновением аналогичной ситуации после вывода в космическое пространство сделало бы невозможным проведение достоверного анализа ошибок. Успешная отработка спутников в стратосфере увеличила бы вероятность отработки всех миссий в космосе, что повлекло бы за собой изменение распределения статистики по успешным запускам, уменьшило бы необходимость выведения большего количества аппаратов и сократило бы количество будущего космического мусора.

Библиографический список

1. Nanosats Database [Электронный ресурс] // Электрон. дан. URL: <https://www.nanosats.eu> (дата обращения: 01.04.2021).
2. M. A. Swartwout, "CubeSat Mission Success: Are We Getting Better?", presented at the 2019 CubeSat Developers Workshop, San Luis Obispo, CA, 23 April 2019. [Электронный ресурс] // Электрон. дан. URL: https://drive.google.com/file/d/13Ap7bpefBqVa02psjm_6GoFryDTwvFIS/view (дата обращения: 01.04.2021).
3. CUBESAT TESTING [Электронный ресурс] // Электрон. дан. <https://www.cubesat.org/testing>. (дата обращения: 01.04.2021).
4. Зарницын А.Ю., Звонцова К.К. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕРТИКАЛЬНОГО КАНАЛА АКТИВНОЙ СИЛОКОМПЕНСИРУЮЩИЙ СИСТЕМЫ // сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 45-48 с.
5. «Воздушно-инженерная школа»: [Электронный ресурс] // Электрон. дан. <http://roscansat.com/> (дата обращения: 01.04.2021).

УДК 621.865.8

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЕЛЬТА-РОБОТА

Л.А. Савченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

Дельта-робот – это устройство манипулятора с параллельной кинематикой, запатентованное Реймондом Клавзлем в начале 1980-х. Необходимость использования дельта роботов в производстве связана с потребностью выполнения большого количества операций за наименьшее время. Высокая скорость работы является главной особенностью, с одной стороны. С другой стороны, сложность использования данного типа роботов заключается в разработке программного обеспечения для решения прямой и обратной задачи кинематики [1].

Обратная задача кинематики подразумевает под собой определение обобщенных координат подвижных звеньев при известных значениях координат подвижной платформы. Прямая задача подразумевает под собой определение координат подвижной платформы при известных значениях обобщенных координат подвижных звеньев. Расчетная схема дельта-робота представлена на рис.1. Система координат $O-X_0Y_0Z_0$ расположена в центре неподвижной платформы, система координат $P-X_1Y_1Z_1$ в центре подвижной платформы, платформы оснований представляют собой окружности, описанные вокруг равносторонних треугольников с вершинами a_1, a_2, a_3 и B_1, B_2, B_3 соответственно.

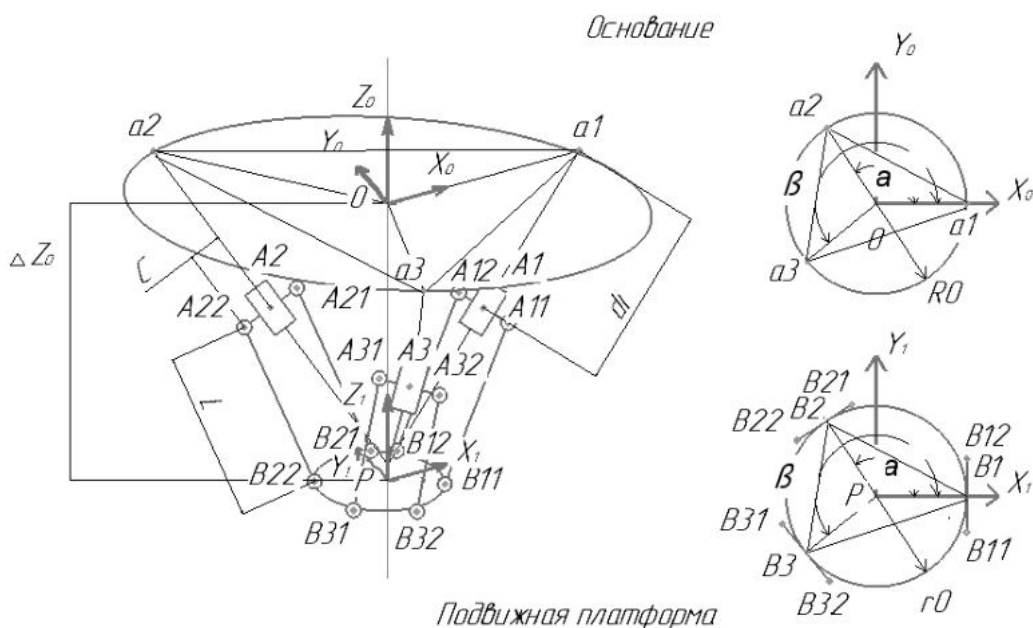


Рис. 1. Расчетная схема дельта-робота

Дельта-робот образован неподвижным основанием и подвижной платформой. На окружности неподвижного основания, с радиусом R_0 расположены точки крепления штанг a_1, a_2, a_3 . На каждой штанге располагается подвижный ползун, связь между подвижными ползунами и подвижной платформой обеспечивается тремя одинаковыми кинематическими цепями [2] под углами $\alpha=60^\circ$ и $\beta=120^\circ$ относительно друг друга. Каждая кинематическая цепь, которая представляет собой параллелограмм, образована точками A_{ij} , (где $i=1\dots3$ – номер ползуна; $j=1,2$ – номер двухподвижного шарнира ползуна), и точками двухподвижных шарниров B_{ij} , расположенными на окружности подвижной платформы с радиусом r_0 . Точка s – половина длины поперечного звена, L – длина продольного. Координаты точек x_i, y_i, z , относящиеся к подвижным ползунам, определяются следующим образом:

$$x_i = R_0 * \cos\alpha \pm c * \sin\beta, \quad (1)$$

$$y_i = R_0 * \sin\alpha \pm c * \cos\beta, \quad (2)$$

$$z_i = d_i. \quad (3)$$

Координаты точек x_i, y_i, z , относящиеся к подвижной платформе, определяются аналогичным образом:

$$x_i = r_0 * \cos\alpha \pm c * \sin\beta, \quad (4)$$

$$y_i = r_0 * \sin\alpha \pm c * \cos\beta, \quad (5)$$

$$z_i = \Delta Z, \quad (6)$$

В качестве обобщенной координаты выбираем длину от неподвижного основания до центра ползуна, d_i ($i=1\dots3$), определяем с помощью формулы:

$$d_i = z_{Ai} = z_{Bi} + \sqrt{L_i^2 - x_{Bi}^2 - x_{Ai}^2 - y_{Bi}^2 - y_{Ai}^2}. \quad (7)$$

Виртуальный прибор для изменения положения характерных точек параллельных кинематических цепей дельта-робота [3], разработан в среде LabView. Лицевая панель прибора представлена на рис.2. Разработанный манипулятор [4] с параллельной кинематикой, представлен на рис.3.

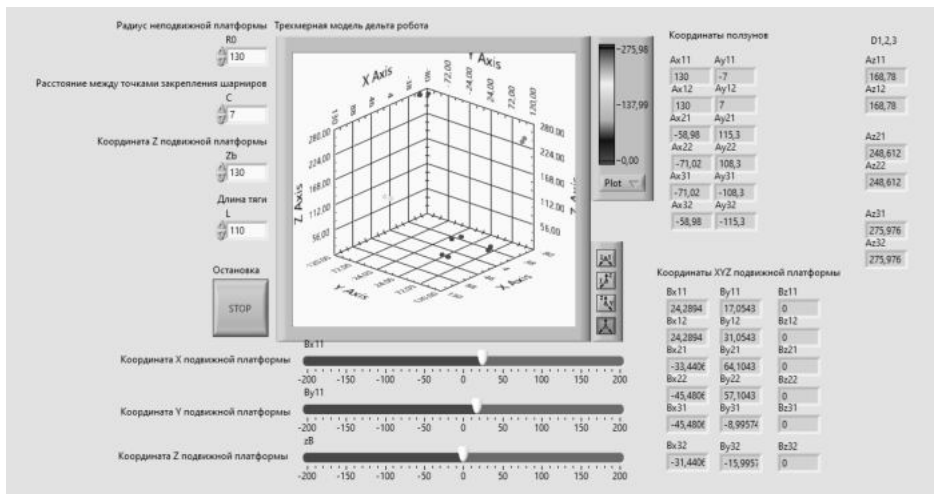


Рис. 2. Лицевая панель виртуального прибора

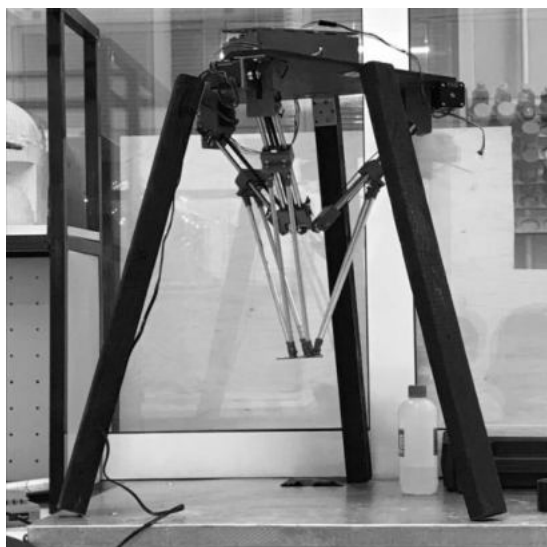


Рис. 3. Прототип дельта-робота

Результат имитационного и физического моделирования подтвердил достоверность полученных данных, и может быть использован при разработке манипуляторов с параллельной структурой в промышленности и в учебных целях.

Библиографический список

1. Методы моделирования мехатронных систем [Текст]: учеб. пособие / Л. В. Ручкин, Н. Л. Ручкина; СибГУИм. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2018. – 80 с.
2. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Расчет и конструирование мехатронных модулей: учебное пособие – М.: ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2012 – 189-235 стр.
3. Афанасьева Т. В., Кувайскова Ю. В., Фасхутдинова В. А. Алгоритмы и программы: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 227 с. – Текст : непосредственный.
4. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т. 2. – 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 912 с.: ил.

УДК 621.865.8

СОЗДАНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО РОБОТА ДЛЯ УЧЕБНЫХ ЦЕЛЕЙ

Л. А. Савченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Сферический (шарообразный) робот — это разновидность мобильных роботов, конструкция которых представляет собой герметичную оболочку в форме шара, с расположенной внутри несущей рамы. Существуют различные виды компоновки робота: основанные на маятниковом приводе основного движения [1]; на электромагнитных приводах; на электроприводах и т. д.

Главной особенностью сферических роботов является герметичность внешней оболочки без технических отверстий для вывода осей, валов, ведущих колес. Сферическая геометрия устройства позволяет совершать перемещение по всем направлениям, обеспечивая высокую надежность и маневренность. Присутствует возможность, в динамике не меняя движитель на другой, перехода из жидкой среды в твердую, и наоборот [2]. Этот факт позволяет данному классу роботов быть эффективными в исследовательской сфере при экстремальных условиях, и в военных целях, при разведывательных операциях.

На сегодняшний день, в высших образовательных учреждениях наблюдается проблема практического применения изученных теоретических материалов в такой предметной области как робототехника. В качестве решения данной проблемы рассматривается введение нетрадиционных подходов к созданию мобильных роботов, а также использование в учебных целях подобной конструкции.

Проведя анализ существующих аналогов, была создана конструкция робота [3], и описан принцип его действия, представленный на рис. 1.

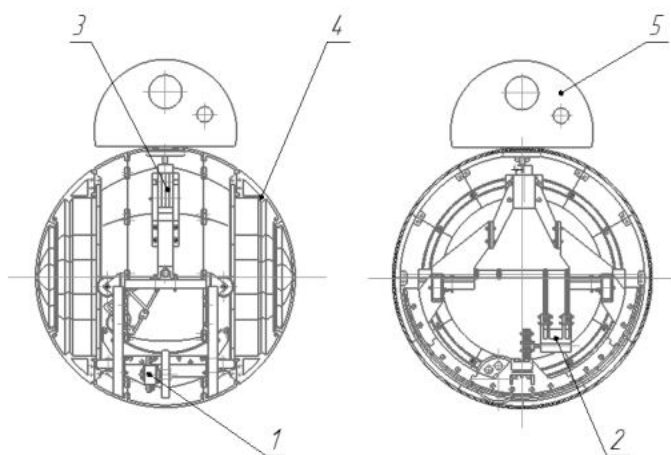


Рис. 1. Чертеж сферического робота



Рис. 2. Сферический робот с насадкой



Рис. 3. Сферический робот в разобранном состоянии

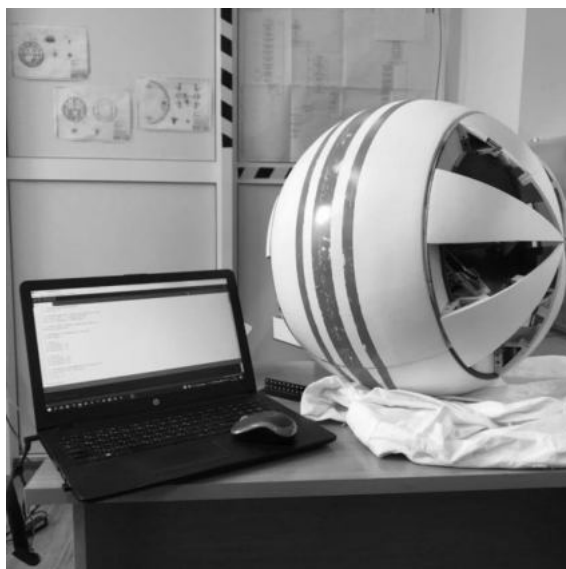


Рис. 4. Сферический робот без насадки

За вращение внешнего сферического корпуса 4 отвечает привод основного движения 1, который располагается внутри конструкции. Вращение колеса выходного вала вышеуказанного привода обеспечивает плавное движение СР вперед - назад. За наклон робота отвечает привод поворота 2, который расположен над приводом основного движения, СР наклоняется благодаря смещению центра масс, которым и является привод поворота. Привод вращения головы 3 передает крутящий момент непосредственно на головную насадку 5, что обеспечивает ее вращение на 360 градусов. Сконструированный сферический робот представлен на рис.2, 3.

Разработанный сферический робот показывает возможность применения нетрадиционных подходов в дисциплинах, связанных с конструированием мобильных роботов в образовательной сфере.

Библиографический список

1. Патент №2315686 Российская Федерация В25J 9/00, В25J 11/00, опуб. 27.01.2008 г.
2. Патент №106215 Российская Федерация В62D, М. кл., опуб. 10.07.2011 г.
3. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Расчет и конструирование мехатронных модулей: учебное пособие. М.:ГОУВПОМГТУ «Станкин»,2012. 189.235с.

УДК 629.7.018

ТЕРМОВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ПРИВОДА ПЛАТФОРМЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д.В. Новицкая, Е.Д. Антоенко, О.И. Желтышев, А.В. Горбунов

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

В 2016-2018 годах в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова совместно с АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнёва была проведена НИОКТР на тему «Разработка типоразмерного ряда прецизионных мехатронных устройств стабилизации, позиционирования и наведения бортовой аппаратуры космической и авиационной техники». В рамках НИОКТР было разработано мехатронное устройство с параллельной кинематикой и шестью степенями свободы «Гексапод». Высокоточное позиционирование платформы с установленной полезной нагрузкой обеспечивается шестью линейными приводами, шарнирно соединенными с платформой и неподвижным основанием. Механизмы с параллельной кинематикой позволяют обеспечивать высокую точность позиционирования, жесткость системы, быстродействие и грузоподъемность. Разработанное мехатронное устройство предназначено для работы в составе космического аппарата в системе наведения и позиционирования крупногабаритных антенн-рефлекторов. К устройствам, предназначенным для работы в открытом космосе, предъявляются повышенные требования по устойчивости к внешним воздействиям, в числе которых – глубокий вакуум и широкий диапазон температурных воздействий. Для проверки устойчивости устройства к данным видам нагрузок проводятся наземные испытания механизма и его узлов.

Объектом исследования данной работы является электромеханический линейный привод (ЛП).

Целью работы является подтверждение работоспособности элементов конструкции ЛП платформы с параллельной кинематикой космического назначения в условиях вакуума и заданном температурном диапазоне путём проведения наземных термовакуумных испытаний, для чего потребовалась разработка стенда для проведения термовакуумных испытаний электромеханических ЛП, который бы обеспечивал контроль градиента температур ЛП и его работоспособности в вакуумной камере.

На рис.1 представлена кинематическая схема ЛП, иллюстрирующая принцип его работы.

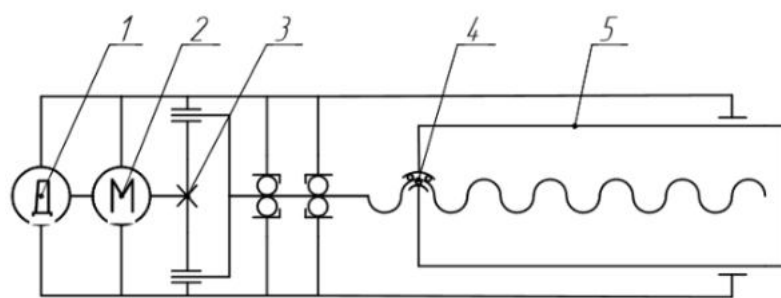


Рис.1. Кинематическая схема ЛП

Двигатель 2 вращает волновой редуктор 3. На выходном валу волнового редуктора установлен шарико-винтовой механизм 4, преобразующий вращательное движение вала в поступательное движение выходного штока 5. Обратная связь по угловому положению двигателя обеспечивается датчиком углового положения 1.

ЛП должен сохранять работоспособность и стабильность функционирования в условиях воздействия открытого космоса. Поскольку проведение натурных испытаний в составе «гексапода» и всего летательного КА нерациональны, для экспериментальной отработки и подтверждения надежности функционирования элементов конструкции целесообразно использовать стендовые испытания с искусственным воспроизведением требуемых эксплуатационных воздействий в наземных условиях.

Для проведения термовакуумных испытаний ЛП был разработан стенд, функциональная схема которого представлена на рис. 2.

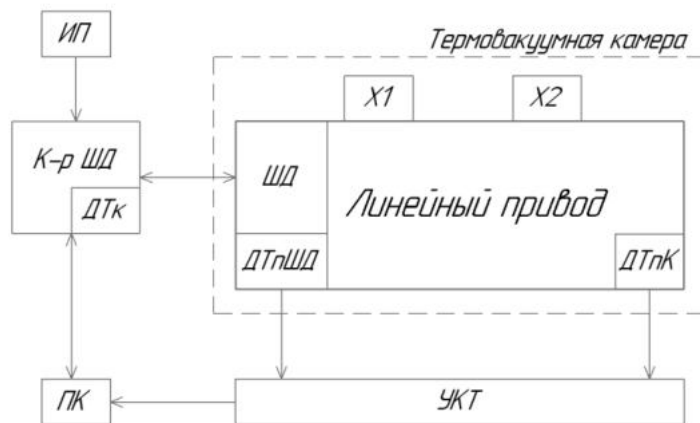


Рис.2. Функциональная схема стенда для проведения термовакуумных испытаний

В качестве двигателя в конструкции ЛП был задействован биполярный шаговый двигатель (ШД) Nema 11 FL28STH32-0674 с углом шага 1.8° , фазовым током 670мА и напряжением 6.2В.

Для управления ШД был использован контроллер 8SMC4-USB (К-р ШД), производства компании Standa. Контроллер подключается к персональному компьютеру (ПК) и позволяет осуществлять дальнейшее управление ШД при помощи графического интерфейса программного обеспечения XILab. Кроме различных режимов движения данный контроллер способен обеспечить деление шага ШД до $1/256$, скорость вращения до 35000 шаг/с и регистрацию тока, потребляемого его обмотками посредством встроенного датчика тока (ДТк). Для обеспечения требуемых значений питания был использован лабораторный источник питания (ИП) АК ИП-1104, обеспечивающий контроллер ШД питанием в 12В и 1А.

Для измерения градиента температур конструкции ЛП были использованы датчики температуры в виде терморезисторов с платиновым чувствительным элементом Pt100: в корпусе KN1515 – установлен в корпус подшипникового узла (ДТпК), в корпусе ДТС014 – установлен на ШД (ДТпШД).

Показания датчиков температуры конструкции ЛП были промывты и смазаны с помощью восьмиканального устройства контроля температуры (УКТ) УКТ38-Щ4 производства компании Овен.

Стенд был помещён в термовакуумную камеру ВК-1000 для обеспечения требуемых условий испытаний. Термовакуумная камера ВК-1000 объёмом 1 куб.м. позволяет обеспечить условия вакуума до величины $1.0 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. и диапазон температур на термоплате от -70 до $+200^\circ\text{C}$.

ЛП с помощью медных хомутов (Х1 и Х2) был установлен на термоплате, провода датчиков температуры и ШД были предварительно экранированы, а затем выведены наружу через разъем термовакуумной камеры.

Перед началом испытаний элементы конструкции ЛП были промыты и смазаны. В качестве смазочного материала была использована смазка ВНИИ НП-284 (АМЕТИСТ), предназначенная для длительной работы в подшипниках и зубчатых передачах в интервале температур от -110 до $+200^\circ\text{C}$ и обладающая повышенной стойкостью к различным агрессивным средам, в том числе к воздействию глубокого вакуума. Во время испытаний ЛП работал на холостом ходу.

Испытания проводились в три этапа, перед началом каждого из которых ЛП был разобран, детали волнового редуктора, шарико-винтовой передачи и подшипников промыты в ультразвуковой ванне с бензином, высушены и собраны заново с использованием свежего смазочного материала. Затем ЛП устанавливался в стенд, размещённый в термовакуумной камере. Регулятором вакуумной камеры задавалось давление, равного $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. и

производилась откачка воздуха в течении времени, нормированного камерой до достижения заданного значения давления. Работоспособность привода проверялась как до, так и после набора вакуума на каждом этапе.

На первом этапе испытаний производился постепенный нагрев ЛП путем ступенчатого увеличения температуры термоплиты от +25 до +100°C. На каждой ступени на с помощью регулятора термовакuumной камеры на термоплите выставлялось заданное значение температуры и выдерживалось время, необходимое для стабилизации переходных процессов, после чего проводилась регистрация показаний датчиков температуры и тока во время осуществления ЛП рабочего цикла. Между ступенями испытаний выдерживался интервал в 15°C, таким образом, что термоплита последовательно нагревалась до +40°C, +65°C, +70°C, +85°C и +100°C. После проведения измерений на семи ступенях, первый этап испытаний был завершён. Результаты измерений первого этапа испытаний представлены на рис.3 и в табл.1.

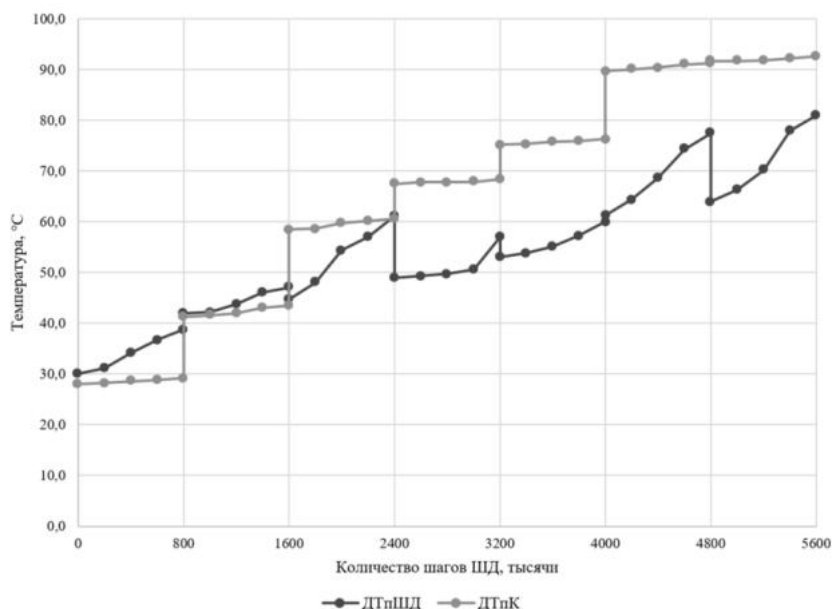


Рис.3. Результаты 1-го этапа испытаний

Табл.1. Результаты 1-го этапа испытаний

Температура плиты, °C	Рабочий цикл, кол-во шагов, направление	Температура, °C		Ток потребления ШД, мА
		ДТпШД	ДТпК	
25	Нач.усл.	30	28	315
	200000 шагов втягивание	31,2	28,3	318
	200000 шагов выдвигание	34,2	28,6	318
	200000 шагов втягивание	36,7	28,8	319
40	Нач.усл.	42	41,3	325
	200000 шагов втягивание	42,2	41,6	327
	200000 шагов выдвигание	43,8	42	327
	200000 шагов втягивание	46,1	43,1	326
65	Нач.усл.	47,1	43,5	326
	200000 шагов втягивание	44,7	58,5	315
	200000 шагов выдвигание	48	58,7	320
	200000 шагов втягивание	54,4	59,8	320
70	Нач.усл.	57,1	60,2	320
	200000 шагов втягивание	61,1	60,6	320
	Нач.усл.	49	67,5	320
	200000 шагов втягивание	49,3	67,8	340
85	200000 шагов выдвигание	49,8	67,8	340
	200000 шагов втягивание	50,6	67,9	340
	Нач.усл.	57	68,4	340
	200000 шагов втягивание	53,1	75,2	340
100	200000 шагов выдвигание	53,9	75,4	340
	Нач.усл.	55,1	75,8	340
	200000 шагов втягивание	57,3	76	340
	Нач.усл.	60	76,3	340
100	200000 шагов втягивание	61,3	89,8	410
	Нач.усл.	64,4	90,1	420
	200000 шагов выдвигание	68,7	90,5	420
	200000 шагов втягивание	74,3	91	420
100	Нач.усл.	77,5	91,3	420
	Нач.усл.	64	91,7	320
	200000 шагов втягивание	66,3	91,7	320
	200000 шагов выдвигание	70,2	91,8	420
100	Нач.усл.	78	92,2	420
	200000 шагов втягивание	81	92,6	350

После снижения температуры стенда до комнатной, ЛП был извлечен из стенда. Был проведен разбор и визуальный осмотр элементов конструкции ЛП, по результатам которого повреждений выявлено не было. Были измерены номинальные характеристики ШД – сопротивление и индуктивность обмоток – значения которых соответствовали заявленным производителем номинальным значениям. Согласно полученным показаниям потребляемого тока можно сделать вывод, что нагрузка на двигатель во время первого этапа испытаний не изменялась. Изменение нагрузки на ШД будет свидетельствовать об изменении режима работы волнового редуктора и шарико-винтовой пары.

На втором этапе проводилось нагревание термплиты с +80 до +120°C – верхнего температурного предела работоспособности ЛП. Результаты измерений представлены на рис.4 и табл.2.

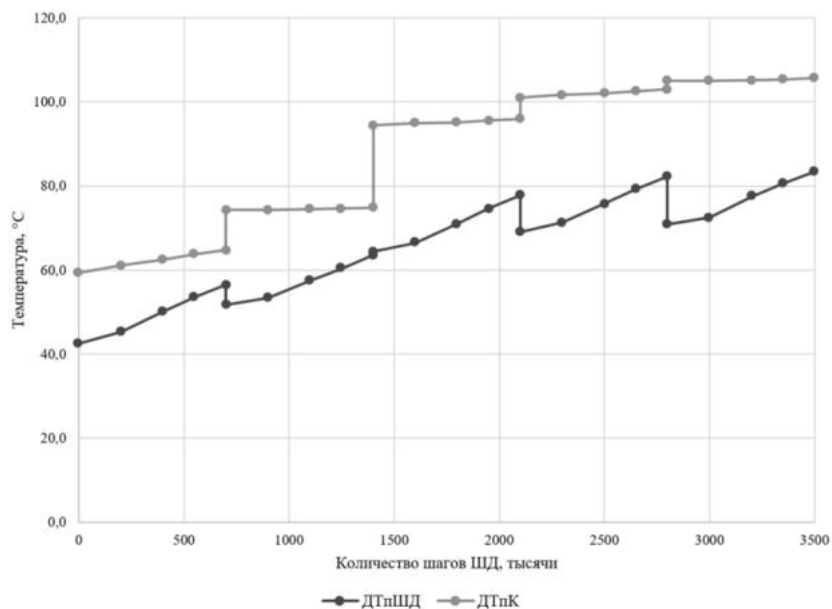


Рис.4. Результаты 2-го этапа испытаний

Табл.2. Результаты 2-го этапа испытаний

Температура плиты, °C	Рабочий цикл, кол-во шагов, направление	Температура, °C		Ток потребления ШД, мА
		ДТпШД	ДТпК	
80	Нач.усл.	42,6	59,4	335
	200000 шагов втягивание	45,3	61,2	340
	200000 шагов выдвигание	50,1	62,5	340
	150000 шагов выдвигание	53,6	63,8	345
	150000 шагов втягивание	56,5	64,8	345
80	Нач.усл.	51,7	74,4	340
	200000 шагов втягивание	53,4	74,4	345
	200000 шагов выдвигание	57,5	74,5	340
	150000 шагов выдвигание	60,4	74,7	430
	150000 шагов втягивание	63,7	74,9	345
110	Нач.усл.	64,4	94,5	340
	200000 шагов втягивание	66,5	94,9	345
	200000 шагов выдвигание	71,1	95,2	425
	150000 шагов выдвигание	74,6	95,6	420
	150000 шагов втягивание	77,8	96	420
120	Нач.усл.	69,1	101,1	340
	200000 шагов втягивание	71,3	101,7	345
	200000 шагов выдвигание	75,8	102,1	420
	150000 шагов выдвигание	79,3	102,6	425
	150000 шагов втягивание	82,3	103	425
120	Нач.усл.	70,9	105,1	345
	200000 шагов втягивание	72,5	105,1	350
	200000 шагов выдвигание	77,5	105,2	425
	150000 шагов выдвигание	80,6	105,4	420
	150000 шагов втягивание	83,5	105,7	340

После снижения температуры стенда до комнатной, вакуумная камера была разгерметизирована, был осуществлён разбор и визуальный осмотр элементов конструкции ЛП по результатам которого повреждений выявлено не было.

На третьем этапе производилось ступенчатое охлаждение стенда от +25 до -80°C с помощью жидкого азота. Результаты измерений представлены на рис.5 и табл.3.

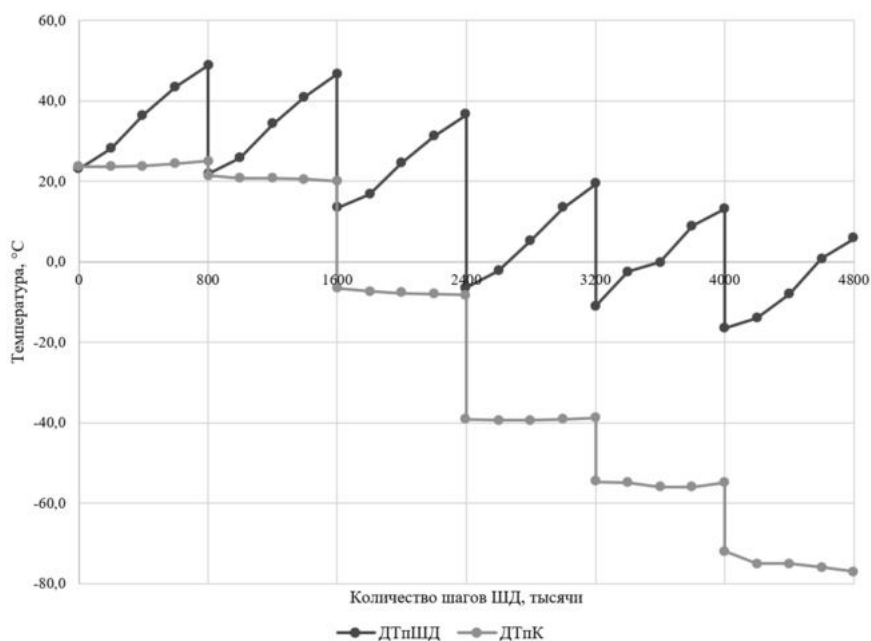


Рис.5. Результаты 3-го этапа испытаний

Табл.3. Результаты 3-го этапа испытаний

Температура в камере, °С	Рабочий цикл, кол-во шагов, направление	Температура, °С		Ток потребления ШД, мА
		ДТпШД	ДТпК	
25	Нач.усл.	23,1	23,6	440
	200000 шагов втягивание	28,2	23,7	475
	200000 шагов выдвигание	36,5	23,8	515
	200000 шагов выдвигание	43,5	24,4	520
	200000 шагов втягивание	48,9	25,1	520
10	Нач.усл.	21,8	21,4	440
	200000 шагов втягивание	25,9	20,8	475
	200000 шагов выдвигание	34,2	20,7	515
	200000 шагов выдвигание	41,1	20,5	520
	200000 шагов втягивание	46,7	20,0	520
-10	Нач.усл.	13,4	-6,5	420
	200000 шагов втягивание	16,7	-7,3	470
	200000 шагов выдвигание	24,6	-7,8	515
	200000 шагов выдвигание	31,3	-8,0	520
	200000 шагов втягивание	36,6	-8,3	520
-40	Нач.усл.	-6,4	-39,1	410
	200000 шагов втягивание	-2,3	-39,3	470
	200000 шагов выдвигание	5,4	-39,4	518
	200000 шагов выдвигание	13,4	-39,2	523
	200000 шагов втягивание	19,4	-38,8	520
-60	Нач.усл.	-11,0	-54,7	380
	200000 шагов втягивание	-2,5	-55,0	460
	200000 шагов выдвигание	0,0	-56,0	460
	200000 шагов выдвигание	9,0	-56,0	460
	200000 шагов втягивание	13,1	-55,0	480
-80	Нач.усл.	-16,5	-72,0	350
	200000 шагов втягивание	-14,0	-75,0	360
	200000 шагов выдвигание	-8,0	-75,0	460
	200000 шагов выдвигание	0,8	-76,0	480
	200000 шагов втягивание	5,8	-77,1	480

В приведённых данных наблюдается зависимость значения тока фазы ШД от температуры окружающей среды. Как видно из табл.1-3, на этапе выдвигания при температурах корпуса ЛП менее -40°C и более $+90^{\circ}\text{C}$ наблюдалось резкое возрастание потребляемого тока. Возрастание потребляемого ШД тока свидетельствует об увеличении его момента нагружения. Существует несколько причин повышения момента нагружения при возрастании температуры конструкции ЛП, среди которых: изменение характеристик зацепления в волновом редукторе из-за температурных деформаций его элементов, изменение характеристик смазочного материала и температурное расширение элементов выходного подшипника.

После завершения испытаний и повышения температуры стенда до комнатной, вакуумная камера была разгерметизирована, осуществлён разбор конструкции ЛП и произведён контроль типологических поверхностей механической передачи ЛП при помощи электронного микроскопа StarLite 150, результаты контроля представлены на рис.6 и рис.7.

На рис.6 показана поверхность венца гибкого колеса. На зубьях гибкого колеса заметен износ, также, в двух местах произошло выкрашивание.

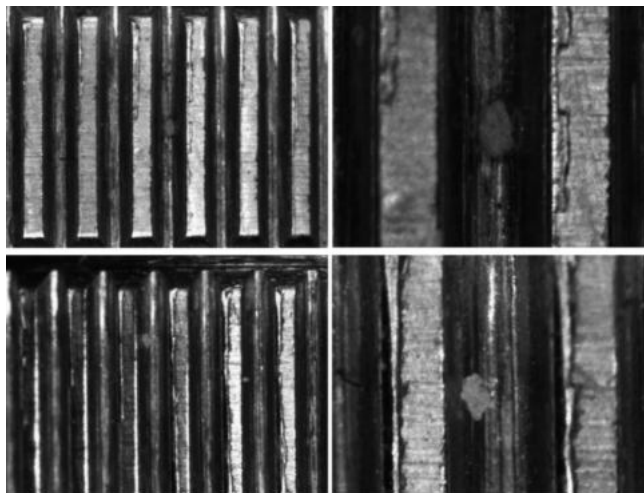


Рис.6. Венец гибкого колеса

Характер износа преимущественно с одной стороны объясняется описанным ранее увеличением момента нагружения ШД в процессе выдвижения штока.

На рис.7 показаны поверхности венца жёсткого колеса и винта, без видимых повреждений.

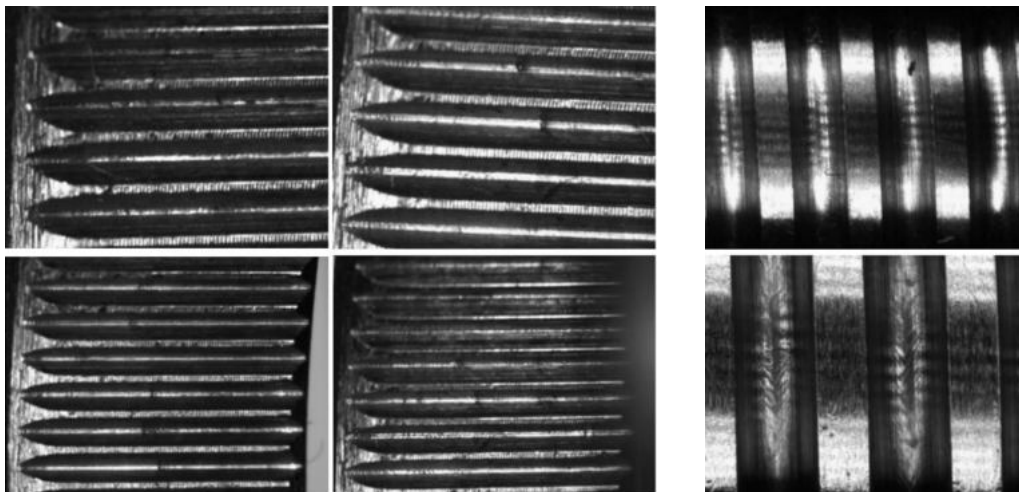


Рис.7. Венец жёсткого колеса (слева) и винт (справа)

Разработанный стенд позволил воспроизвести требуемые условия испытаний с отслеживанием градиента температур конструкции ЛП и регистрацией тока потребления ШД с точностью $\pm 0.1^\circ$.

Испытуемый ЛП отработал 12 рабочих циклов при нагреве и 6 при охлаждении, сохраняя стабильную работоспособность в условиях вакуума как при повышенных, так и при пониженных температурах. Согласно результатам проведённых испытаний ЛП сохраняет работоспособность в диапазоне температур корпуса от $-77,1$ до $105,7^\circ\text{C}$.

Анализ полученных данных подтверждает устойчивость ЛП в условиях вакуума и широкого температурного диапазона. Данные, приведенные в настоящей работе, подтверждают, что ЛП отвечает заявленным требованиям по устойчивости к условиям вакуума и температурных воздействий при выводе устройства на околоземную орбиту в составе космического аппарата.

Библиографический список

1. Разработка типоразмерного ряда прецизионных мехатронных устройств стабилизации, позиционирования и наведения бортовой аппаратуры космической и авиационной техники [Текст]: отчёт по этапу 4 «Изготовление экспериментальных образцов системы управления гексаподом, испытания экспериментальных образцов»: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; рук. Матвеев С.А.; исполн.: Яковенко Н.Г. [и др.] СПб. 2017. 485 с. № АААА-А19-119072390033-2.
2. Применение пространственных механизмов с параллельной структурой для наведения, стабилизации и виброизоляции бортовых приборов / А. В. Горбунов, Е. Б. Коротков, А. В. Леканов [и др.] // Решетневские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 117-118.

АВТОРЫ СБОРНИКА

Абрамович Р. И.	64	Кулиев Д. А.	15
Агаркова Ю. С.	90	Кучеренко М. А.	69
Алимова Д. В.	43	Лебедев А. И.	117
Андреев Я. И.	123	Лебедев О. О.	8
Антоненко Е. Д.	131	Матахин Д. А.	96
Антонова Е. Ю.	120	Мельникова Д.	66
Антонова Н. В.	19	Михайлов Е. А.	49
Артемов В. В.	96	Мокрушин Е. А.	55
Афимьин Г. О.	25	Мотохов Д. Е.	34
Батыгин А. В.	69	Надежин М. И.	86
Бойко А. Ю.	103	Назарова А. В.	114
Бойко М. М.	69	Никитина Д. И.	117
Васильев М. В.	64	Николаева П. С.	123
Владимиров К. Е.	36	Новицкая Д. В.	131
Воеводина Д. Е.	27	Олехвер А. И.	27
Гнатуша С. В.	30	Перфилова А. Д.	114
Гончаров В. О.	103	Поляков Р. А.	41
Горбунов А. В.	131	Поляков С. А.	41
Доронин П. А.	83	Путинцев А. Д.	117
Егоров В. В.	19, 36	Раинкина Е. А.	19
Ерёмин А. В.	117	Ремшев Е. Ю.	27
Еськова Е. А.	25	Рыбалко В. В.	34
Желтышев О. И.	131	Савченко Л. А.	128, 130
Зайнуллина В. Л.	39	Сало А. П.	75, 83
Зинченко В. И.	103	Сирица Ф. В.	10, 58
Иванов Б. Г.	41	Скоробогатько К. Д.	72
Иванов В. Е.	49	Слободзян Н. С.	86
Иванов В. С.	77	Смекалов В. А.	15
Кададова А. В.	126	Смирнов А. А.	72, 107
Кешишьян В.	66	Смирнов И. А.	83
Кикина А. Ю.	90	Тельминов В. В.	19
Киселев А. А.	86	Тельнов А. А.	41
Киселев И. А.	55	Тирищук Д. И.	10, 58
Коваленко Е. А.	4	Уткин В. В.	126
Козырев Н. Д.	21	Харитонов А. Р.	64
Кононов К. И.	43	Хачатрян А. А.	99
Корнеев Н. А.	103	Христосов С. С.	46, 75
Коротков Е. Б.	86	Чеботарев Ю. С.	90
Костюк Е. В.	25	Чудин К. А.	64
Круглов А. В.	46, 75, 111	Шипов И. А.	96
Кулешова А. В.	30		

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. 19,75. Тираж 150 экз. Заказ №
Балтийский государственный технический университет «Военмех»
Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская дом 1