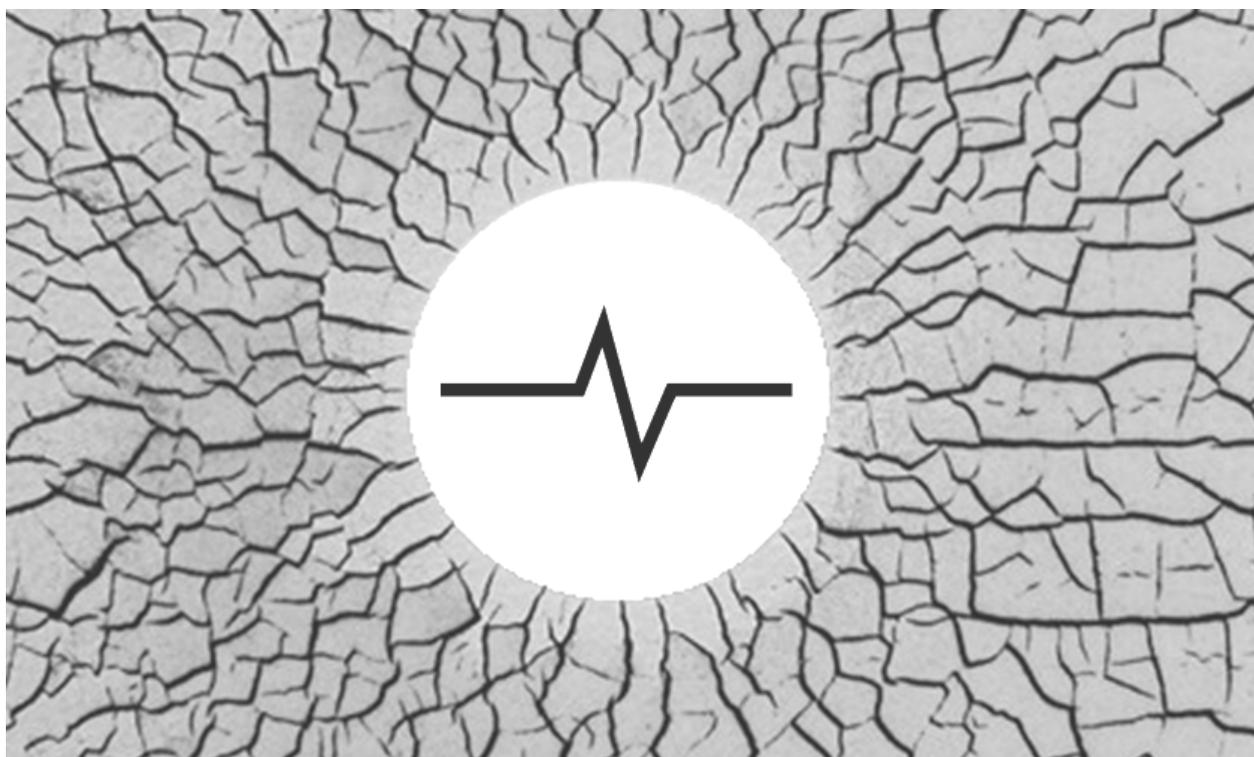




Сибирский государственный университет
науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



КРАСНОЯРСК 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

*Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции
(24–26 февраля 2022 г., Красноярск)*

Электронное издание

Красноярск 2022

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022

УДК 629.7
ББК 39.5
И88

Редакционная коллегия:

В. Ю. ЖУРАВЛЕВ, Г. М. ГРИНБЕРГ, Е. В. СУГАК, А. В. ГИРН

Под общей редакцией

кандидата технических наук, профессора В. П. НАЗАРОВА

Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика [Электронный И88 ресурс] : сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. (24–26 февраля 2022 г., Красноярск). – Электрон. текстовые дан. (1 файл, 3,0 МБ). – Систем. требования: Internet Explorer; Acrobat Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата .pdf) / под общ. ред. В. П. Назарова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2022. – Режим доступа: <https://www.sibsau.ru/scientific-publication/>, свободный. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-86433-909-1

Представлены результаты научных исследований студентов, аспирантов и специалистов высших учебных заведений, НИИ, промышленных предприятий аэрокосмического комплекса региона по приоритетным направлениям отраслей науки и производства. Рассмотрены теоретические и прикладные вопросы разработки и использования современных технологий испытаний и диагностики оборудования и сооружений. Описаны проблемы и указаны пути их решения в области обеспечения надежности и безопасности конструкций.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и специалистов, работающих в области надежности и диагностике изделий.

**УДК 629.7
ББК 39.5**

Подписано к использованию: 06.04.2021. Объем 3,0 МБ. С 420/22.

Корректор *П. С. Бороздов.*

Макет и компьютерная верстка *Л. В. Звонаревой.*

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31.
E-mail: rio@sibsau.ru. Тел. (391) 291-90-96.

ISBN 978-5-86433-909-1



9 785864 339091

СОДЕРЖАНИЕ

От редакционной коллегии	6
--------------------------------	---

Секция

«Современные методы испытаний и диагностики изделий»

Журавлев В. Ю., Жигурова Е. Е., Мумбер К. Е., Казаков Р. А., Шестов Н. С., Бривкальн П. А. , Оценка заявленных механических свойств материала камеры ЖРД малой тяги, изготовленной методом 3D-печати	7
Санников Д. Н. Защита автомобильных дорог от снежных заносов с помощью снегопередувающих конструкций	12
Бразговка О. В., Сугак Е. В. Оценка влияния условий эксплуатации на надежность технических объектов	16
Оленцевич Д. А., Шепета Н. А. Вибродиагностика оборудования нефтеперекачивающих станций	22
Шелудько М. Л., Шорников В. И., Черненко В. В., Жуйков Д. А., Толстопятов М. И. Проблемы диагностики и обеспечения стабильности внутриклиматических параметров чистых помещений в аэрокосмической отрасли	30
Сугак Е. В., Бразговка О. В. Статистическое моделирование прочностной надежности элементов технических систем	35
Гринберг Г. М., Ермиенко Н. А., Негодяев А. А. Лабораторная установка для изучения акустико-топографического метода контроля и проведения вибрационных испытаний	42

Секция

«Контроль и диагностика технологических процессов машиностроения»

Левко В. А., Иванов П. А., Литовка О. В. Особенности операционного контроля при обработке абразивным потоком	48
Амельченко Н. А., Раменская Е. В., Янковская Н. Ф. Возможности повышения надежности и качества напыленных плазменных покрытий	51
Мумбер К. Е., Жигурова Е. Е., Казаков Р. А., Шестов Н. С., Бривкальн П. А. Исследования качества и структуры материала камеры-демонстратора, изготовленной из алюминиевого сплава методом 3D-печати	57
Гирн А. В., Марченко С. В., Руденко М. С., Михеев А. Е. Исследование микротвердости поверхности стали 40X после плазменного химико-термического упрочнения	60
Орешенко Т. Г., Афанасьев Р. В., Гринберг Г. М. Исследование свойств флюсов для пайки электроники	65

Секция
**«Испытания, контроль, надежность систем
автоматического управления»**

Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., Ткачев С. Б. Методика эскизного проектирования энергосберегающего имитационно-натурного комплекса для испытания систем электропитания космических аппаратов	72
Серватинский В. В., Емельяненко Н. А. Базовая конфигурация интеллектуальных транспортных систем как элемента автоматизированного управления транспортными потоками	76
Максютин А. С. Разработка алгоритмов тестирования оборудования SPACEWIRE на соответствие требованиям спецификации транспортного протокола RMAP	80
Мызникова В. А., Чубарь А. В., Солопко И. В. Цифровой прототип разработки процесса движения автономного объекта по задаваемой траектории в SIMINTECH	87
Писарев Н. С., Семенкин Е. С. Диагностика автопилота воздушного судна с использованием модулятора входных сигналов	91

Секция
«Контроль и испытания ракетно-космической техники»

Дергач И. В., Фесенко И. А., Фоменко А. А., Шестов Н. С., Манохина Э. С. Особенности методики виброиспытаний камеры-демонстратора ЖРД малой тяги	95
Зенюк К. О., Шелудько М. Л., Колодин Д. А., Шорников В. И., Финк В. А. Оценка устойчивости рабочего процесса в газогенераторе ЖРД методом конечных элементов	101
Шикарев М. А., Манохина Э. С., Журавлев В. Ю. Выбор принципиальной схемы учебно-демонстрационного стенда для автономных испытаний камеры ЖРД малой тяги	106
Назаров В. П., Зувев А. А., Толстопятов М. И. Контроль геометрических размеров экспериментального образца камеры ракетного двигателя малой тяги, выполненного методом 3D-печати	111
Абрамчик Д. Д., Шпигер Н. В., Сомов В. Г., Гаипов К. Э. Концепция протокола распределения частотного диапазона	116

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Перед Вами второй сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции **«Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика»**.

Конференция проводится для студентов, аспирантов и специалистов предприятий и организаций, высших учебных и научно-исследовательских заведений, дает им возможность представить свои разработки, результаты исследований. Конференция – это замечательная возможность общения высококвалифицированных специалистов с новым кругом будущих ученых и производителей.

В сборнике представлены доклады, имеющие отношение к проектированию, созданию, решению научных проблем по обеспечению надежности оборудования, изделий и конструкций, новым подходам к решению вопросов развития методов диагностики и испытания изделий. В связи с тематической направленностью мероприятия организаторы включили в сборник не все научные сообщения, а наиболее интересные и перспективные, характеризующие новизну и глубину проводимых научных исследований.

УДК 620.172

**ОЦЕНКА СООТВЕТВИЯ ЗАЯВЛЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МАТЕРИАЛА КАМЕРЫ ЖРД МАЛОЙ ТЯГИ,
ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ**

В. Ю. Журавлев, Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков,
Н. С. Шестов, П. А. Бривкальн

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: Zhigurova.liza@yandex.ru

Проводится анализ результатов испытаний на растяжение и определения твердости силумина, используемого для изготовления камеры демонстратора ЖРД МТ, и определение соответствия механических свойств сплава заданным производителем параметрам.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, механические свойства, силумин, определение твердости по Виккерсу, испытания на растяжение.

Введение

В настоящее время одной из перспективных, бурно развивающейся технологий машиностроения является 3D-печать изделий. Используя аддитивные технологии совместно с топологической оптимизацией конструкций возможно получить значительное сокращение трудозатрат, материалов, времени и средств при изготовлении деталей. Результаты научных исследований по отработке методологии проектирования изделий, полученных аддитивными методами, подбору режимов сопутствующих технологических операций для получения необходимых физико-механических характеристик изделий опубликованы по ряду используемых в 3D-печати материалах [1–3].

Свойства материала

Силумин – сплав на основе алюминия и кремния. Большую часть, а именно около 90 %, сплава составляет алюминий, остальную часть – кремний. Главное отличие этого сплава от обычного алюминия заключается в том, что силумин обладает более высоким уровнем прочности [4]. Плотность силуминовых сплавов от 2,5 до 2,94 г/см³.

В настоящее время из алюминиевых сплавов наибольшее применение получили силумины. Они имеют относительно низкие плотность, стоимость, температуру плавления и обладают отличными литейными свойствами. Недостатки силуминов – это относительно невысокие механические и технологические свойства. Обычные силуминовые отливки обладают низкими пластичностью и антифрикционными свойствами, что объясняется следующими основными проблемами литья силуминов:

1. Недостаточное модифицирование структуры отливок.

2. Большая склонность к газовой пористости.
3. Трудноудаляемые неметаллические включения.

Сплав по физическим свойствам очень часто сравнивают с нержавеющей сталью. Но он значительно легче стали, что является главным его достоинством. Несмотря на низкий вес, прочность силумина не уступает стали и другим металлам-аналогам. Как и алюминий, этот сплав не поддается коррозии, этому способствует защитная пленка, которая образуется из оксидных соединений. Такая пленка образуется на поверхности путем взаимодействия кислорода и атомов алюминия. К физическим свойствам также относится повышенная износостойкость. Изделия из этого вещества отличаются устойчивостью к механическим нагрузкам и длительным сроком эксплуатации.

Температура плавления силумина составляет около 670 градусов, что намного ниже температуры плавления стали. Такое физическое свойство также влияет на снижение себестоимости металлических изделий.

Физические свойства сплава напрямую зависят от количества примесей. К таким относятся магний и марганец, которые добавляют. Или же цинк, кальций и железо, от которых просто не избавляются на производстве. Поэтому качество силумина может отличаться даже при одинаковой маркировке – оно зависит от технологии производства и добросовестности производителя.

Механические свойства силуминов в значительной мере зависят от способов литья и вида термической обработки.

Использован порошок из сплава на основе алюминия AlSi10Mg марок АСП по ТУ 1791-011-49421776-2017.

Химический состав сплава, %

Al	Si	Mg	Fe	Прочие примеси
89,7-90,3	9,8	0,32	0,10	< 0,15

Примечание. Механические характеристики базовых сплавов: $\sigma_b > 350$ МПа $\sigma_{0,2} > 215$ МПа $\delta_s = 8,5$.

Проведение испытаний

Механических свойств образцов проведены на опытных образцах из силумина, изготовленных методом 3D-печати. Образцы были изготовлены с применением той же технологии, с помощью которой изготавливалась сама камера. Толщины исследуемых образцов 3 мм соответствовали толщине напечатанной стенке камеры сгорания ЖРД МТ. Из чего следует, что свойства образцов идентичны свойствам материала камеры.

Для определения механических свойств материала проведен ряд испытаний, а именно: испытание на растяжение, определение твердости по Виккерсу. По данным испытаний определены такие параметры, как предел текучести материала, предел прочности материала, относительное удлинение материала и твердость. Испытания проводились на двух образцах подвергнутых низкотемпературному отжигу при температуре 250 градусов по Цельсию в течение четырех часов и на двух образцах без температурной обработки.

Виды и результаты испытаний образцов

Испытания проводились на территории ЦЗЛ специалистами АО «Красмаш».

Определение твердости по Виккерсу производилось по ГОСТ Р ИСО 6507-1–2007 «Металлы и сплавы. Определение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения» Испытание проводилось при помощи квадратной пирамидки с углом между гранями

136° под нагрузкой 0,49 Н. Для измерения размеров диагоналей отпечатков использован электронный микроскоп «Nicon ECLIPSE MA200». Для испытаний были изготовлены отполированные образцы (рис. 1). Результаты испытаний по определению твердости материала приведены в таблице.

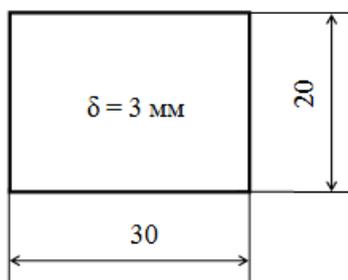


Рис. 1. Размеры образцов для испытаний на твердость

Испытания на растяжение образцов проводились по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на разрывной машине «SHIMADZU AG-XG plus» с максимальным усилием 50 кН и погрешностью измерений 0,5 %. Образцы изготовлены толщиной 3 мм с размерами, показанными на рис. 2.

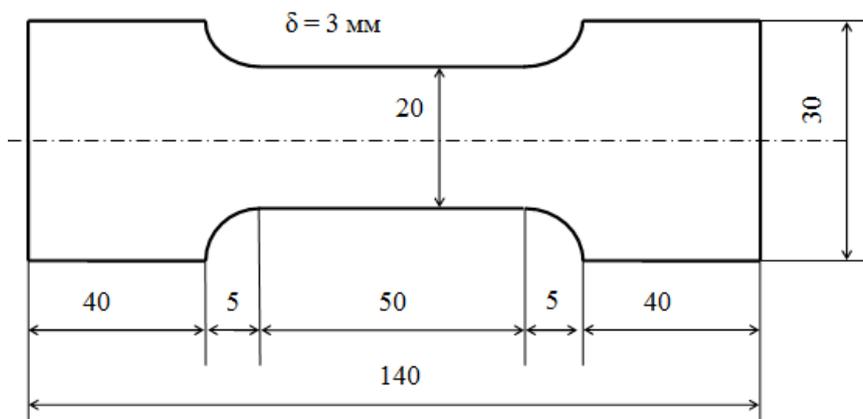


Рис. 2. Размеры образцов для испытаний на растяжение

Фотографии образцов представлены на рис. 3.



Рис. 3. Фотографии образцов для испытаний на растяжение

Диаграммы растяжения образцов представлены на рис. 4, 5.

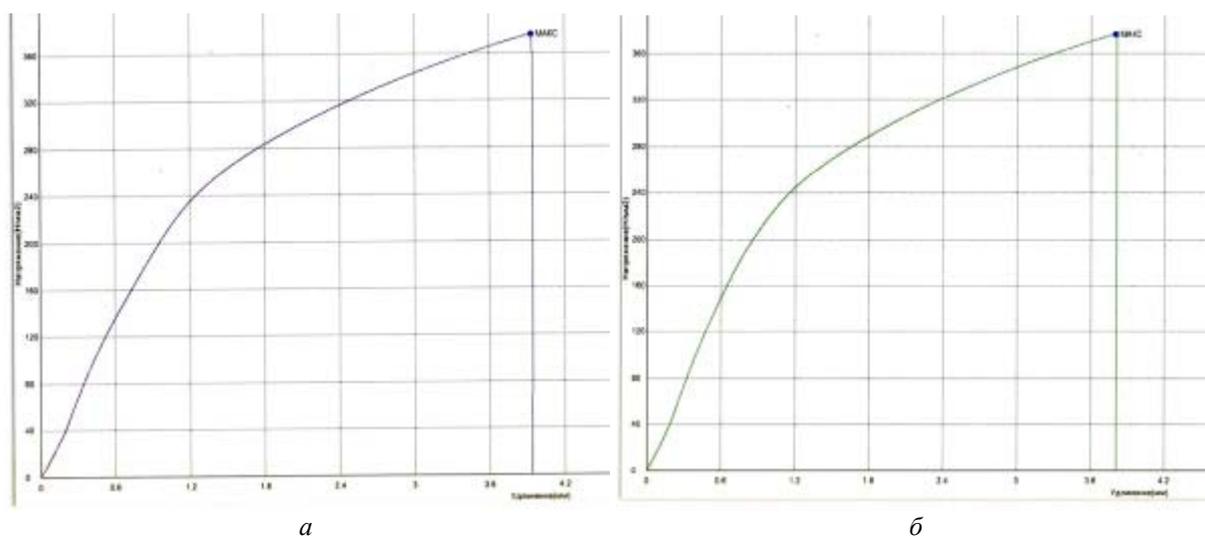


Рис. 4. Диаграммы условных напряжений образцов без термообработки:
а – образец № 1; б – образец № 2

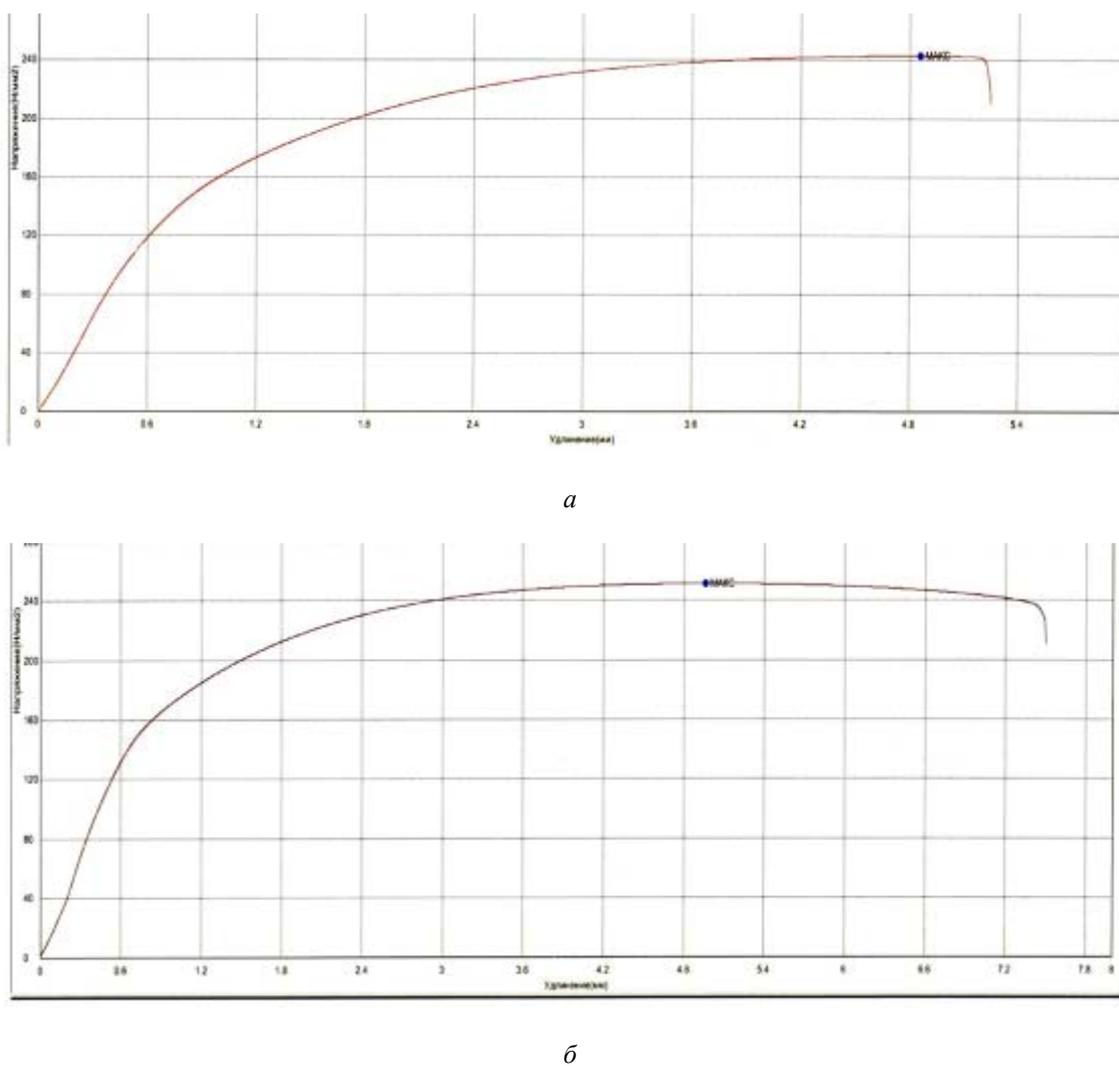


Рис. 5. Диаграммы условных напряжений образцов с термообработкой
а – образец № 1; б – образец № 2

Рассчитанные по модулям упругости Результаты испытаний по определению механических характеристик материала приведены в таблице.

Результаты испытаний

Наименование детали	№ образца	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), Н/мм ²	Предел прочности (σ_B), Н/мм ²	Относительное удлинение (σ_s), Н/мм ²	Твердость, HB5/250	Модуль упругости, МПа·10 ⁴
Образцы алюминиевого сплава	1. Термообработанный	133	242	10,0	72	1,17
	2. Термообработанный	145	251	10,2	72	1,05
	1. Без термообработки	249	375	7,6*	107	0,92
	2. Без термообработки	240	376	7,8*	107	1,20

Примечание. * Образцы разрушились по кернам.

По результатам испытаний механических свойств можно сделать вывод: образцы, не подвергавшиеся термообработке, соответствуют параметрам заявленным производителем; образцы, подвергавшиеся термообработке, имеют параметры значительно ниже чем не термообработанные образцы. Термообработка образцов привела к снижению их прочностных характеристик, твердости, увеличению пластичности, хаотичным изменениям модуля упругости.

Библиографические ссылки

1. Аддитивные технологии – что это такое и где применяются [Электронный ресурс]. Сколково. URL: https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2019/09/18/additivnyetehnologii-1320_-chto-eto-takoe-i-gde-primenyayutsya.aspx – свободный (дата обращения: 28.06.2021).
2. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров. М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
3. Грязнов М. Ю., Шотин С. В., Чувильдеев В. Н. Физико-механические свойства и структура INCONEL 718, полученного по технологии послойного лазерного сплавления // Физика твёрдого тела. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2014. № 4 (1). С. 46–51.
4. ГОСТ Р 59036–2020 Аддитивные технологии. Производство на основе селективного лазерного сплавления металлических порошков. Основные положения. М. : ФГУП «Стандартимформ», 2020. 22 с.

© Журавлев В. Ю., Жигурова Е. Е., Мумбер К. Е., Казаков Р. А., Шестов Н. С., Бривкальн П. А., 2022

ЗАЩИТА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОТ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ С ПОМОЩЬЮ СНЕГОПЕРЕДУВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Д. Н. Санников

Научный руководитель – В. В. Серватинский

Сибирский федеральный университет

Инженерно-строительный институт

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

E-mail: BrownGp2@yandex.ru

В настоящее время активно развивается сеть автомобильных дорог в Северных территориях России. Содержание автомобильных дорог, особенно в зимний период является актуальной задачей. Уборка снега в отдаленных районах является дорогостоящей процедурой и не всегда выполняется своевременно ввиду отдаленности территорий. Решение данной задачи заключается в использовании альтернативных способов защиты дорог с помощью снегозащитных и снегопередувающих конструкций.

Ключевые слова: снегопередувающие конструкции, снегозащитные конструкции, защита автомобильных дорог, снежные заносы.

В зимний период времени во многих регионах Российской Федерации наблюдается ухудшение условий дорожного движения. Главной проблемой такой неблагоприятной ситуации на автомобильных дорогах являются снежные отложения, которые образуются во время метелей и снегопадов. Эффективная борьба со снежными заносами на автомобильных дорогах возможна при внедрении новых методов борьбы со снегом, а также в доработке и улучшении существующих методов, но, по разным причинам, утратили свою эффективность.

Для автомобильных дорог согласно нормативным требованиям не допустимы снежные отложения на проезжей части [4]. Для обеспечения снегонезаносимости таких автомобильных дорог требуется разработка и применение эффективных и экономически целесообразных мероприятий который будут обеспечивать защиту дорог от снегопадов и снежных метелей.

В связи с ежегодным ростом объемов строительства автомобильных дорог на Севере России, а также в связи эволюцией автомобильного транспорта постоянно изменяются условия скоростного режима движения, разработка и совершенствование конструкций снегопередувающих устройств, представляющих собой альтернативу патрульной снегоочистке, является актуальной задачей.

Снегопередувающие устройства должны обеспечивать надежное сдувание снега со всего полотна автомобильной дороги. Чаще всего их устраивают в виде вертикальной или наклонной панели, поднятой над поверхностью земли на высоту, равную, как правило, половине высоты самой панели. Панель устанавливают в непосредственной близости от земляного полотна. Конструкции предполагают увеличение скорости потока воздуха сконцентрированного в нижнем зазоре ограждения, а поток воздуха в верхней части, отклоняемый пластиной для защиты от снега, создают ускорение потока воздуха над ограждением. Поток воздуха, сконцентрированные на нижней и верхней части, передуют снег через дорожное покрытие. Шлейф снежного отложения может достигать внушительных размеров [1] (рис. 1).

Накоплен положительный опыт применения снегопередающих устройств в сложнейших условиях Крайнего Севера. Например, для защиты подъездных дорог Норильского металлургического комбината устанавливались разные типы снегопередающих конструкций.[1]

Однако данные разработки были запроектированы в середине прошлого века и утратили свою эффективность. Сравнивая отечественные и зарубежные разработки, можно выделить ряд недостатков таких конструкций:

- отсутствие решений при возможном изменении направлении ветра, формирующего метелевый поток, вследствие чего снегопередающая конструкция утрачивает свою способность увеличивать снеготранспорт;
- минимальное использование современных материалов в конструкциях;
- недостаточно проработаны варианты использования снегопередающих конструкций в летний период.

Для решения данных задач был проведен анализ среди различных снегопередающих и снегозащитных конструкций. Важными отличиями этих двух типов является то, что снегозащитные конструкции задерживают снег около искусственных сооружений, а снегопередающие конструкции способствуют передуванию снега через дорогу и обеспечивают дальнейшее складирование.

В свою очередь снегопередающие конструкции хорошо работают при устойчивом направлении метелевых ветров. При соответствующей конструкции ускоренный воздушный поток переносит снег через дорогу и тем самым упрощают работу дорожным службам. К основным параметрам заборов снегопередающего действия, влияющим на их аэродинамические характеристики, относятся: общая высота забора H , высота продуваемого проема h и ветронаправляющей панели h_1 , угол наклона панели к горизонту α . [2]

Количественные значения основных параметров заборов снегопередающего действия следующие: высоту H назначают от 5 до 8 м в зависимости от требуемой ширины зоны выдувания (указанные значения H обеспечивают зону выдувания шириной от 6 до 11 м); h – должна составлять 60 % от H , а h_1 – 40 % H ; α – принимают равным 90°. Однако применяют заборы снегопередающего действия и с наклонной панелью. Не рекомендуется делать заборы снегопередающего действия выше 8 м, исходя из таблицы. Для большей эффективности работы заборов снегопередающего действия их необходимо располагать по обочине дорог на расстоянии 0,8–1 м от кромки проезжей части [1].

Заборы снегопередающего действия можно строить из современных материалов таких как металлы, дерево, углеродное волокно, стеклопластик, бетон. Выбор материала для защиты от снега зависит от ряда критериев установки, которые учитывают прочность, легкость и долговечность конструкции, а также устойчивость к погодным условиям и экологичность.

Параметры и типы снегопередающих устройств

Тип забора	Общая высота, м	Высота ветронаправляющей панели, м	Высота продуваемого проема, м	Угол наклона панели к горизонту	Ширина зоны выдувания, м
1	5	3	2	90	До 6,5
2	6,5	4	2,5	90	До 8,5
3	8	5	3	90	До 10,5

По результатам оценки снегозащитных и снегопередающих конструкций, разработан прототип снегопередающей конструкции. Данная модель имеет форму эллиптического полушария, такая форма будет способствовать ускорению перемещения

снежной метели над дорогой за счет округлой формы. В этой конструкции поток воздуха, сконцентрированный и ускоренный в нижнем зазоре ограждения, и поток воздуха, отклоняемый пластиной в верхней части, создают разные потоки воздуха над и под ограждением, а поток воздуха, сконцентрированный на нижней стороне сдувает снег с дорожного покрытия, чтобы снег не накапливался. Просветы в верхней и нижней части пластины, сформированные в форме крыла, наиболее эффективной аэродинамической формой создающую разность давлений на верхней и нижней сторонах пластины, возникающей согласно закону Бернулли: на нижней поверхности давление оказывается ниже, чем на верхней, поэтому благодаря образующейся разности давлений и возникает завихрение воздушного потока, тем самым увеличивая его кинетическую энергию и способность снегопереноса. Зазор в нижней части будет способствовать ускорению прохождения снежной метели, увеличение скорости выдувания будет превышать стандартную скорость метелевого потока на 30–50 % тем самым способствовать переносу и сдуванию снега за зону выдувания (рис. 2).

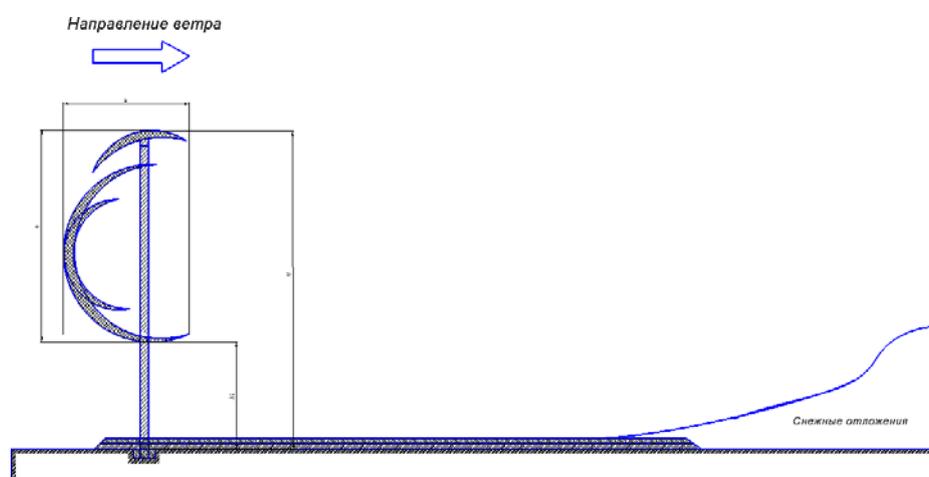


Рис. 1. Работа снегопередувающей конструкции и шлейф снежных отложений

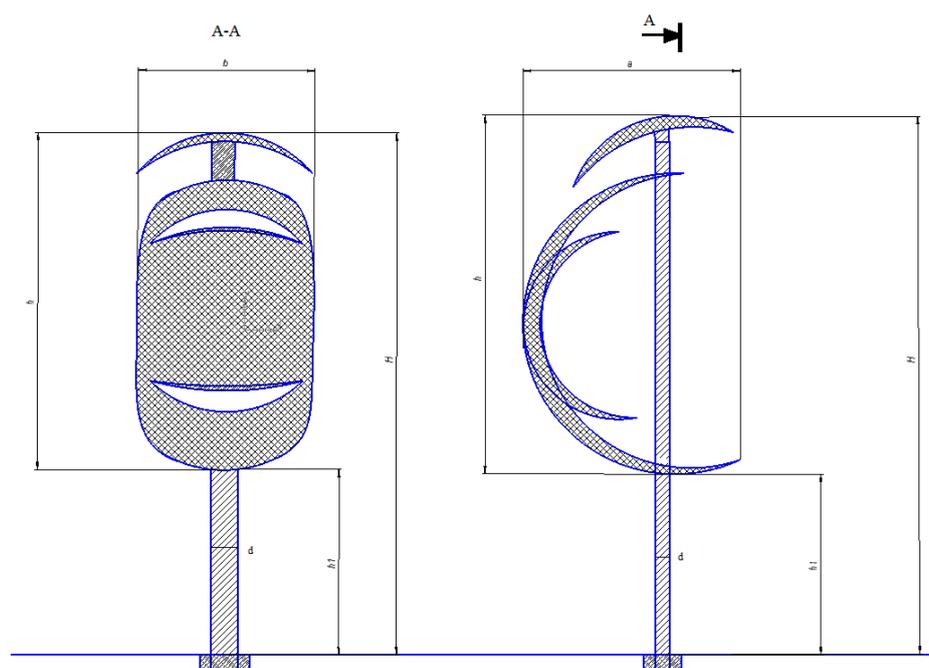


Рис. 2. Модель снегопередувающего щита для защиты автомобильных дорог

Для более полного действия работы передувания снега был проведен эксперимент со снегопередувальной конструкцией, представленной на рис 2. В ходе эксперимента использовались две конструкции снегопередувального типа в масштабе 1:36. Для выбора материала имитирующего снег были рассмотрены мучная пыль и тонкий песок. Ввиду большой плотности песка в качестве заменителя снега применялась более мучная пыль плотность составляет 400 кг/м^3 . Что в свою очередь является наиболее похожим вариантом к плотности метелевого (ветрового) снегопереноса который составляет плотность 300 кг/м^3 . Взвешенную пыль распределяли на механизм продувания мощностью $0,3 \text{ кВт}$ и производительностью по воздуху $2 \text{ м}^3/\text{мин}$ фиксированными порциями.

Выводы:

1) по данным серии экспериментов можно утверждать, что модель снегопередувальной конструкции, имеющая форму эллиптического полушария, показала положительную статистику работы в условиях передувания;

2) для эффективной работы снегопередувальных конструкций необходимо учитывать ряд условий: направления господствующих ветров, наличии препятствий в зоне выдувания и ширина полосы выдувания.

Библиографические ссылки

1. Зимнее содержание автомобильных дорог / Г. В. Бялобжеский, А. К. Дюнин, Л. Н. Плакса и др. / под ред. А. К. Дюнина. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1983. 197 с.

2. Бабков В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения. М. : Транспорт, 1970. 256 с.

3. Васильев А. Л. Состояние дорог и безопасность движения автомобилей в сложных погодных условиях. М. : Транспорт, 1976. 224 с.

4. ГОСТ 50597–2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

© Санников Д. Н., 2022

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

О. В. Бразговка, Е. В. Сугак

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: sugak@mail.ru

Рассматривается влияние условий эксплуатации технического объекта на его свойства и показатели надежности. Приведены зависимости скорости процессов деградации конструкционных материалов элементов от температуры. Предложена методика определения зависимости показателей надежности и безопасности технических объектов от нагрузок и условий эксплуатации по результатам определительных испытаний.

Ключевые слова: надежность, условия эксплуатации, процессы деградации, испытания на надежность.

Надежность технических объектов зависит от многих как благоприятных, так и неблагоприятных факторов, под влиянием которых в материалах элементов конструкций происходят различные обратимые и необратимые процессы, конечным результатом которых является отказ [1–3].

Параметры объекта X_i , определяющие его эффективность и надежность, являются функцией параметров Z_j , характеризующих условия эксплуатации (нагрузки, температуру, характеристики среды и т. д.), состояние и свойства материалов (механические, электрические, магнитные и другие), и времени эксплуатации или наработки t [1; 2]:

$$X_i = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_k, t). \quad (1)$$

Влияние параметров Z_j на определяющий параметр объекта X_i и вид зависимости (1) определяются в ходе специальных испытаний на надежность.

Функциональные зависимости вида (1) хотя и значительно идеализируют реальные процессы и лишь с известной степенью приближения отражают их физическую сущность, но позволяют предсказывать возможный общий ход процессов при различных условиях. Так, например, подстановка в уравнение (1) средних значений аргументов Z_1, Z_2, \dots, Z_k дает оценку математического ожидания параметра X_i , а исходя из дисперсий случайных аргументов можно оценить дисперсию определяющего параметра X . Поэтому физическая теория надежности («физика отказов»), изучающая закономерности изменения свойств материалов и элементов технических систем в условиях эксплуатации, является основой для изучения и оценки характеристик надежности и построения математических моделей отказов [6].

Однако даже при известной зависимости (1) нельзя точно предсказать поведение объекта и момент наступления отказа, так как аргументы Z_1, Z_2, \dots, Z_k и, тем более, параметры X_i являются, как правило, случайными величинами [1].

В процессе эксплуатации обычно происходят непредвиденные случайные изменения нагрузок и условий эксплуатации, элементы объектов могут быть изготовлены с различными допусками на геометрические размеры, отклонениями технологических параметров, состава, структуры и свойств конструкционных материалов и т. д. Кроме

того, большинство физических процессов в материалах, имеют физико-статистическую природу [2; 4].

Следовательно, подход к анализу состояния объектов должен быть, как правило, структурно-вероятностным, т. е. должен учитывать как физическую структуру объектов и материалов, так и статистические кинетические закономерности процессов [5].

Выработка ресурса изделий и возникновение отказов связаны, главным образом, с накоплением необратимых повреждений, изменением (старением) их элементов (деталей и узлов) и конструкционных материалов. Повреждения могут быть как механического (усталость, трещинообразование, износ, накопление пластических деформаций и т. д.), так и физико-химического происхождения (коррозия, эрозия, кавитация, адсорбция и др.) [2]. Многие виды повреждений носят смешанный характер (например, процессы изнашивания могут включать явления механического, физического, химического и электрического происхождения).

Для определения конкретного вида зависимости (1) необходимо в первую очередь рассмотреть физическую сущность процессов и явлений, оказывающих влияние на надежность и приводящих к отказам объектов. Так как большинство физических процессов и явлений имеет статистическую природу, то при установлении функциональных зависимостей основных (определяющих) параметров объекта от времени и входных параметров рассматриваются, как правило, математические ожидания или средние значения входящих в эти зависимости величин.

Для начала процесса обычно должен быть превышен определенный уровень нагрузок, температур, скоростей или других параметров, определяющих его течение (порог чувствительности) [2]. Часто порог чувствительности связан с определенным энергетическим уровнем, который определяет начало его развития. Например, закономерности течения многих физико-химических процессов и, соответственно, зависимости параметров материалов от времени могут быть получены на основании анализа кинетики термоактивационных процессов. Изменение свойств твердых тел происходит в результате перемещений и перегруппировок элементарных частиц (молекул, атомов, ионов, электронов) или изменения их положения в кристаллической решетке.

Энергетический уровень, с которого начинается термоактивационный процесс изменения свойств материала, определяется значением энергии активации E_a . Скорость процесса тем больше, чем больше число частиц, обладающих энергией выше энергии активации.

Законы статистической физики определяют вероятность распределения скорости (и, соответственно, энергии) частиц, вероятность их определенного положения в пространстве. Например, распределение Максвелла-Больцмана описывает закон распределения скоростей молекул и атомов:

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dv} = \frac{4v^2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) = \frac{4v^2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{2RT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{v^2}{2RT}\right), \quad (2)$$

где N – число молекул или атомов; m и v – масса и скорость молекулы или атома; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

В статистической термодинамике, физической химии, физике твердого тела и квантовой физике также известны выражения, определяющие вероятность состояния частицы, аналогичные по структуре выражению (2).

Плотность распределения частиц по величине кинетической энергии E_k :

$$f(E_a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} \sqrt{E_a} \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right). \quad (3)$$

Количество частиц, энергия которых больше некоторого критического уровня (энергии активации) E_a или вероятность того, что энергия частицы превысит величину E_a при $E_a \gg kT$ может быть определена из приближенного выражения:

$$p(E_k \geq E_a) = \frac{n(E_k \geq E_a)}{N} \approx 2 \sqrt{\frac{E_a}{\pi kT}} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right). \quad (4)$$

Скорость термоактивационного процесса (скорость изменения параметров) пропорциональна числу активных молекул ($\gamma = dX/dt \sim n(E_k > E_a)/N$) и [8]

$$\gamma = \frac{dX}{dt} = C(T) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (5)$$

где $C(T)$ – коэффициент, зависящий от механизма процесса и температуры.

Зависимость вида (5) характерна для многих процессов изменения характеристик материала и старения. Аналогичными выражениями описываются процессы, связанные с текучестью, ползучестью, усталостью, пластическим течением и разрушением твердых материалов, трением и износом полимеров и другими [9–12].

Выражение (5) также показывает, что скорость термоактивационных процессов постоянна при заданных условиях и не зависит от времени. Следовательно, можно считать, что определяющий параметр X при неизменных нагрузках и внешних условиях изменяется во времени по линейному закону

$$X = X_0 + \gamma t = X_0 + C(T) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) t, \quad (6)$$

причем скорость изменения параметра зависит от механизма процесса и температуры.

Кроме повышения температуры образование активных частиц может происходить также за счет ионизации, диссоциации, образования радикалов, под действием электромагнитного поля, электрического разряда, ультразвукового излучения и других факторов [1; 2; 8; 13].

Зависимость характеристик элементов от условий эксплуатации и испытываемых нагрузок позволяет рассчитать показатели надежности. Например, наработка объекта до отказа (между отказами) или технический ресурс (ресурс безопасной эксплуатации, γ -процентный ресурс) T технического объекта, очевидно, является случайной функцией случайной нагрузки S [2; 3]:

$$T = F(S). \quad (7)$$

Сравнивать различные технические объекты по наработке или ресурсу можно лишь в случае, если они находятся в одинаковых условиях. Для изделий определенного назначения при испытаниях целесообразно принять стандартные условия испытаний с нагрузкой, близкой к ее математическому ожиданию. Если стандартное значение нагрузки принять за начало отсчета, то случайную нагрузку можно представить в виде

$$S = S_0 + \Delta S, \quad (8)$$

где S_0 – стандартная неслучайная нагрузка; ΔS – случайное отклонение нагрузки от стандартного значения.

Разложив функцию (8) в ряд Тейлора в окрестностях точки S_0 , ограничившись только тремя первыми членами, получим [2]:

$$T \approx T_0 + \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_{S=S_0} \Delta S + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial S^2}\right)_{S=S_0} (\Delta S)^2 = T_0 + U_1 \Delta S + U_2 (\Delta S)^2, \quad (9)$$

где T_0 – случайное время безотказной работы при стандартной нагрузке S_0 ; $\Delta S = S - S_0$; $U_1 = \partial T / \partial S$ и $U_2 = \partial^2 T / \partial S^2$ – значения производных в окрестностях точки $S = S_0$.

В формуле (9) случайные величины T_0 , U_1 и U_2 характеризуют технический объект, а случайная величина ΔS – отклонение случайной нагрузки от стандартной.

Тогда математическое ожидание наработки (средняя наработка) [14]:

$$M(T) = M(T_0) + M(U_1)M(\Delta S) + \frac{1}{2}M(U_2)[M^2(\Delta S) + \sigma_S^2], \quad (10)$$

где $M(T_0)$ – средняя наработка при стандартной нагрузке (стандартная средняя наработка); $M(U_1) = dM(T) / dS$ и $M(U_2) = d^2M(T) / dS^2$ – производные средней наработки по нагрузке при $S = S_0$ (средние чувствительности к нагрузке); $M(\Delta S)$ и σ_S – среднее значение (математическое ожидание) и среднее квадратическое отклонение отклонения нагрузки от стандартной.

Таким образом, надежность технического объекта можно приближенно характеризовать величинами, не зависящими от условий эксплуатации: стандартной средней наработкой $M(T_0) = T_{cp0}$ и средними чувствительностями к нагрузке первого и второго порядков $M(U_1) = U_{cp1}$ и $M(U_2) = U_{cp2}$. Пересчет средней наработки на другие (отличные от стандартных) условия эксплуатации можно производить по приближенной формуле (10)

$$T_{cp} = T_{cp0} + U_{cp1}\Delta S_{cp} + \frac{1}{2}U_{cp2}\left[(\Delta S_{cp})^2 + \sigma_S^2\right]. \quad (11)$$

Если для сокращения записей избавиться от индекса «ср» и заменить обозначения математических ожиданий (средних значений) величин обозначениями самих этих величин, выражение (11) можно записать в виде

$$T = T_0 + U_1\Delta S + \frac{1}{2}U_2\left[(\Delta S)^2 + \sigma_S^2\right]. \quad (12)$$

Если стандартная нагрузка совпадает со средним значением, т. е. $\Delta S = 0$, то формула (12) принимает вид

$$T = T_0 + \frac{1}{2}U_2\sigma_S^2. \quad (13)$$

Для вычисления характеристик по результатам испытаний или данным эксплуатации должны быть известны значения средних наработок группы одинаковых объектов при трех или более режимах работы.

Параметры T_0 , U_1 и U_2 находятся решением системы уравнений вида (13):

$$\begin{cases} T_1 = T_0 + U_1\Delta S_1 + \frac{1}{2}U_2\left[(\Delta S_1)^2 + \sigma_{S1}^2\right], \\ T_2 = T_0 + U_1\Delta S_2 + \frac{1}{2}U_2\left[(\Delta S_2)^2 + \sigma_{S2}^2\right], \\ T_3 = T_0 + U_1\Delta S_3 + \frac{1}{2}U_2\left[(\Delta S_3)^2 + \sigma_{S3}^2\right]. \end{cases} \quad (14)$$

Если в одном из режимов средняя нагрузка совпадает со стандартной ($\Delta S = 0$), то система уравнений (8) превращается в систему из двух уравнений.

Если известны значения средних наработок при более чем трех режимах нагружения, то для нахождения параметров T_0 , U_1 и U_2 в уравнении (13) можно воспользоваться методом наименьших квадратов и обеспечить минимальное значение суммы квадратов разностей между расчетными и экспериментальными значениями средних наработок [15; 16]:

$$\sum_{i=1}^n \left\{ T_0 + U_1 \Delta S_i + \frac{1}{2} U_2 \left[(\Delta S_i)^2 + \sigma_{S_i}^2 \right] - T_i \right\}^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

где $i = 1 \div n$ – номер режима работы.

Приравняв нулю частные производные суммы (15) по переменным T_0 , U_1 и U_2 , получим систему трех уравнений, решив которую можно определить искомые характеристики.

При двух или более видах нагрузки наработка до отказа рассматривается как случайная функция случайного вектора нагрузки. При этом аналогично одномерному случаю каждую из составляющих S_i вектора нагрузки можно считать состоящей из стандартной неслучайной нагрузки S_{i0} и случайного отклонения ΔS_i , т. е. $S_i = S_{i0} + \Delta S_i$. Например, для случая двух случайных нагрузок S_1 и S_2 можно получить выражение для средней наработки, аналогичное выражению (12) [17]:

$$T = T_0 + U_{11} \Delta S_1 + U_{12} \Delta S_2 + U \cdot (\Delta S_1 \cdot \Delta S_2 + K_{12}) + \frac{1}{2} \left\{ U_{21} \left[(\Delta S_1)^2 + \sigma_{S_1}^2 \right] + U_{22} \left[(\Delta S_2)^2 + \sigma_{S_2}^2 \right] \right\}, \quad (16)$$

где U_{ij} – средние частные чувствительности к нагрузкам – значения частных производных средней наработки по соответствующим нагрузкам при $S_1 = S_{10}$ и $S_2 = S_{20}$:

$$U_{11} = \left(\frac{\partial T}{\partial S_1} \right)_{\substack{S_1=S_{10} \\ S_2=S_{20}}}, \quad U_{12} = \left(\frac{\partial T}{\partial S_2} \right)_{\substack{S_1=S_{10} \\ S_2=S_{20}}}, \quad (17)$$

$$U_{21} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial S_1^2} \right)_{\substack{S_1=S_{10} \\ S_2=S_{20}}}, \quad U_{22} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial S_2^2} \right)_{\substack{S_1=S_{10} \\ S_2=S_{20}}}, \quad (18)$$

$$U = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial S_1 \partial S_2} \right)_{\substack{S_1=S_{10} \\ S_2=S_{20}}}, \quad (19)$$

K_{12} – корреляционный момент (ковариация) случайных величин S_1 и S_2 : для дискретных и непрерывных случайных величин, соответственно, [18]:

$$K_{12} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (S_{1i} - S_1)(S_{2j} - S_2) p_{ij}, \quad (20)$$

$$K_{12} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (S_1 - S_{cp1})(S_2 - S_{cp2}) f(S_1, S_2) dS_1 dS_2, \quad (21)$$

где p_{ij} – вероятность отдельных значений S_{1i} и S_{2j} , $f(S_1, S_2)$ – совместная плотность распределения случайных величин S_{1i} и S_{2j} [10].

Таким образом, при двух видах нагрузки технический объект характеризуется шестью величинами (T_0 , U , U_{11} , U_{12} , U_{21} , U_{22}), а вектор нагрузки описывается пятью числовыми характеристиками: двумя средними значениями S_1 и S_2 , двумя средними квадратическими отклонениями σ_{S_1} и σ_{S_2} и корреляционным моментом K_{12} .

Очевидно, для нахождения характеристик объекта необходимо в общем случае иметь значения средних наработок как минимум в шести различных режимах (при этом, соответственно, составляется и решается система шести уравнений вида (14)).

Если в некоторых режимах одна или обе составляющие нагрузки равны стандартным (т. е. $\Delta S_1 = 0$ и $\Delta S_2 = 0$), то уравнение (16) принимает вид

$$T = T_0 + UK_{12} + \frac{1}{2}(U_{21}\sigma_{S1}^2 + U_{22}\sigma_{S2}^2) \quad (22)$$

и система уравнений и ее решение упрощаются.

Если, кроме того, некоторые из режимов соответствуют принятым в лабораторных условиях и $\sigma_{S1} = 0$ или $\sigma_{S2} = 0$, то решение еще более упрощается.

Приведенным методом экспериментальные данные о надежности могут быть пересчитаны на новые условия эксплуатации при сопоставлении данных лабораторных испытаний с данными реальной эксплуатации [17].

Библиографические ссылки

1. Механика современных специальных систем / под общ. ред. Н. В. Василенко и Н. И. Галибея. Красноярск : ООО «Печатные технологии», 2004. 558 с.
2. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Управление техническим состоянием потенциально опасных объектов // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 1-1(35). С. 192–196.
3. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В., Игнатьев Д. А. Оптимальное управление безопасностью промышленных объектов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2007. № 4 (17). С. 43–47.
4. Сугак Е. В., Окладникова Е. Н. Прикладная теория случайных процессов ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006. 168 с.
5. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М. : Стройиздат, 1982. 351 с.
6. Акимов В. А., Диденко С. Л., Смирнов А. С. Научные основы общей теории безопасности жизнедеятельности. М. : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2019. 252 с.
7. Киреев В. А. Краткий курс физической химии. М. : Химия, 1978. 621 с.
8. Сугак Е. В. Влияние условий эксплуатации на надежность и безопасность технических объектов // Решетневские чтения : материалы XXV Межд. науч.-практ. конф. В 2-х ч. Ч. 2 ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. С. 77–79.
9. Кубарев А. И. Надежность в машиностроении. М. : Изд-во стандартов, 1989. 224 с.
10. Костецкий Б. И. и др. Надежность и долговечность машин. Киев : Техника, 1975. 408 с.
11. Екоборн Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М. : Металлургия, 1971. 264 с.
12. Бартонов Г. М., Лаврентьев В. В. Трение и износ полимеров. Л. : Химия, 1972. 240 с.
13. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации с учетом случайных факторов // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 2(35). С. 132–136.
14. Костецкий Б. И. и др. Надежность и долговечность машин. Киев : Техника, 1975. 408 с.
15. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. С. Надежность машин. М. : Высш. шк., 1988. 240 с.
16. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М. : Высш. школа, 1988. 239 с.
17. Сугак Е. В. Экспериментальное определение зависимости показателей надежности и безопасности технических объектов от нагрузок и условий эксплуатации // Решетневские чтения : материалы XXV Межд. науч.-практ. конф. В 2-х ч. Ч. 2 ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. С. 80–82.
18. Иванова В. М. и др. Математическая статистика. М. : Высш. школа, 1975. 398 с.

ВИБРОДИАГНОСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ

Д. А. Оленцевич, Н. А. Шепета

Сибирский федеральный университет
Инженерно-строительный институт
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: olentsevich@inbox.ru

Рассматривается методика вибродиагностики технического состояния оборудования нефтеперекачивающих станций.

Ключевые слова: вибродиагностика, спектр вибросигналов, насосы технического состояние.

Диагностика технического состояния оборудования нефтеперекачивающих станций является актуальной задачей, так как во многом определяет надежность пуска, остановки и переключений насосных агрегатов, срабатывания запорно-регулирующей арматуры, включение в работу систем вентиляции, маслоснабжения, охлаждения, пожаротушения и прочие. Высокие показатели работоспособности данных элементов повышают производственную и экологическую безопасность работы объектов нефтепровода [1].

Техническая диагностика позволяет обеспечить необходимую надежность и безопасность объектов на этапе их эксплуатации, а также предотвратить производственный брак на стадии монтажа, обслуживания и ремонта оборудования.

Одним из наиболее серьезных отказов нефтяных насосов является поломка валов.

Как показывают исследования, причинами разрушения валов являются: наличие дефектов металлургического характера.

Зарождающиеся и неконтролируемые дефекты во время эксплуатации без принятия соответствующих мер существенно снижают межремонтный период работы насоса.

Дефекты или поломки валов имеют место в районе галтели при переходе конусной части вала в цилиндрическую, на резьбовой части валов, в месте крепления гайками радиально-упорных подшипников.

Многие дефекты возникают по причине образования усталостных микротрещин в районе шпоночных пазов, развития микротрещин в области внутренних пор, имеющих в материале вала флокенов или поверхностных трещин.

Анализ дефектов валов показывает заметную однотипность их в пределах одного управления магистральными нефтепроводами, что можно объяснить определенной настройкой средств дефектоскопии и принятой на данном предприятии какой-то одной отработанной технологии дефектоскопии валов.

Валы насосных агрегатов изготавливаются из стали 40Х по ГОСТ 4543–71. Заготовки могут быть иметь следующие дефекты: поверхностные и внутренние разрывы; мелкие внутренние или выходящие на поверхность трещины, внутренние нарушения сплошности; волосные трещины, образующиеся внутри толстого проката из среднеуглеродистых и среднелегированных сталей, содержащих хром, при повышенном содержании в них водорода.

При изготовлении валов могут возникнуть такие дефекты, как шлифовочные и термические трещины.

При эксплуатации валов могут появиться усталостные трещины, причинами их появления в основном являются дефекты металлургического характера и концентраторы напряжений в углах шпоночных пазов.

Последовательность неразрушающего контроля [3]:

– визуальный контроль (ВК) я на начальном этапе при приобретении или монтаже нового или отремонтированного вала с применением оптических приборов или невооруженным глазом – выявляются поверхностные дефекты;

– вихретоковый контроль (ВТК) проводится с целью поиска поверхностных и подповерхностных дефектов в районах шпоночных пазов, проточек, резьбы;

– ультразвуковой контроль (УЗК) проводится с целью выявления внутренних и подповерхностных дефектов вала по всей длине при входном контроле или при проведении первичного, вторичного и последующего (планового) контроля;

– магнитопорошковый контроль (МПК) применяется для подтверждения результатов предыдущих исследований, т. е. для уточнения местоположения и геометрических размеров поверхностных и подповерхностных дефектов.

Контроль при ремонте насосных агрегатов проводится с целью обнаружения усталостных трещин визуальным, ультразвуковым, вихретоковым и магнитопорошковым методами.

Вибрационная диагностика – это один из способов диагностирования технологического оборудования, который основывается на анализе параметров вибрации, которая создается работающим оборудованием [4–6]. Вибродиагностика может решаться следующие задачи: выявлять причины высокого уровня вибрации агрегатов и обнаруживать скрытые дефекты конструкций. Данный метод является одним из основных методов контроля технического состояния оборудования. Вибрационная диагностика позволяет достоверно определить характер и степень вибрации, а затем причины этих проявлений.

Диагностика по общему уровню вибрации использует распространенную простейшую оценку общего технического состояния по общему уровню вибросигнала. Метод реализуется обслуживающим персоналом без специальной вибродиагностической подготовки, так как для проведения диагностики дефектов достаточно использовать виброметры простейшей конструкции [2]. К недостаткам метода можно отнести то, что такая диагностика позволяет определять дефекты только на самой последней стадии развития.

Диагностика по спектрам вибросигналов позволяет выявить большое количество дефектов оборудования. Во многих случаях методом можно диагностировать дефекты агрегатов с середины второго этапа развития, когда уровень энергии резонансных колебаний заметен в общей картине частотного распределения всей мощности вибросигнала. Реализация данного метода требует хорошего спектроанализатора и подготовленного персонала.

При пропускании сигнала после вибропреобразователя через анализатор спектра с необходимой шириной полосы пропускания на выходе получим амплитудный спектр.

Разложение сложного сигнала в ряд Фурье дает составляющие спектра, представляющие собой при узкополосном анализе гармонические составляющие сложного сигнала. Для почти периодической вибрации измеряемыми величинами, так же как и для гармонических колебаний, являются пиковые, среднеквадратичные значения виброскорости, вибро смещения и виброускорения. Пересчет виброскорости, вибро смещения и виброускорения должен производиться с учетом сложения всех гармонических составляющих:

$$v_B = \sqrt{S_1^2 \omega_1^2 + S_2^2 \omega_2^2 + \dots + S_n^2 \omega_n^2}; \quad v_B = \sqrt{\frac{a_1^2}{\omega_1^2} + \frac{a_2^2}{\omega_2^2} + \dots + \frac{a_n^2}{\omega_n^2}},$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; s_1, s_2, \dots, s_n ; a_1, a_2, \dots, a_n – амплитуда вибро смещения и вибро ускорения всех составляющих вибрации по частотам.

Большинство стандартов по вибрации и нормативных документов в качестве нормируемого параметра вибрации для контроля за техническим состоянием машины или механизма устанавливают среднеквадратичные значения (СКЗ) вибро скорости в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц.

Диагностика по соотношению пик/ фон вибросигнала имеет несколько модификаций [7]:

- обнаружение высокочастотного сигнала;
- измерение ударных импульсов;
- измерение энергии импульса.

Модификации позволяют выявить дефекты агрегатов на достаточно ранних стадиях, начиная с конца первого этапа развития.

Крест-фактор – быстро рассчитываемый и удобный параметр, который позволяет пользователю определить количество ударных импульсов во временном сигнале. Эта информация полезна, тем более что не всегда может быть получена при анализе спектров, так как на спектрах отсутствуют различия между ударами и «белым шумом». Удары на временном сигнале могут быть вызваны износом элементов подшипника качения, износом зубьев в зацеплении или кавитацией. Чаще крест-фактор используется при периодическом мониторинге для наблюдения за увеличением или уменьшением числа ударов.

В синусоидальном сигнале с единичной амплитудой значение СКЗ равно 0,707, а значение крест-фактора соответственно 1,41.

Крест-фактор удобно использовать при качественной оценке происходящих процессов, так как быстрое преобразование Фурье, несмотря на утверждение, что любой сигнал может быть разложен в сумму гармонических синусоидальных сигналов, не выполняется для непериодических сигналов, ударов и «белого шума».

Диагностика по спектру огибающей сигнала – эффективный метод нахождения зарождающихся дефектов, меньше всего подвержен всевозможным помехам и имеет большую достоверность. Спектр огибающей вибрации – спектр огибающей высокочастотных случайных составляющих вибрации, которые предварительно выделены из полного сигнала при помощи полосового фильтра. Параметры спектра огибающей (частоты и амплитуды гармонических составляющих) позволяют определить свойства возникающей вибрации, которая приобретает амплитудную модуляцию, возникающую в узлах агрегата вследствие трения.

Диагностика технического состояния оборудования с применением систем вибродиагностики. Часто техническое обслуживание агрегатов в промышленности осуществляется лишь после планово-принудительных проверок, т. е. выполняется разборка приборов лишь в целях профилактического осмотра и последующего ремонта при необходимости. Такой подход к ремонтным работам не может предотвратить неожиданные повреждения подверженных износу деталей, а напротив лишь ускоряет их износ. Кроме того, неправильная сборка после профилактического осмотра вызывают последующие деформации, тем самым сокращая срок жизни машины [8].

Решить эту проблему можно, организовав непрерывный контроль изменения параметров состояния аппарата. Такой способ особенно рекомендуется для работы с дорогостоящими объектами, поломка которых может остановить весь производственный процесс (рис. 1).

Одним из лучших видов технического диагностирования, обеспечивающий оперативный контроль параметров текущего состояния машинного оборудования в процессе использования без его демонтажа, – виброакустическая диагностика. Исследуемый

параметр которой – виброакустический сигнал, содержащий информацию о колебательном процессе.

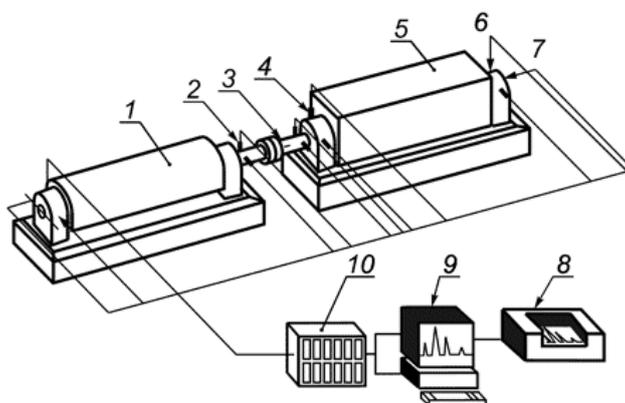


Рис. 1. Типичная стационарная система контроля в реальном масштабе времени [8]:
 1 – механизм привода; 2 – датчик перемещений вала; 3 – отметка фазы;
 4 – датчик на опоре; 5 – приводной механизм; 6 – радиальное направление измерений;
 7 – осевое направление измерений; 8 – принтер; 9 – компьютер с устройством хранения данных; 10 – устройство формирования сигнала

Вибрация насосов – основной показатель, который должен контролироваться с помощью средств измерения с определенной периодичностью. Вибродиагностика электродвигателей насосов позволяет обнаружить появляющиеся дефекты, предупредить их развитие и перейти на ремонт по фактическому техническому состоянию. Для обнаружения дефектов агрегата используется информация, полученная в измерительных точках и направлениях измерения, будь то вертикальные, горизонтальные или осевые векторы. Быстрые скачкообразные сдвиги сигнализируют о процессе разладки в механизме. Контроль осуществляется по следующим параметрам вибрации: мгновенные значения; пиковые значения; среднеквадратичные значения; частоты основного тона и гармоник; крутизна фронта нарастания и длительности действия импульса; спектральные характеристики.

Существует огромное множество электрических преобразователей, преобразующих механические колебания в электрический сигнал: пьезоэлектрические, индуктивные и вихретоковые, емкостные, пьезорезистивные и т. д. (рис. 2)

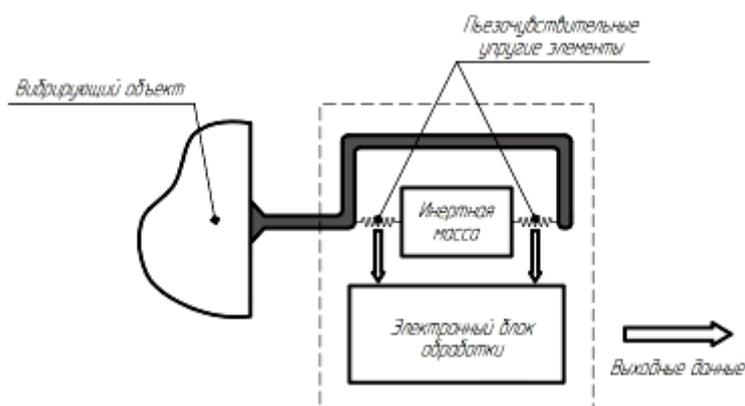


Рис. 2. Пьезоэлектрические преобразователи сигнала

Выбор датчика зависит от условий его применения. В общем случае в целях вибродиагностического контроля состояния машин используют:

– акселерометры, выходной сигнал которых подвергается соответствующему преобразованию для получения требуемой величины (ускорения, скорости или перемещения);

– датчики скорости, выходной сигнал которых может быть проинтегрирован для получения сигнала перемещения;

– датчики бесконтактного типа, выходной сигнал которых пропорционален относительному перемещению вращающейся и невращающейся частей машины.

Поскольку насосный агрегат – это рама с элементами крепления к фундаменту от приемо-выкидных трубопроводов к коллектору, при работе насосов рама подвергается сильным вибрациям.

Роторная система насосов также подвергается интенсивным вибрация, она представляет собой роторы электродвигателя и насоса, соединенных упругой муфтой, и вкладышей подшипников.

При длительной работе в насосах обоих типов происходит износ подшипников, что приводит к повышенной вибрации агрегата. Длительная эксплуатация изношенных подшипников приводит к перекосу ротора, последствия которого: рост потребления мощности, повышенный перегрев подшипников и стойки, задевание за корпус рабочего колеса, перекося и задевание за корпус сальникового уплотнения.

Сущность метода. Вибродиагностический метод контроля технического состояния машин (вибродиагностика) является одним из информативных и доступных методов диагностики. Вибродиагностика позволяет контролировать техническое состояние магистральных и подпорных насосных агрегатов в режиме постоянного слежения за уровнем вибрации, а также оценивать работоспособность вентиляторов, насосов систем охлаждения, маслоснабжения, отопления, откачки утечек и прочего оборудования путем периодического измерения и анализа параметров вибрации.

Датчики контрольно-сигнальной виброаппаратуры устанавливаются обязательно на каждой подшипниковой опоре основного и горизонтального подпорных насосов для контроля вибрации в вертикальном направлении. Для вертикальных подпорных насосов датчики устанавливаются на корпусе опорно-упорного подшипникового узла насоса для контроля вибрации в вертикальном (осевом) и горизонтально-поперечном направлениях.

При наличии многоканальной виброаппаратуры рекомендуется дополнительно устанавливать датчики для контроля вибрации в горизонтально-поперечном и осевом направлениях каждого подшипникового узла. Вертикальная составляющая вибрации измеряется в верхней части крышки подшипника над серединой длины его вкладыша. Горизонтально-поперечная и горизонтально-осевая составляющие вибрации измеряются на уровне оси вала насоса против середины длины опорного вкладыша. Вибрация всех элементов крепления насоса к фундаменту измеряется и контролируется в вертикальном направлении.

У насосов, не имеющих выносных подшипниковых узлов (насосы со встроенными подшипниками), вибрация измеряется как можно ближе к оси вращения ротора.

При эксплуатации насосных агрегатов имеет место два принципиально различных метода измерения вибраций (колебаний) – при помощи датчиков измерения абсолютных колебаний и относительных колебаний. Колебания насосных агрегатов создаются преимущественно их вращающимися частями и пульсациями давления в насосе и подводящих трубопроводах. При этом главным возбудителем колебаний является неуравновешенность роторов насоса и электродвигателя. Ротор, имеющий дисбаланс, создает во время вращения свободные центробежные силы, зависящие от частоты вращения. Их величина вычисляется на основе следующего соотношения:

$$F = u \cdot r \cdot \omega^2,$$

где F – центробежная сила; u – дисбаланс; r – радиус; ω^2 – частота вращения.

Вызванные дисбалансом центробежные силы и действующие на ротор переменные силы (например, магнитные силы, гидравлические силы и т. п.) побуждают ротор и вал ротора к колебаниям. Через масляную пленку подшипников скольжения (или через подшипники качения) колебания и усилия передаются на опоры и на фундамент машины. Передаваемые колебания зависят от: жесткости и демпфирования масляной пленки, опор и фундаментов, е массы роторов, опор и фундаментов.

Основой для определения текущего состояния оборудования являются измерения среднеквадратичного значения (СКЗ) виброскорости (мм/с), они проводятся на каждом подшипнике оборудования с горизонтальной осью вращения с последовательной фиксацией оси вибродатчика и измерением вибрации в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Существуют эмпирические правила анализа вибрации:

- горизонтальная вибрация означает дебаланс (Н);
- вертикальная – ослабление или износ фундаментных связей (V);
- осевая – несоосность (А).

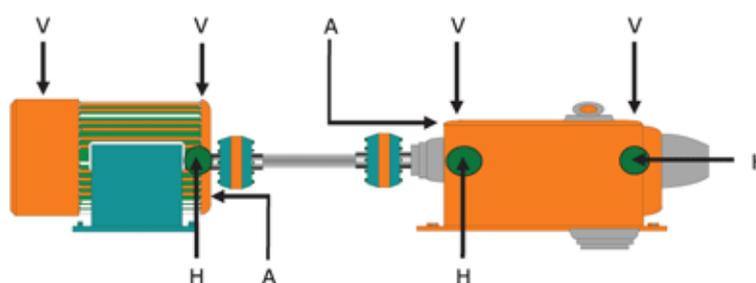


Рис. 3. Точки подключения датчиков, считывающих вибрацию:
Н – горизонтальная; V – вертикальная; А – осевая

Магистральные насосные агрегаты предназначены для перекачки нефти по магистральным трубопроводам в составе НПС в диапазоне подач номинального режима 1250–10000 м³/ч и имеют частоту вращения ротора 3000 об/мин (50 Гц).

Насос, входящий в состав агрегата – центробежный горизонтальный с двухсторонним подводом жидкости к рабочему колесу и двухзавитковым спиральным отводом жидкости от рабочего колеса. Ротор насоса состоит из вала с насаженным на него рабочим колесом, защитными втулками и крепежными деталями. Ротор центрируется относительно корпуса насоса перемещением корпусов подшипников с помощью регулировочных винтов. Опорами ротора являются подшипники скольжения с принудительной смазкой. Осевые усилия ротора воспринимают два спаренных радиально-упорных подшипника, установленных на конце вала. Концевые уплотнения ротора – механические, торцовые, гидравлически разгруженные.

Электродвигатель насосного агрегата выполняется с одним рабочим концом вала и выпускается как во взрывобезопасном, так и в нормальном исполнении.

Подача масла в подшипники насосного агрегата обеспечивается отдельно стоящей маслоустановкой.

Насос и электродвигатель могут быть установлены на отдельных фундаментных рамах или на общей плите. Фундамент агрегата – общий, монолитный.

Конструкцией насоса предусмотрены места для установки вибродатчиков, приборов дистанционного контроля температуры подшипников, утечек жидкости через концевые уплотнения ротора, температуры перекачиваемой жидкости, давления на входе и выходе насоса.

Порядок выполнения работ по вибродиагностике. В начале эксплуатации, после окончания ремонтных работ, необходимо:

1. Провести контроль качества ремонта и паспортизацию его технических параметров. В процессе эксплуатации до момента времени, после которого виброактивность машины превысит оценки «хорошо», проводится периодический экспресс-анализ по общему уровню вибрации.

2. После превышения интенсивности вибрации оценки «хорошо» устанавливается предварительный диагноз, определяется срок очередного проведения обследования и возможность дальнейшей эксплуатации. При увеличении интенсивности колебаний выше уровня (0,8–0,9) от предельно допустимого проводится техническое обследование с установкой диагноза, определяется срок и объем ремонтных работ.

В качестве нормируемого параметра вибрации устанавливается среднее квадратическое значение виброскорости.

Предельные значения колебаний валов, действительные для приемки некоторых машин по стандарту API. Предельные значения для абсолютных колебаний подшипниковых опор некоторых электродвигателей согласно стандарту ISO 2373.

Предельные значения интенсивности абсолютных колебаний подшипников больших вращающихся машин с частотой вращения ротора от 10 до 200 с⁻¹ в зависимости от вида фундамента.

Ротор, имеющий дисбаланс, приводит к колебаниям вала. Центр вала движется во время вращения по траектории, именуемой кинетической траекторией вала. В случае изотропного вала и изотропных подшипников кинетическая траектория, вызванная дисбалансом, составляет круг для каждого сечения ротора. Но обычно подшипники машин анизотропные, т. е. они имеют разную податливость в своих обоих главных направлениях жесткости. Поэтому их кинетическая траектория вала принимает характер эллипса, который, может приобрести форму прямой. Кинетическая траектория вала, вызванная дисбалансом представлена на рис. 4.

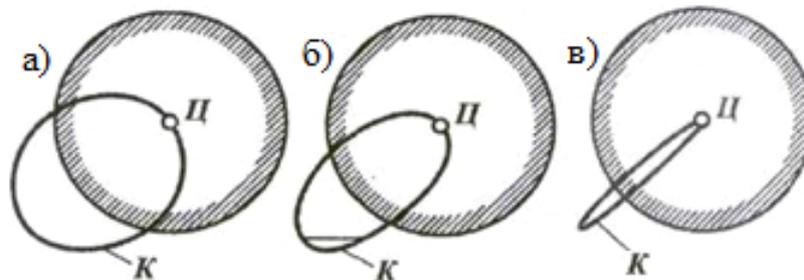


Рис. 4. Траектория вала:
а – с изотропными подшипниками; б, в, – анизотропными подшипниками;
Ц – центр вала; К – кинетическая траектория вала

Величина, форма и положение кинетической траектории вала изменяется в зависимости от частоты вращения. Кинетические траектории с наибольшим отклонением от оси вращения достигают максимума при критической частоте вращения вала. Кинетическая траектория вала содержит всю информацию о колебаниях вала ротора. Для получения кинетической траектории вала в одной радиальной плоскости ротора следует закрепить два датчика относительной вибрации в двух перпендикулярных друг другу направлениях.

Каждый датчик принимает измеряемые в соответствующем направлении вибро смещения вала $S_1(t)$ и $S_2(t)$. Синфазное сложение мгновенных вибро смещений дает мгновенную кинетическую амплитуду вала в плоскости измерения:

$$S_k(t) = \sqrt{S_1^2(t) + S_2^2(t)}.$$

Измерение колебаний вала необходимо проводить в зоне опоры. Максимальная амплитуда колебаний S_{\max} определяется как наибольшее значение кинетической амплитуды $S^f(t)$ в плоскости измерения.

Использование обслуживания оборудования по фактическому техническому состоянию позволяет:

- уменьшить количество ремонтов и сократить число запасных частей и материалов из-за проведения обслуживания на ранних стадиях развития дефектов;
- повысить надежность работы оборудования, уменьшить число внезапных отказов и аварийных ситуаций;
- сократить прибыль из-за простоев оборудования.

Библиографические ссылки

1. Вибрация в технике : справочник. В 6 т. / под ред. В. Н. Челомея. М. : Машиностроение, 1981. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К. В. Фролова. 456 с.
2. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М. : Машиностроение, 1987. 283 с.
3. Гумеров А. Г., Гумеров Р. С., Акбердин А. М. Диагностика оборудования нефтеперекачивающих станций : науч. изд. М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 347 с.: ил.
4. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машины по результатам измерения вибрации на не вращающихся частях. Введ. 01.07.1999. М. : Изд-во стандартов, 1999. 15 с.
5. ГОСТ 32106-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. Введ. 01.11.2014. М. : Стандартинформ, 2012. 10 с.
6. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Общие методы. Введ. 01.01.2011. Москва : Стандартинформ, 2019. 20 с.
7. Завгородский В. И. Управление виброустойчивостью технологической системы // ИТО. 2009. № 10. С. 22–25.
8. Коровин Я. С. Методы и средства оперативной диагностики состояния электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин на основе нейронных сетей : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.05. Таганрог, 2009. 249 с.

© Оленцевич Д. А., Шепета Н. А., 2022

ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ВНУТРИКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

М. Л. Шелудько, В. И. Шорников, В. В. Черненко, Д. А. Жуйков, М. И. Толстопятков

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: sheludkomax@yandex.ru

Представлен анализ методики поддержания чистоты на предприятиях аэрокосмической промышленности. Проанализированы системы испытаний и мониторинга чистых помещений, исследовано движение воздуха внутри систем и между ними. Результатами является разработка ряда рекомендаций по совершенствованию существующей системы стандартов и определению целесообразности выбранных нормативов чистоты при производстве космических аппаратов.

Ключевые слова: чистое помещение, движение воздуха, аэрокосмическая промышленность, космический аппарат.

Продукты и процессы во многих высокотехнологичных отраслях промышленного производства могут подвергаться серьезному риску повреждения из-за наличия аэрозольных частиц, частиц пыли, химических испарений, электростатических разрядов и других видов загрязнителей технологической среды. В последние годы область использования чистых производственных помещений значительно расширилась. Теперь они широко при производстве космических аппаратов, самолетов, автомобилей, оптического оборудования, телевизионных приемников и другой аппаратуры. Чистые помещения шагнули не только в область производства изделий медицинского назначения, но и в область медицинского обслуживания, самых различных лабораторных исследований, включая нанотехнологические. Можно сказать, что они стали существенной составляющей любого современного высокотехнологического производства.

Чистые помещения (ЧП) – это помещение, в котором счетная концентрация взвешенных в воздухе (аэрозольных) частиц и, при необходимости, число микроорганизмов в воздухе поддерживаются в определенных пределах. [6]

Чистые технологии относятся к наиболее современным и прогрессивным отраслям науки и техники. Борьба с загрязнением воздуха становится все более важной задачей в промышленности, поскольку чистый воздух необходим для создания продукции высокого качества, а также снижение вероятности брака к минимуму. Несмотря на то, что технология создания чистых зон (ЧЗ) существует уже давно, остается ряд индивидуальных проблем, которые требуют решения. Более детальное изучение процесса проектирования ЧП, контроль приборов и мониторинг движения воздуха, в совокупности, может существенно повлиять на эффективность ЧП. Ключевым фактором является то, что чистые помещения характеризуются именно счетной концентрацией частиц, т. е. числом частиц в единице объема воздуха, размеры которых равны или превышают определенную величину. Этим они отличаются от обычных помещений, в которых чистота воздуха оценивается по массовой концентрации загрязнений в воздухе. Отсюда вытекают особенности поддержания и определения показателей чистоты. Специфические требования к контрольным приборам, счетчикам частиц в воздухе и пр.

Важной характеристикой ЧП является его класс. Это четко регламентированное требование по уровню содержания различного рода примесей и частиц на единицу объёма воздуха. Международная организация стандартизации разработали серию документов по созданию чистых помещений. Первым документом этой серии стал стандарт ГОСТ ИСО 14644–1 «Классификация чистоты воздуха» [1]. В аэрокосмической отрасли класс ЧП определяется исходя из основных задач предприятия, например: Сборка космических аппаратов производится в уникальных помещениях, исключительно больших размеров, класса 8 ИСО. Изготовление отдельных блоков осуществляется в небольших чистых производственных зонах (ЧПП) классов 5 ИСО – 8 ИСО. Эти зоны предназначены для сборки блоков и выполнения отдельных операций. Чистые помещения класса 7 ИСО используются при монтаже аппаратуры, зеркал, оптики на космические аппараты и отделены от окружающего пространства воздушными и передаточными шлюзами. Внутри помещений класса 7 ИСО расположены зоны класса 5 ИСО с однонаправленным потоком воздуха. Отдельно следует выделить следующий фактор: аппараты, отправляемые на другие планеты, не должны занести туда с Земли бактерии, дрожжи, грибы и прочие жизнеспособные клетки. Выполнение этого условия возможно в помещениях класса 1 ИСО [3]. В данной работе объектом исследования являлось ЧП класса 7 ИСО – 8 ИСО, поэтому все методы по обеспечению чистоты и мониторингу представлены только для данных классов.

Классы чистоты по взвешенным в воздухе частицам для чистых помещений и чистых зон

Класс ИСО (классификационное число N)	Пределы максимальных концентраций (частицы/м ³ воздуха) частиц размером, равным и большим приведенного выше (уравнение 1 в 1.4), мкм					
	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	5,0
Класс 7 ИСО	–	–	–	352000	832000	29300
Класс 8 ИСО	–	–	–	3520000	832000	29300

Так как чистое помещение – сложное, дорогостоящее и ответственное инженерное сооружение. Для обеспечения заданного класса чистоты важен комплексный подход. Нужно следовать основным принципам обеспечения чистоты на всех этапах создания чистого помещения

В зависимости от выбранного класса ЧП, на этапе его создания, в него закладываются основные методы по обеспечению и поддержанию чистоты. Можно условно выделить следующие основные подходы к созданию чистых помещений:

1. Определение принципа разделения зон с различными классами чистоты. Разработка планировочных решений чистых помещений.
2. Формирование потока воздуха. Обеспечение необходимых характеристик однонаправленного потока воздуха.
3. Обеспечение баланса воздухообмена, необходимой доли наружного воздуха, а для помещений классов 5 ИСО – 9 ИСО – кратности воздухообмена. Построение системы вентиляции и кондиционирования.
4. Применение HEPA и ULPA фильтров и многоступенчатой фильтрации воздуха.
5. Обеспечение необходимого перепада давления (если требуется).
6. Разработка эффективных проектно-конструкторских решений, использование надлежащих материалов и оборудования. Правильный выбор подрядчика. Строительство и монтаж в соответствии с «протоколом чистоты».
7. Контроль параметров воздуха; концентрации частиц, концентрации микроорганизмов (при необходимости), однонаправленности и скорости однонаправленного потока воздуха, перепада давления, целостности HEPA и ULPA фильтров, времени восстановления параметров чистого помещения и пр.

8. Правильная эксплуатация чистых помещений, включая требования к одежде, порядку очистки, дезинфекции и пр.

9. Обучение персонала, выполнение им требований личной гигиены, правильного поведения, переодевания и пр.

10. Аттестация проекта и самого чистого помещения на всех этапах его создания [4].

Для чистых помещений и чистых зон классов 8 ИСО и 9 ИСО могут использоваться упрощённые приёмы, например, применение автономных установок очистки воздуха.

Когда чистое помещение уже построено и готово к передаче заказчику или когда уже эксплуатировавшееся чистое помещение запускается вновь после модернизации (которая могла повлиять на контролируемые параметры загрязнений), необходимо провести испытания чистого помещения. Эти первичные испытания проводятся, чтобы убедиться в том, что чистое помещение работает должным образом и соответствует классу чистоты, заложенному в проекте. Требования, которым должно удовлетворять чистое помещение определённого класса чистоты, установлено в ГОСТ Р ИСО 14644-1. Вторая цель подобных испытаний заключается в том, чтобы определить первоначальные значения характеристик чистого помещения, которые могут быть приняты за «реперные точки». При будущих проверках чистого помещения – как текущих, так и при возникновении каких-либо проблем с загрязнениями – могут быть обнаружены отклонения от реперных значений характеристик, что может установить вероятные причины загрязнений. Последней (хотя и косвенной) причинной проведения первичных испытаний чистого помещения является возможность практической подготовки и обучения персонала, который будет заниматься контролем и эксплуатацией чистого помещения. Для них это основная, а вероятно, и единственная, возможность изучить принципы работы своего чистого помещения и освоить методы контроля, которые позволяют удостовериться в том, что чистое помещение функционирует надлежащим образом.

Кроме определения характеристик чистого помещения при вводе его в эксплуатацию и последующих регулярных проверок на соответствии стандарту ГОСТ Р ИСО 14644-1, должен проводиться регулярный мониторинг чистого помещения, что является одним из ключевых способов по обеспечению стабильности внутриклиматических параметров. В помещениях низких классов чистоты мониторинга может не потребоваться, но в чистых помещениях более высоких классов он может быть необходим с точки зрения обеспечения и поддержания необходимых условий производства. При этом контроль параметров чистого помещения может быть либо постоянным, либо периодическим, но с интервалами, которые гораздо короче заданных стандартом ГОСТ Р ИСО 14644-2 для подтверждения текущего соответствия чистого помещения классу чистоты.

В чистых помещениях поддержание класса чистоты, как уже было сказано выше, достигается работой множества устройств. Для обеспечения их стабильной работы в нужном режиме их необходимо контролировать. Так, например, в случае турбулентно вентилируемого чистого помещения следует измерить расход подаваемого в чистое помещение и удаляемого из него воздуха. В случае однонаправленного потока измеряется скорость воздушного потока. Для подтверждения того, что воздушный поток между участками движется в правильном направлении от чистого участка к менее чистому, необходимо убедиться в том, что:

- перепады давления между участками имеют правильную величину;
- воздух через дверные проёмы, люки и др. движется от чистого участка к менее чистому. В процессе высокоэффективного воздушного фильтра и системы его крепления необходимо убедиться в том, что содержащиеся в воздухе загрязнения не просачиваются в чистое помещение: через повреждённый фильтр, через уплотнения между корпусом фильтра и системой его крепления или через любой другой элемент фильтра и системы его крепления. Также испытания необходимы для демонстрации того, что содержащиеся в воздухе загрязнения не поступают в чистое помещение через течи в ограждающих конструкциях.

На протяжении всего периода эксплуатации чистого помещения его рабочие параметры необходимо поддерживать на заданном уровне и контролировать соответствие помещения его классу чистоты. Из этого следует, что испытания чистого помещения надо проводить регулярно, причём в чистых помещениях более высокого класса измерения должны проводиться чаще. Стандарт ГОСТ Р ИСО 14644–2 задаёт максимальный период времени, в течение которого разрешена эксплуатация чистого помещения до проведения следующих испытаний на соответствие его классу чистоты по стандарту ГОСТ Р ИСО 14644–1 [2]. Единственным обязательным измерением, которое надо проводить с целью подтверждения соответствия чистого помещения стандарту ГОСТ Р ИСО 14644–1, является контроль концентрации частиц.

Одним из ключевых параметров достижения чистоты в ЧП является поддержание перепада давления. Для того чтобы исключить попадание воздуха в чистое помещение из смежных, более загрязнённых участков, в нем должно быть создано избыточное давление воздуха по отношению к соседним, менее чистым помещениям. Этого можно достичь, подавая в помещение больше воздуха, чем удаляется через вытяжную вентиляцию, или удаляя подаваемый воздух через смежные помещения. Для обеспечения в блоке чистых помещений правильных перепадов давления и требуемого направления движения воздуха – от более чистых зон к менее чистым – решетки для прохода воздуха или демпфирующие устройства обычно устанавливаются в нижней части дверей и стен. Важным признаком, указывающим на то, что перед нами чистое помещение, является отделка его поверхностей. Материалы для отделки внутренних поверхностей должны легко поддаваться очистке и не являться источником частиц. Поверхности должны быть выполнены таким образом, чтобы обеспечить доступ к ним во время уборки и исключить накопление загрязнений в полостях и щелях, например, при использовании напольных покрытий или утопленных в нишах светильников. Между помещениями более высокого класса чистоты и помещениями с меньшим классом чистоты необходимо поддерживать перепад давления. Рекомендуемым является значение перепада давления в 13–20 Па. При больших значениях возникают трудности при открывании дверей, при значениях меньше 5–10 Па не гарантируется предотвращение перетекания воздуха из смежных помещений в чистые. Для поддержания перепада давления в системах вентиляции применяются регуляторы потока воздуха (VAV клапаны) [5]. Они представляют собой дроссельную заслонку с регулированием угла наклона при помощи реверсивного привода. Привод, в свою очередь, подчиняется системе автоматики, которая, получая сигнал от датчика давления, подает сигнал на корректирование угла наклона заслонки для поддержания давления. Данные регуляторы устанавливаются на сборных участках вытяжных воздуховодов, забирающих воздух из чистого помещения. При отклонении значения перепада давления от заданного, регулятор корректирует поток воздуха для создания положительного или отрицательного дисбаланса воздуха в помещении.

При проектировании и сооружении помещений с перепадом давления действуют следующие рекомендации. Диапазон значений перепада давления между соседними помещениями различных классов должен составлять 10–25 Па (оптимально – около 15 Па). Точность контроля перепада давления, которую позволяет обеспечить большинство вариантов, составляет ± 5 Па, поэтому перепад давления между помещениями различных классов менее 10 Па не гарантирует надежной работы. В свою очередь, перепады давления более 25 Па, как правило, не улучшают показателей чистоты и требуются только в изолирующих помещениях. Контроль давления во всех соседних помещениях должен выполняться относительно общего референтного помещения с постоянным стабильным давлением, обычно коридора. Не рекомендуется измерять перепад давления относительно запотолочного пространства. Не допускается каскадный принцип подключения преобразователей давления, когда одно помещение с контролируемым перепадом работает по датчику, соединённому с другим помещением с меньшим или большим перепадом,

это приводит к значительным неточностям регулирования и постоянным колебаниям давления. Герметичность помещений, в которых контролируется перепад давления, должна быть достаточно высокой, но не чрезмерной. На практике гораздо чаще приходится сталкиваться с ситуацией, когда герметичность ограждающих конструкций помещения недостаточна для поддержания перепада давления, и объемов приточного или вытяжного воздуха просто не хватает для того, чтобы компенсировать возникающие перетоки в соседние помещения. При использовании в помещениях местных вытяжек периодического действия требуется применение более сложных схем регулирования давления, в том числе с внешними цифровыми контроллерами. Чем больше объем помещения и расходы приточного и вытяжного воздуха, тем сложнее контролировать давление в помещении, так как требуются очень высокая точность и скорость работы регуляторов [7]. Регуляторы с высокоскоростными сервоприводами должны применяться для высокогерметичных помещений или в случаях, когда величина перетоков и, соответственно, дисбаланс между приточным и вытяжным воздухом составляют менее 5 % общего воздухообмена. При больших расходах приточного и вытяжного воздуха для более точного контроля дисбаланса используют схемы с несколькими регуляторами расхода и давления на притоке или вытяжке.

Проведены исследования причин необходимости применения чистых помещений для изготовления и успешной и долгой эксплуатации космического аппарата (КА). Проведен анализ методов поддержания промышленной чистоты на всех этапах наземной эксплуатации КА и сформулирован комплексный подход к обеспечению решения этой задачи: совместимость требований по промышленной чистоте на всех этапах; совместимость свойств окружающей среды на переходе к следующему этапу; унификация методов контроля промышленной чистоты и используемых измерительных средств; требования по чистоте должны выставляться к КА в целом и к его составным частям, должны быть не ниже требований действующих стандартов, распространяющихся на данную продукцию и не должны противоречить стандартам на исходную продукцию.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р ИСО 14644-1–2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха. Введ. 01.04.2004. М. : ИПК «Издательство стандартов», 2003. 20 с.
2. ГОСТ Р ИСО 14644-2–2001. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 2. Требования к контролю и мониторингу для подтверждения постоянного соответствия. Введ. 01.01.2003. М. : ИПК «Издательство стандартов», 2003. 4 с.
3. Dong L., Zhang K., Qian Z. The investigation of air temperature characteristics in large-span manufacture area of clean room // *International Journal of Ventilation*. 2021. С. 1–14.
4. Крамаренко П. Т., Грималовская И. П., Севоян Т. Р. Особенности поддержания требуемых параметров воздушной среды, характерные для чистых помещений // *Приволжский научный журнал*. 2019. № 2. С. 76–80.
5. Илюшина В. В. и др. Исследование и оптимизация характеристик фильтровентиляционного оборудования чистых производственных помещений // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 4. С. 256–258.
6. Федотов А. Е. Чистые помещения. М. : Асинком, 2003.
7. Sharaeva V. P. et al. Statistical Control of Ensuring the Required Class of Clean Rooms // *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. IEEE, 2021. С. 2887–2890.

© Шелудько М. Л., Шорников В. И., Черненко В. В.,
Жуйков Д. А., Толстопятов М. И., 2022

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Е. В. Сугак, О. В. Бразговка

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: sugak@mail.ru

Предложена методика имитационного вероятностно-статистического моделирования и расчета прочностной надежности, которая позволяет учесть случайный характер нагрузок и свойств элементов технических систем и перейти от оценки прочности по коэффициентам запаса к оценке вероятности безотказной работы.

Ключевые слова: имитационное моделирование, прочностная надежность, метод Монте-Карло, генератор случайных чисел.

Важной особенностью процесса функционирования большинства технических систем во взаимодействии с внешней средой является случайный (вероятностный) характер протекающих в них процессов и явлений. Вероятностные факторы должны быть отражены в моделях как случайные события, дискретные или непрерывные случайные величины, случайные функции или процессы [1].

В частности, модели отказов технических объектов (элементов и систем) обычно представляют собой формализованное описание процессов потери работоспособности, которые позволяют установить функциональные связи между характеристиками элемента и происходящих в нем при эксплуатации процессов и параметрами надежности в некоторых простейших случаях [2–4]. Статистическая природа этих закономерностей проявляется в том, что аргументы функций являются случайными величинами и зависят от большого числа факторов.

Если случайные величины, значения которых оказывают определяющее влияние на работоспособность элемента, распределены по сложным законам или надежность элемента определяется воздействием еще и других случайных факторов (параметров окружающей среды, характеристик обрабатываемых материалов и т. д.), то аналитический расчет надежности становится практически невозможным.

В этих случаях для прогнозирования поведения элементов и систем целесообразно воспользоваться методами статистического имитационного моделирования, которые являются практически универсальными для определения закона распределения параметров состояния технических объектов и расчета надежности по известным законам распределения влияющих на него случайных величин [5–9].

Статистическое моделирование – метод исследования, основанный на описании состояния или процессов функционирования элементов в их взаимосвязи друг с другом и с окружающей средой с целью получения множества частных результатов, подлежащих обработке методами математической статистики. Если статистическое моделирование выполняется с использованием имитационной модели, то такое моделирование называется имитационным.

Имитационное моделирование обеспечивает возможность испытания, оценки и проведения экспериментов с исследуемой системой без каких-либо непосредственных воздействий на нее.

Достоинством статистического моделирования является универсальность, гарантирующая принципиальную возможность проведения анализа систем любой степени сложности с любой степенью детализации. Недостаток статистического моделирования – трудоемкость процесса моделирования и частный характер результатов, не раскрывающий зависимости, а лишь определяющий ее в отдельных точках.

В основе имитационного статистического моделирования лежат методы статистических испытаний – методы Монте-Карло – группа численных методов для изучения случайных процессов [10–13]. При этом процесс описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин, модель многократно обчисляется, на основе полученных данных вычисляются вероятностные характеристики процесса.

Генерация случайных чисел (величин) – процесс, который с помощью устройства (генератора) генерирует последовательность чисел, которую невозможно разумно предсказать. За эталон генератора случайных чисел принят «стандартный» генератор, который порождает последовательность случайных чисел с равномерным законом распределения в интервале от 0 до 1. Практически все приемы статистического моделирования всех случайных объектов (событий, величин, векторов и процессов) основаны на использовании стандартных равномерных случайных чисел [13; 14].

Генераторы случайных чисел могут быть действительно случайными («аппаратные» или «физические» генераторы), которые генерируют случайные числа в зависимости от текущего значения какого-либо атрибута физической среды, который постоянно изменяется и который практически невозможно смоделировать [13–17]. С распространением вычислительной техники появились методы генерирования и генераторы случайных чисел, совместимые с компьютерами, в которых случайные числа вырабатываются специальной электронной приставкой – датчиком случайных чисел (величин), служащей в качестве одного из внешних устройств компьютера. В качестве физического эффекта, лежащего в основе таких генераторов, чаще всего используются шумы в электронных и полупроводниковых приборах, космическое излучение и явления распада радиоактивных элементов (количество радиоактивных частиц) [14–16].

В настоящее время большинство расчетов методом Монте-Карло проводится с помощью генераторов псевдослучайных чисел, представляющих некоторые вычислительные программы. Преимуществами псевдослучайных чисел являются возможность при необходимости повторного воспроизведения расчетов, быстрота получения чисел, отсутствие внешних устройств и необходимости многократной проверки качества получаемых чисел, малая загруженность памяти ЭВМ [16; 17].

Подавляющее большинство способов получения псевдослучайных последовательностей основано на рекуррентных соотношениях, позволяющих получить каждое следующее число ряда с помощью некоторых математических операций с предыдущим числом ряда [13–17]:

$$x_{i+1} = F(x_i). \quad (1)$$

Методы формирования псевдослучайных чисел с заданным законом распределения основаны на использовании стандартных генераторов равномерно распределённых случайных величин. При этом наибольшее распространение получил аналитический метод обратных функций, суть которого заключается в построении математической зависимости, связывающей значения случайной величины с заданным законом распределения со значениями случайной величины, распределённой равномерно в интервале (0; 1).

Задача решается путем моделирования случайной величины R , равномерно распределённой на интервале (0; 1), и преобразования последовательности случайных чисел r_1, r_2, \dots, r_n в последовательность x_1, x_2, \dots, x_n . В общем случае преобразование можно реализовать с помощью некоторой обратной функции

$$X = F^{-1}(R), \quad (2)$$

связывающей случайные числа с равномерным распределением со случайными числами с заданным законом распределения (рис. 1).

Таким образом, генерируя последовательность значений r_1, r_2, \dots, r_n и откладывая их по оси ординат, можно найти соответствующие значения x_1, x_2, \dots, x_n случайной величины X , распределённой по заданному закону $F(x)$.

На рисунке в качестве примера приведено моделирование методом обратных функций случайных чисел с нормальным законом распределения, заданным математическим ожиданием μ и средним квадратическим (стандартным) отклонением σ :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \quad f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (3)$$

Многие современные пакеты прикладных программ для решения статистических задач предлагают как готовые аппроксимации функций распределения и обратных функций, так и средства для их построения [7; 14]. Кроме того, в них имеются и готовые подпрограммы генерации случайных чисел (до двух десятков типов распределений).

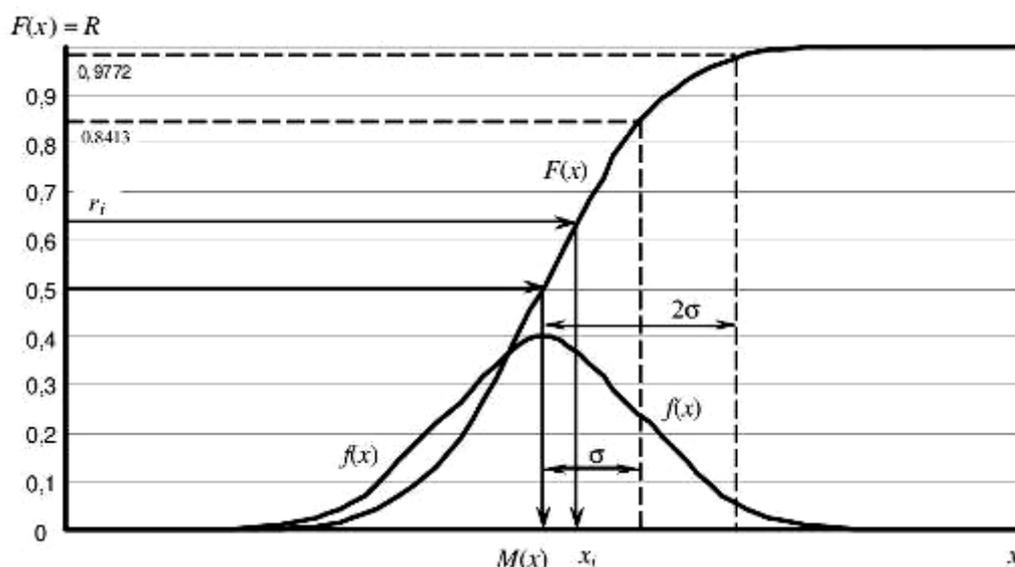


Рис. 1. Моделирование случайных чисел с нормальным законом распределения методом обратных функций

Основная идея метода Монте-Карло при статистическом моделировании надежности заключается в многократном расчете определяющего параметра (или параметров) по известным зависимостям, описывающим процесс потери работоспособности. при этом для случайных аргументов, входящих в расчетные формулы, перебираются их наиболее вероятные значения в соответствии с известными законами распределения. Таким образом, каждое статистическое испытание заключается в выявлении одной из реализаций случайного процесса или события, а их совокупность позволяет оценить ход этого процесса и его основные параметры.

В общем случае можно считать, что значение определяющего параметра X определяется набором случайных величин Z_i ($i = 1, 2, \dots, n$), законы распределения которых известны (или дискретные значения которых заданы своими вероятностями), т. е.

$$X = X(Z_1, Z_2, \dots, Z_n). \quad (4)$$

Так как аргументы функции (4) являются случайными величинами, то и параметр X является случайной величиной. Поэтому для анализа надежности по параметру X необходимо проанализировать его распределение и для оценки вероятности безотказной работы определить долю, которую составляют допустимые режимы ($X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$).

На первом этапе реализации метода Монте-Карло в зависимости от необходимой точности определения характеристик надежности выбирается необходимое число реализаций N . Затем из заданного диапазона изменения каждого из аргументов Z_i по известным законам распределения $f(Z_i)$ случайным образом с использованием генератора случайных чисел выбирается по N значений каждого из аргументов [5; 19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 \in \{z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1j}, \dots, z_{1N}\} \\ Z_2 \in \{z_{21}, z_{22}, \dots, z_{2j}, \dots, z_{2N}\} \\ \dots \\ Z_i \in \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{iN}\} \\ \dots \\ Z_n \in \{z_{n1}, z_{n2}, \dots, z_{nj}, \dots, z_{nN}\} \end{array} \right. \quad (5)$$

Для каждого из наборов значений по формуле (4) рассчитывается определяющий параметр X . По выборке из N значений $X \in \{X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_N\}$ строятся гистограмма параметра X , кривая плотности распределения $f(X)$ и интегральная кривая функции распределения $F(X)$ параметра X . Полученные кривые $f(X)$ и $F(X)$ аппроксимируются какой-либо функцией распределения (если это необходимо) [1].

Таким образом, одной из задач статистического моделирования может быть определение закона распределения полученных результатов случайной величины – определяющего параметра объекта или процесса и количественных значений его характеристик. Вид функции распределения, как правило, заранее не известен и должен определяться по эмпирическим данным. Предположение (статистическая гипотеза) о виде функции распределения может быть сделано из анализа экспериментальных данных или каких-либо дополнительных соображений (например, из физической сущности процессов и явлений).

Для оценки надежности элементов могут быть рассмотрены модели отказов двух основных типов – «нагрузка – прочность» (прочностная надежность) и «параметр – поле допуска» (параметрическая надежность). В обоих случаях элемент считается работоспособным, пока его основные характеристики (определяющие параметры) в процессе эксплуатации не достигнут предельных значений (границ рабочей области) и между моделями этих двух видов имеются только методологические различия [20]. Однако если в первом случае имеют место в основном внезапные отказы (практически мгновенное нарушение работоспособности), то во втором – в основном постепенные (достаточно плавное «сползание» параметров к границе допустимых значений).

Надежность по параметрам прочности (прочностная надежность) – свойство элемента сохранять работоспособное состояние под воздействием внешних нагрузок. Показателями надежности по параметрам прочности могут быть средняя наработка до отказа или вероятность безотказной работы элемента. Показатели прочностной надежности определяются в зависимости от принятых критериев предельного состояния. Критериями предельного состояния по параметрам прочности могут быть определенное число циклов нагружения или накопление определенной величины остаточных изменений параметров, другие характеристики элемента.

В реальных условиях при изготовлении и эксплуатации практически всегда наблюдаются разбросы фактических значений прочности, внешних и внутренних нагру-

зок, то есть прочность и нагрузка являются величинами случайными. Эти разбросы связаны с особенностями проектирования, изготовления и применения элементов, строением и структурой конструкционных материалов, другими причинами.

Характеристики распределений прочности и нагрузки могут быть получены аналитическими или экспериментальными методами с использованием методов математической статистики [22]. Для наглядности кривые плотности вероятности нагрузки $f(S)$ и прочности $f(R)$ удобно совместить на одном графике (рис. 2).

Работоспособность элемента будет обеспечена, если нагрузка не будет превышать нижнего предела диапазона прочности. На практике при расчетах элементов различных технических систем часто ограничиваются введением коэффициента запаса прочности, который равен отношению математических ожиданий (или средних значений) величин прочности и нагрузки $K = M(R) / M(S)$. На самом деле, очевидно, что при сравнительно большом разбросе возможных значений величин нагрузки и прочности существует вероятность отказа элемента по параметру прочности даже при сравнительно большом значении коэффициента запаса прочности K (рис. 2).

Состояние элемента по условию прочности может считаться безотказным, если нагрузка S не превышает прочности (несущей способности) элемента R ($S \leq R$) или запас прочности $L = R - S > 0$, и тогда вероятность безотказной работы элемента при известных законах распределения S и R равна вероятности этого события (рис. 3):

$$P = p(R > S) = p(L > 0) = \int_{M(R)-M(S)}^{\infty} f(L) dL. \quad (6)$$

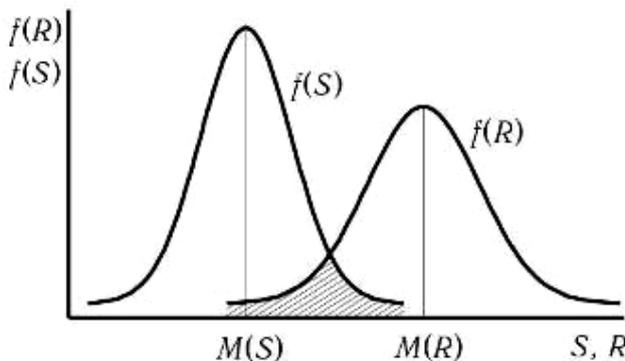


Рис. 2. Плотность вероятности нагрузки S и прочности R

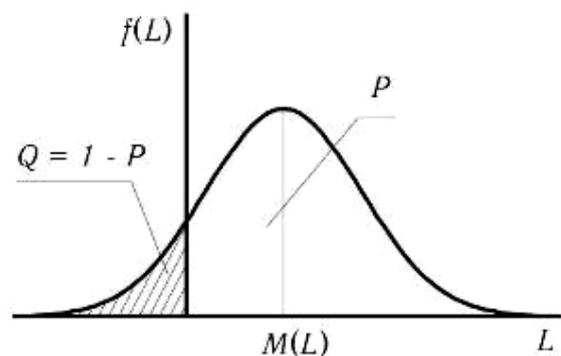


Рис. 3. Плотность вероятности запаса прочности $L = R - S$

Примерная блок-схема реализации метода Монте-Карло при моделировании прочностной надежности элементов изображена на рис. 4.

Таким образом, вероятностные статистические расчеты прочности позволяют учесть случайный характер нагрузок и свойств элементов, перейти от оценки прочности по коэффициенту запаса прочности к оценке вероятности безотказной работы и прогнозированию ресурса [21].

В тех случаях, когда вид и параметры распределения нагрузки и прочности неизвестны, их приходится принимать исходя из каких-либо дополнительных соображений. Для этого чаще всего используются равномерное и нормальное (в том числе усеченное) распределения.

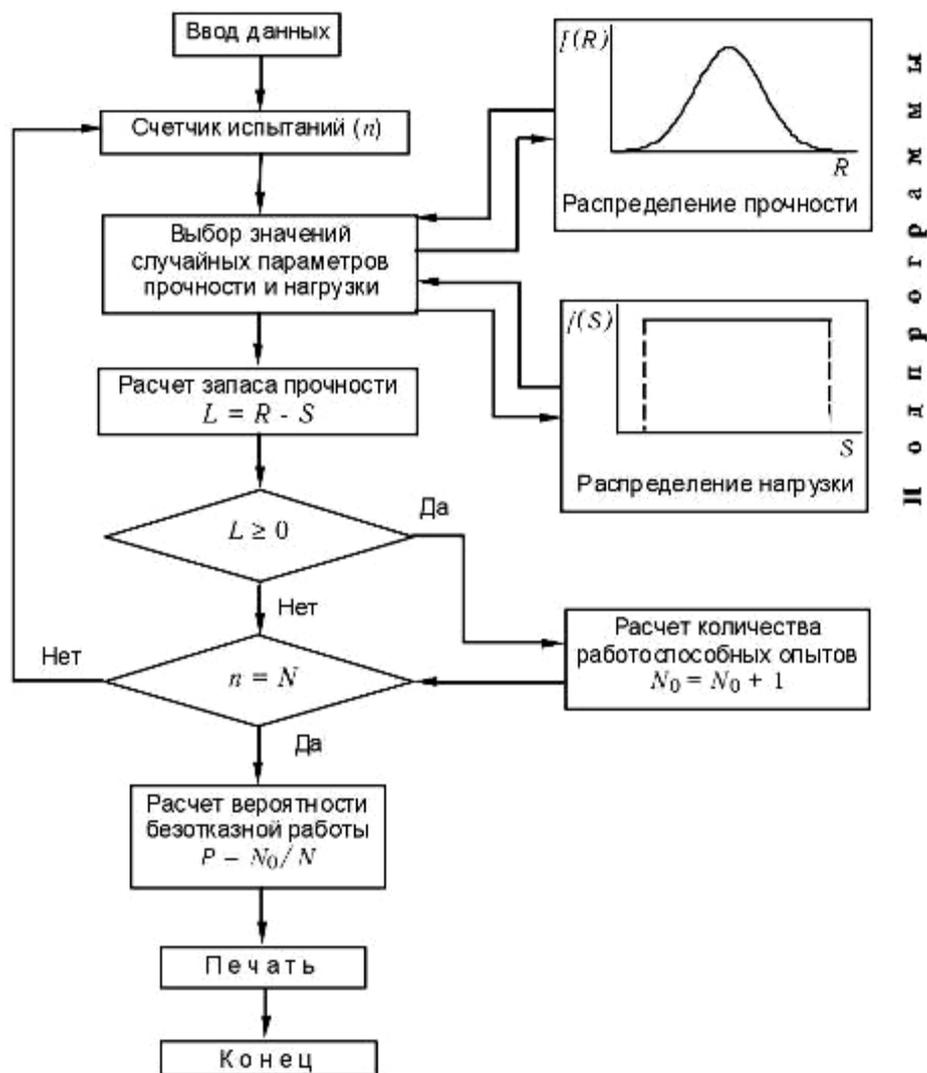


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета вероятности безотказной работы элемента по параметру прочности методом Монте-Карло

Для конструкционных материалов принимается коэффициент вариации прочности $v_R = \sigma_R / M(R)$: для обычных сталей и титановых сплавов – 0,02–0,06, для улучшенных или нормализованных сталей – 0,03–0,04, для сталей с термическим упрочнением поверхности – 0,05–0,07, для алюминиевых сплавов – 0,014–0,070, для остальных материалов – 0,07–0,10, для литых деталей – в 3–5 раз больше [23–25].

Библиографические ссылки

1. Сугак Е. В., Окладникова Е. Н. Прикладная теория случайных процессов / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006. 168 с.
2. Сапожников В. В., Сапожников В. В., Ефанов Д. В. Основы теории надежности и технической диагностики. СПб.: Лань, 2019. 588 с.
3. Сугак Е. В., Василенко Н. В., Назаров Г. Г. и др. Надежность технических систем. Красноярск: МГП «Раско», 2001. 608 с.
4. Гусев А. С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 224 с.
5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.

6. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М. : Машиностроение, 1984. 312 с.
7. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. СПб. : Корона принт ; М. : Альтекс-А, 2004. 384 с.
8. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. СПб. : Питер, 2004. 847 с.
9. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М. : Юрайт, 2019. 343 с.
10. Шрейдер Ю. А. и др. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). М. : Изд-во физ.-мат. лит., 1962. 334 с.
11. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло. М. : Наука, 1973. 311 с.
12. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и системные вопросы. М. : Наука, 1975. 327 с.
13. Жданов Э. Р., Маликов Р. Ф., Хисматуллин Р. К. Компьютерное моделирование физических явлений и процессов методом Монте-Карло. Уфа : Изд-во БГПУ, 2005. 124 с.
14. Вадзинский Р. Н. Статистические вычисления в среде Excel. СПб. : Питер, 2008. 608 с.
15. Иванова В. М. Случайные числа и их применение. М. : Финансы и статистика, 1984. 111 с.
16. Поляк Ю. Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. М. : Советское радио, 1971. 400 с.
17. Михайлов Г. А., Войтишек А. В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. М. : Академия, 2006. 368 с.
18. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
19. Креденцер Б. П. и др. Решение задач надежности и эксплуатации на универсальных ЭЦВМ. М. : Сов. радио, 1967. 400 с.
20. Барзилович Е. Ю. и др. Вопросы математической теории надежности. М. : Радио и связь, 1983. 376 с.
21. Гребеник В. М., Цапко В. К. Надежность металлургического оборудования : справочник. М. : Металлургия, 1980. 344 с.
22. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
23. Хазов Б. Ф., Дидусев Б. А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М. : Машиностроение, 1986. 224 с.
24. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. С. Надежность машин. М. : Высшая школа, 1988. 240 с.
25. Тимошенко С. П., Симонов Б. М., Горошко В. Н. Надежность технических систем и техногенный риск. М. : Юрайт, 2020. 502 с.

© Сугак Е. В., Бразговка О. В., 2022

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АКУСТИКО-ТОПОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ И ПРОВЕДЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Г. М. Гринберг, Н. А. Ермиенко, А. А. Негодяев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: grinberg_gm@mail.ru, nadukako@ya.ru, andrewnegodyaev@gmail.com

В статье обосновывается необходимость проведения лабораторных работ по профильным дисциплинам, освещены проблемы организации лабораторного практикума и предложены возможные пути решения этих проблем. Приведено описание разрабатываемых лабораторных стендов для изучения акустико-топографического метода контроля и проведения вибрационных испытаний.

Ключевые слова: контроль качества продукции, акустико-топографический метод, вибрационные испытания, лабораторная установка, лабораторный практикум.

Объективная необходимость и проблемы организации лабораторного практикума

Одним из основных требований к выпускнику любой ступени обучения инженерно-технических вузов – это необходимая профессиональная компетентность, которая в дальнейшем должна перерасти в высокий профессионализм. При этом следует отметить, что «высокий профессионализм» – это компетентность специалиста + различные виды опыта, связанного с данной профессией [1].

Опыт приходит со временем, а компетентность (в том числе и навыки) будущий инженер должен получить в вузе на лекциях, практических занятиях, при выполнении работ лабораторного практикума. Лабораторный практикум – это потенциально наиболее значимый и результативный компонент естественно-научной, общей профессиональной и специальной подготовки в области техники и технологий. Лабораторный практикум предназначен для приобретения навыков работы на реальных или близких к ним по своим функциональным возможностям приборах, стендах, оборудовании, с аналогами которых будущему специалисту, возможно, придется иметь дело в своей практической деятельности.

Важность такого вида учебных занятий как лабораторные занятия находит подтверждение в действующих государственных образовательных стандартах, регламентирующих перечни учебных дисциплин, изучение которых должно сопровождаться выполнением лабораторных практикумов.

Точно так же, как умению читать техническую литературу, разбираться в электрических и монтажных схемах, конструкторской документации, умению проводить поверочные и проектные расчеты, использовать аппарат моделирования, будущий технический специалист в обязательном порядке должен быть обучен технике постановки и проведения лабораторного эксперимента. Лабораторный эксперимент выполняется в специализированных учебных лабораториях. Эффективность данного вида занятий во многом определяется возможностями учебного заведения:

- в оснащении учебных лабораторий современным оборудованием;
- в выборе номенклатуры объектов экспериментального изучения и содержания лабораторных работ;
- в реализации эффективных технологий выполнения работ и т. д. [2].

Практическая реализация рассматриваемого компонента учебного процесса сопряжена со существенными затратами ресурсов, которые могут составлять до 80 % всех затрат на подготовку специалистов в области техники и технологий. Понятно, что в условиях резкого уменьшения финансирования учебных заведений первой жертвой становятся учебные лаборатории.

Возможные пути решения организации лабораторного практикума

В рамках освоения программ обучения выпускники университета должны быть подготовлены к решению обозначенных в образовательных стандартах задач профессиональной деятельности. Для выпускников кафедры систем автоматического управления (САУ) одной из таких задач является испытательно-эксплуатационная профессиональная деятельность.

Студенты, обучающиеся на кафедре САУ изучают ряд дисциплин, тематика которых связана с освоением технологии проведения испытаний и контроля систем управления летательными аппаратами:

– дисциплина «Испытание приборов и систем управления летательными аппаратами» изучают магистранты направления подготовки 24.04.02 Системы управления движением и навигация, образовательных программ «Электроэнергетические комплексы космических аппаратов» (ЭККА) и «Конструкторско-технологическое обеспечение разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации систем управления ракетно-космической техники» (КТО);

– дисциплина «Технология испытаний и контроля систем управления ракетно-космической техники» изучают магистранты направления подготовки 24.04.02 Системы управления движением и навигация, образовательной программы КТО;

– дисциплина «Испытание приборов и систем управления» изучают бакалавры направления подготовки 24.03.02 Системы управления движением и навигация, образовательной программы «Системы управления летательными аппаратами»

– дисциплина «Испытания и эксплуатация систем управления летательными аппаратами» изучают специалисты специальности 24.05.06 «Системы управления летательными аппаратами», специализация образовательной программы «Системы управления ракет».

Соответственно, содержание перечисленных дисциплин, **организация, формы и методы обучения должны быть** подчинены требованиям, которые предъявляются к выпускникам инженерно-технических вузов предприятиями-работодателями в части проведения проверки технического состояния, оценки работоспособности и определения пригодности к применению по назначению систем управления летательными аппаратами, входящих в них сборочных единиц, узлов, деталей, а также используемых для их изготовления материалов.

Значительная часть от общего объема перечисленных дисциплин отводится на проведение лабораторных работ, которые должны иметь соответствующее техническое оснащение. Но, как было показано выше, в современных условиях для обеспечения требуемого оснащения нет необходимого количества финансовых, материальных, интеллектуальных ресурсов. Острота этой проблемы усиливается при переходе на новые принципы в организации обучения, так как дополнительно возникает потребность в подготовке средств материально-технического обеспечения на новой технологической основе.

Как было показано в работе [3] в условиях нехватки лабораторного оборудования и уменьшения финансирования на его приобретение одним из путей решения названных проблем является разработка лабораторных установок специалистами и студентами вуза. Такого рода решение позволяет обеспечить требуемый уровень качества лабораторных установок, поскольку в местах их использования известны конкретные требуемые технические характеристики. Такой подход служит упрощению лабораторных установок, избавлению их от лишних функций, что способствует удешевлению установок. Вместе с тем установки наделяются всеми необходимыми функциями. К тому же уча-

стие студентов к разработке и изготовлению лабораторных установок является важным учебным элементом при обучении студентов.

Разработка лабораторной установки для изучения акустико-топографического метода контроля

В настоящее время ни один технологический процесс получения ответственной продукции не внедряется в промышленность без соответствующей системы контроля качества. Из всех известных методов контроля качества наибольшими функциональными возможностями обладают физические методы неразрушающего контроля. Поэтому в настоящее время физические методы неразрушающего контроля (методы НК) – самая массовая технологическая операция.

Из всего многообразия методов НК можно выделить акустические методы, основанные на регистрации параметров упругих колебаний, возбужденных в исследуемом объекте. Эти методы широко применяются для контроля толщины деталей, сплошности (трещин, пористости, раковин и т. п.) и физико-механических свойств (зернистости, межкристаллитной коррозии, глубины закаленного слоя и др.) материала. Метод пригоден для деталей, материал которых способен упруго сопротивляться деформациям сдвига (металлы, фарфор, оргстекло, некоторые пластмассы) [4].

Для контроля многослойных соединений создан акустико-топографический метод, физическая сущность которого заключается в возбуждении ультразвуковых колебаний во всем контролируемом изделии и выявлении дефектов визуализацией колебаний разных уровней дефектной и бездефектной областей и фиксацией по всей поверхности конструкции интегральной картины колебаний поверхности. В качестве индикатора используют тонкодисперсный порошок, который характеризуется свойством суммировать информацию о дефекте в течение всего процесса контроля, то есть при возбуждении различных мод колебаний [5].

Метод акустико-топографического контроля материалов и изделий пригоден для выявления локальных дефектов между слоями, независимо от способа соединения слоев материала между собой: пайкой, склейкой, диффузионной сваркой, гальванопокрытием, напылением, нанесением пленок и т. д. что определяет возможность использования его в различных отраслях промышленности.

Структурная схема промышленной установки для проведения акустико-топографического контроля приведена на рис. 1

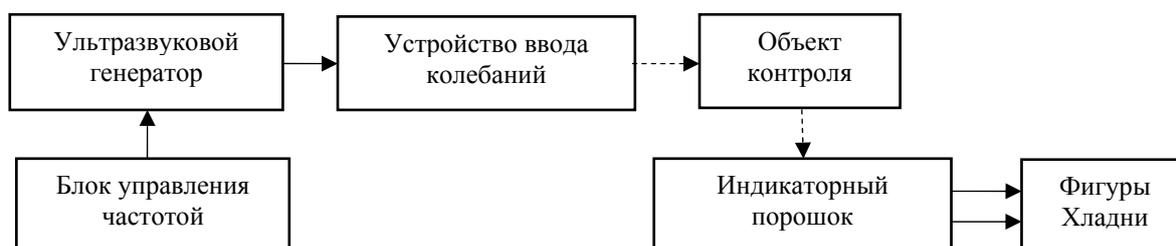


Рис. 1. Структурная схема установки акустико-топографического контроля

При обеспечении достаточно сильных колебаниях поверхности объекта контроля с заданной частотой частицы порошка из мест, не принадлежащих узлам, постепенно смещаются к узлам колебаний, рисуя картину распределения узловых линий на поверхности – так называемые фигуры Хладни. Для бездефектного изотропного материала эта картина получается четкой и непрерывной. Если же в материале имеется дефект, то в зоне дефекта картина меняется: узловые линии искажаются в месте наличия включений, а также на участках, характеризующихся анизотропией механических свойств, или прерываются при наличии расслоения [6]. Порошок образует «топографическую»

карту внутренних дефектов в соответствии с их размерами, границами и местом расположения.

С целью создания условий, позволяющих студентам изучать акустико-топографический метод НК, авторами статьи разработана лабораторная установка, по функциональному исполнению подобная промышленной. Концепция реализации лабораторной установки изложена в работе [7].

Для управления работой устройства ввода колебаний (см. рис. 1) предполагается использовать стандартный генератор высокой частоты (например, имеющиеся на кафедре САУ генераторы ГЗ-109 или ГЗ-122). В качестве объектов контроля будут использованы металлические или пластмассовые пластины, имеющие специально созданные невидимые дефекты разной природы, которые в ходе выполнения лабораторной работы студентам необходимо обнаружить с помощью изучаемого метода.

В ряде работ (например, в [8]) было высказано предложение использовать в качестве источника колебаний при демонстрации фигур Хладни электродинамический громкоговоритель. Такой подход был использован авторами статьи для создания устройством ввода колебаний.

В разработанной лабораторной установке устройством ввода колебаний будет служить доработанная широкополосная акустическая система (электродинамический громкоговоритель) типа FM1130, показанная на рис. 2.



Рис. 2. Доработанная широкополосная акустическая система типа FM1130

Доработка заключалась в установке на акустическую систему специально сконструированного фланца с закрепленной в нем втулкой. Во втулке установлен шток, свободно перемещающийся вдоль оси последней. Один конец штока прикреплен к диффузору акустической системы. К противоположному концу штока крепится объект контроля, который при колебаниях диффузора акустической системы будет колебаться вместе с ним.

Разработка лабораторной установки для обучения студентов проведению вибрационных испытаний и калибровке вибродатчиков

Воздействие различного характера вибраций на изделия авиационной и ракетно-космической техники на этапах ее жизненного цикла часто приводит к возникновению в них механических дефектов и (или) ухудшению значений параметров (характеристик). В связи с этим предусматривается проведение лабораторно-стендовых испытаний таких изделий на воздействие вибрации с помощью виброиспытательных систем, например, таких, как описанная в [9] виброиспытательная система на базе вибростенда TV 51140.

Современные виброиспытательные системы представляют собой сложные компьютеризированные комплексы, включающие в себя помимо вибростенда систему управления виброиспытаниями. Основным звеном виброиспытательной системы является вибратор – исполнительный элемент, предназначенный для воспроизведения заданных

колебаний. В зависимости от принципа действия вибратора в установке используют различные способы задания испытательного режима. Самое широкое распространение в практике виброиспытаний получили электродинамические вибраторы [10].

Электродинамические вибраторы позволяют преобразовать электрический сигнал в механическое движение и в заданном режиме поддерживать определенный уровень или силу вибрации. По конструкции и принципу действия электродинамические вибраторы подобны электродинамическим громкоговорителям, в которых движение возникает при прохождении тока через катушку, помещенную в магнитное поле. Сила, служащая для ускорения подвижного элемента (диффузора), пропорциональна току возбуждения и магнитному потоку. Таким образом, регулируя ток, можно регулировать уровень вибрации подвижного элемента.

Из сказанного следует, что показанную на рис. 2 доработанную акустическую систему можно использовать в качестве малогабаритного электродинамического вибратора в лабораторной установке для проведения вибрационных испытаний. Ввиду незначительной нагрузочной способности вибратора на базе акустической системы в качестве испытуемых могут быть использованы только имеющие небольшую массу изделия (например, различные микроэлектромеханические устройства, изготовленные по МЭМС технологии).

Структурная схема разрабатываемой лабораторной установки для проведения вибрационных испытаний показана на рис. 3.

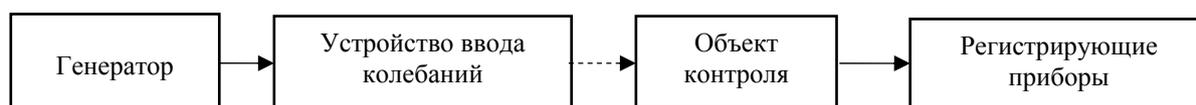


Рис. 3. Структурная схема установки для проведения вибрационных испытаний

В первоначальном варианте лабораторной установки планируется в качестве датчика управляющих сигналов использовать стандартные генераторы высокой частоты (например, ГЗ-109, ГЗ-122 или им подобные). В качестве регистрирующих приборов будут использованы электроизмерительные приборы, осциллографы, типы которых будут определяться в зависимости от технических характеристик объекта контроля.

На втором этапе предполагается автоматизация лабораторной установки, которая позволит воспроизводить циклограммы вибровоздействия с изменяющимися в автоматическом режиме параметрами воздействия (форму, величину, продолжительность, скорость изменения и др.). Для этого в состав лабораторной установки будет введен, на базе которого будет создан программируемый генератор электрических сигналов. Микроконтроллер будет также выполнять функции регистрации измеряемых параметров.

Разработанную лабораторную установку также можно использовать для калибровки (поверки) малогабаритных датчиков вибрации (акселерометров), например, АВС 136, масса которых в зависимости от модификации колеблется от 13 до 17 грамм.

Точность, надежность и универсальность акселерометров теряют свое значение в случае, если нельзя обеспечить прослеживаемую связь результатов осуществляемых при помощи этих акселерометров исследований механических колебаний с абсолютными эталонами единиц соответствующих физических величин. Цель калибровки заключается в обеспечении такой связи и, следовательно, в придании значения параметрам используемой аппаратуры и сохранении нужного доверительного уровня получаемых при помощи этой аппаратуры результатов [11].

Для калибровки акселерометров используются разные методы. Самым распространенным является метод сличения с образцовым акселерометром. Калибровка производится путем сравнения на заданном уровне вибрации выходных сигналов акселерометра, подлежащего калибровке, и акселерометра-эталона. В этом случае соединенные механически друг с другом калибруемый и эталонный акселерометры устанавливаются на

место объекта контроля (см. рис. 3). Структурная схема установки и методика калибровки (поверки) акселерометров будут подобными описанным публикации [12].

В разработке и изготовлении лабораторных установок для изучения акустико-топографического метода контроля и проведения вибрационных испытаний принимали активное участие студент-магистрант А. А. Негодяев и студент-специалист Н. А. Ермиенко.

Библиографические ссылки

1. Пиралова О. Ф. Современное обучение инженеров профессиональным дисциплинам в условиях многоуровневой подготовки [Электронный ресурс]. URL: <https://www.monographies.ru/ru/book/view?id=62> (дата обращения: 19.11.2021).

2. Современная концепция реализации лабораторного практикума в техническом университете [Электронный ресурс]. URL: <http://edu.kspu.ru/file.php/1/hrestomatia/part12.html> (дата обращения: 16.11.2021)

3. Гринберг Г. М. Развитие интегрированной системы обучения студентов технического вуза в условиях учебно-производственной среды : дис. ... канд. пед. наук : 13.00.08. Красноярск, 2006. 225 с.

4. Дефектоскопия. Методы дефектоскопии [Электронный ресурс]. URL: <https://starimpex.ru/raznoe/defektoskopiya-eto.html> (дата обращения: 21.12.2021).

5. Абрамов И. П., Алдашкин И. В., Алексеев Э. В. Ракетно-космическая техника : учеб. пособие / под ред. В. П. Легостаева. М. : Машиностроение, [б. г.]. Кн. 2. 2014. 548 с. ISBN 978-5-94275-621-5 // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/63259> (дата обращения: 14.12.2021).

6. Поверка дефектоскопов [Электронный ресурс]. URL: <http://express-poverka.ru/259584304> (дата обращения: 21.01.2022).

7. Ермиенко Н. А., Негодяев А. А. Организация изучения студентами акустико-топографического метода неразрушающего контроля // Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс] : сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (13–17 апреля 2020 г., Красноярск) : в 3 т. Т. 3 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. URL: <https://apak.sibsau.ru/page/materials>. С. 938–941.

8. Фигуры Хладни. Киматика [Электронный ресурс]. URL: https://go.mail.ru/search_video?fr=main&frm=main&q=%D1%81%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%8C%20%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D1%83%20%D1%84%D0%B8%D0%B3%D1%83%D1%80%20%D0%A5%D0%B%D0%B0%D0%B4%D0%BD%D0%B8&src=go&sbmt=1616304667698&hasnavig=0&d=8247981457047795209&sig=b6c0215b12&s=youtube (дата обращения: 11.10.2021).

9. Вибростенд TV 51140 [Электронный ресурс] / URL: <https://zetlab.com/shop/sistemy-pod-kluch/vibrostandy-i-suv/vibrostebdu-maloy-moshnosti/tira-gmbh/vibratsionnye-i-udarnye-stendy-tv-51140/> (дата обращения: 11.01.2022)

10. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем : учеб. пособие / Л. Н. Александровская, В. И. Круглов, А. Г. Кузнецов и др. М. : Логос, 2003. 736 с.

11. Методы калибровки акселерометров [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/podderzhka/vibrometriya-i-akustika/poverka-i-kalibrovka-s-pomoshhyu-analizatorov-spektra/metodyi-kalibrovki-akselerometrov/> (дата обращения: 12.01.2022).

12. Система поверки вибродатчиков ZET 424 [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/shop/sistemy-pod-kluch/sistemyi-poverok-attestatsiy/sistema-poverki-kalibrovki-vibropreobrazovateley-akselerometrov/> (дата обращения: 11.02.2022).

УДК 621.923.01

**ОСОБЕННОСТИ ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ
АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ**

В. А. Левко, П. А. Иванов, О. В. Литовка

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: levko@sibsau.ru

Рассмотрены основные виды контроля технологического процесса обработки абразивным потоком. Особое внимание уделено особенностям операционного контроля обработки абразивным потоком. Описаны три группы факторов операционного контроля.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, технологический процесс, операционный контроль.

Введение

Современный уровень развития промышленного производства обусловил широкое применение деталей со сложной геометрической формой. Формообразование таких поверхностей осуществляется с применением различных технологий, в том числе аддитивных. К поверхностному слою таких деталей предъявляют высокие требования к качеству поверхностного слоя, но их финишная обработка традиционными способами затруднена. Поэтому в качестве такой финишной операции все большее применение находит такой нетрадиционный метод финишной обработки, как обработка абразивным потоком [1].

В основе данного технологического процесса лежит течение в обрабатываемой детали под большим давлением вязкоупругого материала, наполненного мелкодисперсными абразивными частицами. Поток абразивного материала (среды) принимает форму обрабатываемого канала и оказывает сжимающее давление на обрабатываемую поверхность, обеспечивая абразивный контакт [2].

К настоящему времени в мире проведен достаточно большой объем экспериментальных и теоретических исследований в области обработки абразивным потоком. Систематизация таких работ представлена в критическом обзоре прошедших зарубежных исследований и достижений в процессе чистовой обработки абразивным потоком [3]. Российские исследования различных аспектов данной технологии рассмотрены дополнительно [4].

1. Виды контроля

На различных этапах производственного процесса выделяют три основных вида контроля: входной, операционный и приёмочный. Входной контроль осуществляется перед началом обработки. Его целью является выявление возможных дефектов и брака в поставляемых материалах, заготовках и изделиях.

Целью приемочного контроля, выполняемого по окончании технологического процесса, является установление соответствия качества изделия требованиям, установленным в нормативно-технической документации.

Операционный контроль, проводится непосредственно при реализации технологического процесса обработки изделий с целью проверки качества выполнения операций, своевременного выявления и изъятия брака, устранения дефектов.

2. Операционный контроль обработки абразивным потоком

Особенностью операционного контроля технологического процесса обработки абразивным потоком является управление тремя группами факторов. Схема процесса показана на рисунке 1.

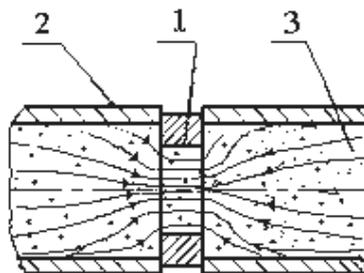


Схема процесса обработки абразивным потоком:
1 – обрабатываемая заготовка; 2 – рабочий цилиндр установки;
3 – рабочая среда

Первая группа факторов относится к контролю состояния рабочей среды. Перед процессом обработки проверяется следующая группа факторов: C – процентное содержание абразива в среде по весу; d_g и r_g – диаметр и радиус абразивного зерна (m); M – зернистость (дисперсность) абразивного зерна (m); V_a – объем абразива (m^3); ρ_a – плотность абразива (kg/m^3); ρ_c – плотность носителя (полимерной основы среды) (kg/m^3); ρ_m – плотность среды (в целом) (kg/m^3).

Далее производится расчет следующих показателей: σ_r – стандартное распределение радиусов абразивных зерен; η_a – кажущаяся вязкость рабочей или предел текучести материала (N/m^2).

По результатам контроля первой группы факторов производится выбор состава рабочей среды.

Ко второй группе факторов относится контроль режимов технологического процесса обработки абразивным потоком. К ним относятся следующие факторы: T – время обработки (s); N – количество циклов обработки (шт.); n – номер цикла обработки; P – давление сдвига (экструзии) (MPa); P_n – воздействие давления на абразивные зерна по нормали (MPa); r_c – радиус рабочих цилиндров установки (m); v_f – скорость течения среды в заготовке (m/s); v_p – скорость поршня или скорость потока среды на входе (в обрабатываемый канал) (m/s); V – общий объем удаленного материала (m^3); V_i – объем материала, удаленного на i -м цикле (m^3); TC – температура рабочей среды ($^{\circ}C$).

Третья группа факторов операционного контроля характеризует изменение состояния обрабатываемой заготовки. К ним относится изменение шероховатости обрабатываемой поверхности, изменение микротвердости поверхности. Особый контроль осуществляется за величиной снимаемого при обработке слоя материала – *material remove* (MR), а также равномерностью обработки по всей длине обрабатываемой заготовки.

Первая и третья группа факторов контролируются дискретно. Вторая группа факторов контролируется непрерывно в ходе технологического процесса обработки абразивным потоком. Непрерывный контроль над второй группой факторов позволяет осуществлять процесс управления технологического процесса обработки абразивным потоком.

Контроль первой группы факторов производится до начала процесса обработки абразивным потоком. Факторы третьей группы контролируются до и после процесса обработки.

Изменение численных значений таких факторов, как шероховатость, микротвердость и величина снятого слоя материала, характеризуют производительность обработки абразивным потоком.

Равномерность изменения шероховатости обработанной поверхности и удаления слоя материала являются показателями качества технологического процесса данного вида финишной обработки.

Заключение

К особенностям оперативного контроля технологического процесса обработки абразивным потоком относится непрерывность контроля таких факторов, как время и количество циклов обработки, давление и скорость рабочей среды, а также ее температура.

Учет особенностей операционного контроля позволяет обеспечить требуемое качество и производительность процесса обработки абразивным потоком.

Библиографические ссылки

1. Rhoades L. Abrasive flow machining [a case study]. *Journal of Materials Processing Technology*. 1991 Vol. 28, Issues 1–2, p. 107–116.
2. McCarty R. W. Method of honing by extruding. Patent US. No. 3521412. 1970.
3. Petare A. C., Jain N. K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. Issue 1-4. p. 741–782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>.
4. Review of previous Russian studies in the abrasive flow machining / V. A. Levko, O. V. Litovka, D. I. Savin, N. S. Terjaev // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering : III International Scientific Conference, Krasnoyarsk (29–30 april 2021). Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 12029. DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012029.

© Левко В. А., Иванов П. А., Литовка О. В., 2022

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА НАПЫЛЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Н. А. Амельченко, Е. В. Раменская, Н. Ф. Янковская

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: nikalam@mail.ru

Рассмотрена технология формирования плазменных покрытий компактированной струей напыляемых частиц. Показано, что взаимное термическое влияние осаждаемых расплавленных частиц приводит к аккумулярованию тепла в пятне напыления и повышает вероятность их взаимодействия в жидкой фазе, что способствует повышению надежности формируемых покрытий и их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: плазменное напыление, повышение надежности, адгезионная прочность, диэлектрическая прочность, оксидная керамика, эксплуатационные характеристики.

Развитие метода плазменного напыления, как технологического метода получения покрытий из порошковых материалов, в настоящее время находится на стадии, которая характеризуется наличием высокопроизводительного и достаточно надежного оборудования для получения низкотемпературной плазмы. Имеется определенный выбор вспомогательной оснастки и средств автоматизации для реализации требуемых параметров технологического процесса: дозирующие устройства с высокой стабильностью транспортирования напыляемых материалов, манипуляторы, в том числе и промышленные роботы. В промышленности в большом ассортименте имеется широкий выбор порошковых материалов для формирования покрытий разного функционального назначения [1].

Как известно, в машиностроении покрытия наносят для придания деталям либо новых эксплуатационных характеристик, либо для восстановления свойств поверхностных слоев и геометрических размеров деталей при последующей механической обработке. Наибольший положительный эффект и повышение эксплуатационных характеристик достигается при условии сохранения свойств наносимого материала или улучшения свойств материала основы, достижения адгезии покрытия на уровне материала подложки или прочности компактного материала покрытия [2].

Исследованиями установлено, что для многих покрытий на основе накопленных данных об условиях их получения и результатах использования определены области рационального применения и установлены значения свойств покрытий, соответствующие наилучшим режимам напыления. Выяснилось, что многие преимущества метода плазменного напыления в открытой атмосфере в значительной степени компенсируются снижением прочностных и эксплуатационных характеристик материалов: электрической и адгезионной прочности, плотности, износостойкости, микротвёрдости и других характеристик, в сравнении с компактными аналогами материалов покрытий. Причинами таких изменений является механизм формирования покрытий, при котором наблюдается наличие дефицита энергии в системе покрытие – подложка, способствующий образованию относительно высокой пористости (5...25 %), слоистости и структурной неоднородности.

На рис. 1 приведена схема формообразования покрытия при плазменном напылении.

Согласно представленной схеме (рис. 1), на основании исследований микроструктуры в покрытии можно наблюдать наличие нерасплавленных и окисленных частиц, а также закрытых газовых пор, которые существенно сказываются на снижении эксплуатационных характеристик и качестве покрытий.



Рис. 1. Схема формирования покрытий при напылении

Стремление к устранению указанного дефицита энергии и связанного с этим ухудшением свойств покрытий привело к появлению и разработке различных технологических приемов, связанных с применением экзотермических порошков, подогревом основы при напылении, оплавлением напылённых покрытий, использованием дополнительных конических насадок, компактированием струи напыляемых частиц, а также новых методов нанесения покрытий, например, детонационного, ионно-плазменного и др. [3].

Для повышения качества покрытий при напылении, как выяснилось, необходимо использовать термически активные частицы, которые следует осаждать на ещё неостывшие частицы предыдущего слоя, что повышает вероятность их взаимодействия в жидкой фазе. Результаты моделирования теплового состояния свидетельствуют о зависимости нестационарных температур в слое покрытия от ряда технологических условий напыления [4]. Одним из таких технологических условий является влияние удельной производительности напыления, которая связана с расходными параметрами процесса и конструктивными особенностями распылителя следующей зависимостью:

$$g = G \cdot \beta \cdot k.$$

Здесь g – удельная производительность при напылении, $\text{кг/с} \cdot \text{м}^2$; G – расход распыляемых материалов, кг/с ; β – коэффициент использования распыляемых материалов, %; k – коэффициент сосредоточенности, характеризующий плотность распределения напыляемых частиц на поверхности, м^{-2} .

Практика показывает, что во многих технических решениях применение стандартных схем ввода порошковых материалов на срез сопла-анода, не оказывает существенных изменений в схеме теплового влияния на механизм формирования напыляемых покрытий. Создание новых конструкций плазменных распылителей с введением распыляемых порошковых материалов в прикатодную область способствует повышению компактности струи.

На рис. 2 приведена схема устройства ввода плазмообразующего газа и газопорошковой смеси в зону горения электрической дуги, реализованная в техническом решении [5].

Анализ тепловых процессов, протекающих в пятне при нанесении покрытий сжатой струёй, показывает, что совокупное тепловое влияние осаждаемых расплавленных частиц друг на друга приводит к аккумулярованию тепла в слое, что создает условия для протекания в покрытии выгодных термодинамических процессов, приводящих

к структурным и фазовым превращениям, а также к изменениям в кристаллической решетке.

С целью подтверждения предлагаемых рассуждений нами были проведены параллельные эксперименты с применением промышленных установок УПУ-3Д, УПУ-8М, Киев-7 и разработанного плазмотрона ПКП-1 по указанному техническому решению [5]. В качестве основного напыляемого материала при проведении экспериментов использовали оксид алюминия ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) и небольшие добавки оксида магния.

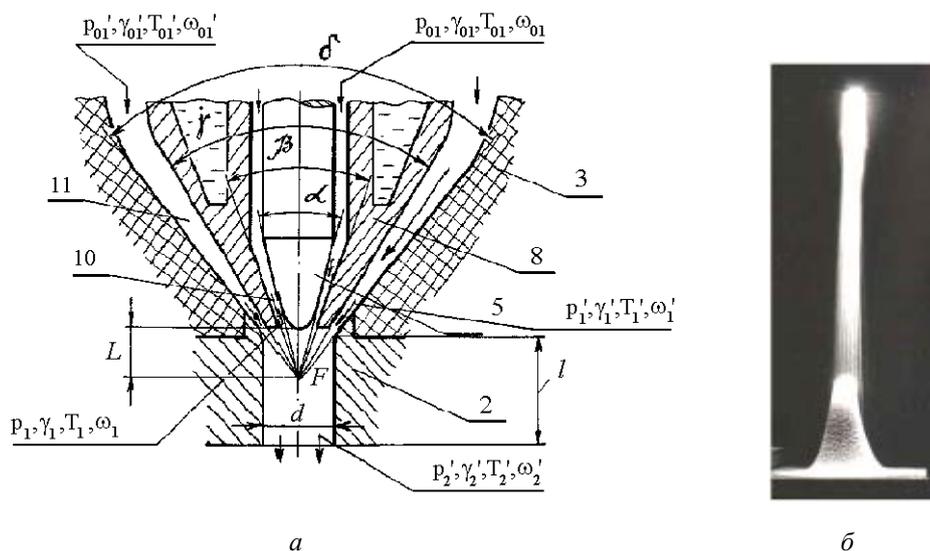


Рис. 2. Схема ввода порошковых материалов в плазмотрон:
 а – прикатодная область электрической дуги; б – компактная струя

Процесс напыления проводили при неподвижной подложке и в процессе её движения, при этом толщину формируемого покрытия регулировали за счет изменения скорости перемещения подложки.

Для оценки электрической прочности напылённых покрытий использовали пробивную установку УПУ-1М, которая позволяет проводить испытания на постоянном и переменном токе (50 Гц) при плавном изменении напряжения от 0 до 10 кВ. Число замеров на образцах одной толщины составляло от 8 до 10 пробоев. Методом гидростатического взвешивания проводили замеры плотности и пористости образцов и сколов покрытий в местах пробоя. Микротвердость напыленных материалов оценивали на шлифах с применением микротвердомера ПМТЗ.

На первом этапе было проведено сравнение рентгеновских дифрактограмм исходных порошков оксида алюминия ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) и порошков после напыления с применением промышленной установки УПУ-8М при подаче на срез сопла и плазмотрона ПКП-1.

На рис. 3 приведены дифрактограммы исходного материала и материала покрытий.

Как следует из рис. 3, в материале (1) наиболее интенсивными являются рефлексы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Это подтверждает, что исходным материалом является чистый электрокорунд.

В образце под номером (2) интенсивность рефлексов α -фазы преобладает, однако имеются также слабые рефлексы γ - и δ -фаз. Следовательно, можно утверждать, что при компактировании струи причиной фазовых переходов являются тепловые процессы в формирующемся покрытии даже при малой электрической мощности.

Результаты исследований порошков покрытия под номером (3) свидетельствуют, что здесь преобладают рефлексы, характерные для γ - и δ -фаз. Тем не менее, имеются слабые рефлексы α -фазы. Однако при этом затраты мощности в процессе напыления почти в три раза больше.

На рис. 4 показан характер зависимости $U_{пр}$ и $E_{пр}$ от толщины покрытия при воздействии постоянного тока.

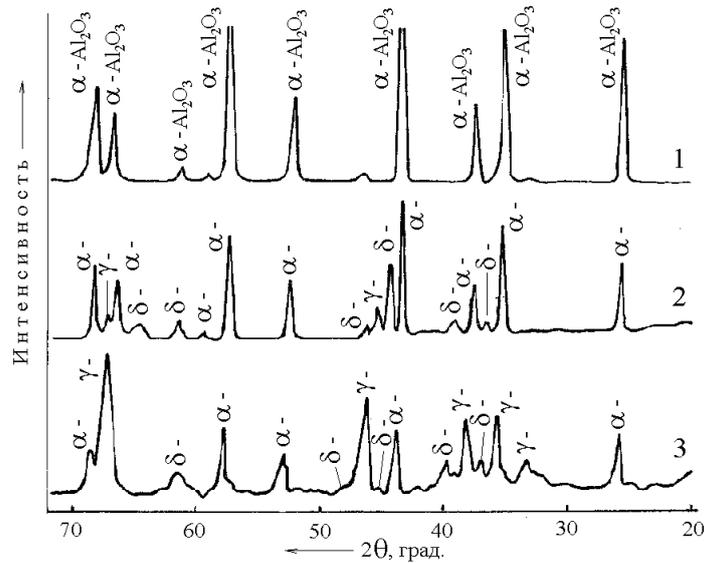


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы порошка Al_2O_3 в исходном состоянии и после напыления в покрытии:
1 – исходный материал; 2 – при напылении компактированной струей ($N = 15$ кВт, $G = 0,5$ кг/ч); 3 – при напылении с подачей на срез сопла ($N = 40$ кВт, $G = 1,5$ кг/ч)

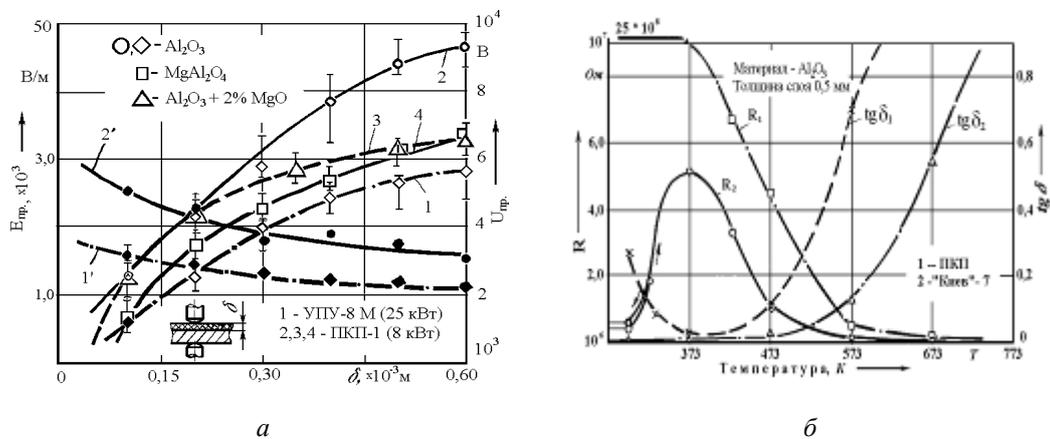


Рис. 4. Влияние толщины покрытия на электрическую прочность (а) и диэлектрическую проницаемость (б)

Анализ зависимости $U_{пр}(\delta)$ и $E_{пр}(\delta)$ показывает, что слои одной и той же толщины имеют различные значения $U_{пр}$ и $E_{пр}$. Так, для толщины $\delta = 0,4-0,6$ мм напряжение пробоя при напылении изоляционного слоя компактной струей составляет 7,2–9,3 кВ, что на 40–60 % превышает значения $U_{пр}$ покрытий, напыленных на промышленных установках.

В результате исследований выявлено, что для керамических покрытий из однородных материалов значения пробивного напряжения заметно снижаются при изменении величины приложенного напряжения. Возможно, это связано с повышением неоднородности структуры слоя, с возрастанием количества слабых мест, образованных порами и газовыми включениями. Кроме этого, как показывает анализ, на электрическую прочность существенно влияет плотность и пористость формируемых покрытий.

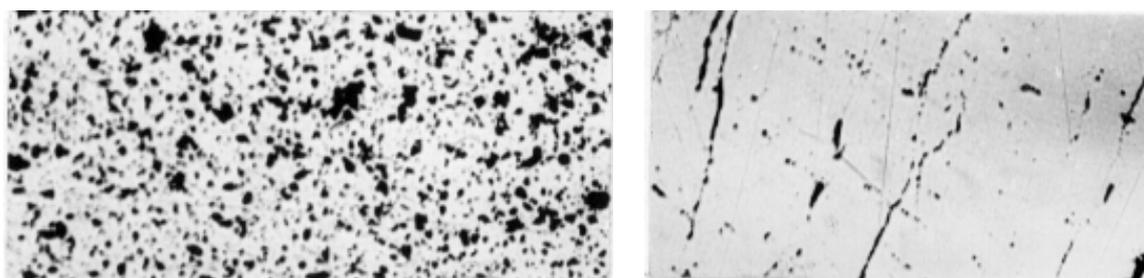
В таблице приведены результаты замеров плотности, пористости и микротвердости покрытий, напыленных с подачей материала на срез сопла и за счет компактирования струи напыляемых частиц.

Свойства оксидных покрытий, напыленных некомпактной (а) и компактной струей (б)

Температура подложки, $T_{\text{п}}$, °С	Плотность, $\times 10^3$ кг/м ³		Пористость, %		Микротвердость $H_{\text{ц}}$, МПа	
	а	б	а	б	а	б
20	2,57	3,1	25,4	10,6	1380	1220
100	2,66	3,18	22,3	1,1	1452	1300
200	2,72	3,25	16,7	6,5	1466	1409
400	2,85	3,7	11,0	4,3	1509	1759
500	3,02	3,81	9,1	4,0	1660	1871
600	3,05	3,82	8,8	3,8	1689	2018
700	3,06	3,8	8,9	3,9	1689	2108
800	3,08	3,84	8,3	3,8	1670	2087

Данные таблицы свидетельствуют, что указанные свойства покрытий существенно зависят от температуры подложки.

Исследования микроструктуры и фазового состава показывают, что в нижних слоях, на границе контакта покрытия с основой, отмечено образование пористой структуры (рис. 5, а) и наблюдается снижение плотности напыленного материала.



а

б

Рис. 5. Изменение микроструктуры напыленных слоев керамики:
а – на границе контакта с основой; б – верхние слои покрытия

Очевидно, высокие скорости кристаллизации частиц и недостаток тепла в зоне контакта с подложкой затормаживают объединение кислородных и алюминиевых ионов в устойчивую α -фазу. Согласно положениям [6], расположение ионов Al^{3+} в тетраэдрическом и октаэдрическом окружении из ионов кислорода определяет структуру Al_2O_3 в метастабильной γ -фазе, которая, как известно, обладает более низкими значениями плотности, прочностными и эксплуатационными характеристиками.

По мере роста толщины слоя, за счет изменения теплопроводности напыленного материала, действительно происходит аккумуляция тепла в объеме покрытия, что замедляет скорость движения фронта кристаллизации частиц. По этой причине ионы Al^{3+} , вследствие их большей подвижности, способны перебазироваться в октаэдрические положения, снижая при этом общую энергию системы. После таких изменений в кристаллической решетке результирующей структурой в покрытии является гексагональная α -модификация Al_2O_3 . В результате верхние слои формируются более плотными, имеют малую пористость (рис. 5, б), что обуславливает прочность структуры и высокие эксплуатационные характеристики напыленного материала. Однако здесь же, в верхних слоях, обнаружены усадочные трещины, причиной образования которых

могут быть не только остаточные внутренние напряжения из-за больших температурных градиентов в поперечном направлении, но и фазовые переходы $\gamma \rightarrow \alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$.

Таким образом, на основе анализа результатов исследований можно заключить:

– повышение компактности струи напыляемых частиц способствует изменению качества и прочностных характеристик покрытий, с достаточным уровнем адгезионных показателей;

– при напылении покрытий сжатой струей за счет регулирования удельной производительности можно получать слои с плотностью, близкой к плотности спеченной керамики.

Библиографические ссылки

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко и др. Киев : Наукова думка, 1987. 544 с.
2. Кудинов В. В., Бобров Г. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М. : Metallurgia, 1992. 432 с.
3. Калита В. И., Комлев Д. И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой : монография. М., 2008. 388 с.
4. Рогожин В. М., Ванько В. И., Амельченко Н. А. Расчет нестационарных температур в пятне напыления // Известия вузов. Машиностроение, 1987. № 9. С. 107–111.
5. Электродуговой плазматрон для нанесения покрытий / Н. А. Амельченко, В. Н. Саунин и др. Авторское свидетельство № 1616499. SU. МКИ H05B. Опубл. 1990. Бюлл. № 47.
6. Кингери У. Д. Введение в керамику. М. : Стройиздат, 1967. 500 с.

© Амельченко Н. А., Раменская Е. В., Янковская Н. Ф., 2022

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА И СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА КАМЕРЫ-ДЕМОНСТРАТОРА, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

К. Е. Мумбер, Е. Е. Жигурова, Р. А. Казаков, Н. С. Шестов, П. А. Бривкальн
Научный руководитель – В. П. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: 2k5r1i9s9t9y@gmail.com

Представлены результаты анализа структуры материала применяемого в изготовлении образцов камеры-демонстратора методом селективного лазерного сплавления.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, металлографический анализ, силумин.

В ракетном двигателестроении, как одном из наиболее трудоемких и высокорасходных направлений российского машиностроения, ведётся интенсивная работа по освоению аддитивных технологий. В первую очередь по изготовлению деталей сложной геометрической формы, таких как камера сгорания ЖРД, а также узлов со специализированным взаиморасположением элементов. Применение технологий 3D-печати позволяет на порядок сократить количество операций в производственном цикле и уменьшить материалоемкость изделий [1; 2].

С целью изучения теоретических основ и режимов аддитивных технологий и методологии селективного лазерного сплавления на предприятиях ракетного двигателестроения проводится большой цикл научно-исследовательских и экспериментальных работ. В статье представлены результаты исследований камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленной из модельного материала методом 3D-печати.

Исследование качества и структуры материала камеры-демонстратора, изготовленной из сплава «Силумин» РС-300 ТУ24.42.00-002 проводилось согласно плану научно-исследовательских и учебно-лабораторных работ по изготовлению методом аддитивных технологий и исследованию характеристик комплекта моделей камер-демонстраторов ЖРД малой тяги на образцах без термообработки и после термообработки (низкотемпературного отжига в течение 4 часов) [3].

Экспериментальные образцы были получены из силуминового порошка марки РС-300 методом селективного лазерного сплавления при режимах работы, подобранных для печати модельной камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги. Образцы имели стандартную прямоугольную форму размером 20×30 мм, толщиной 3 мм.

Металлографический анализ проводился по ГОСТ 1778–70 «СТАЛЬ. Металлографические методы определения неметаллических включений», ГОСТ 25086–2011 «ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И ИХ СПЛАВЫ. Общие требования к методам анализа» [4]. Исследование проводилось просмотром изготовленных микрошлифов после химического травления в реактиве (HCl – 3мл, HNO₃ – 3мл, H₂O – 90 мл) на микроскопе Nikon ECLIPSE MA200 при увеличении от 100 до 1000 крат.

Предварительно было проведено исследование микроструктуры образцов до их травления в реактиве, в результате которого на поверхности образцов были обнаружены окисные пленки и микропористость. (рис. 1)

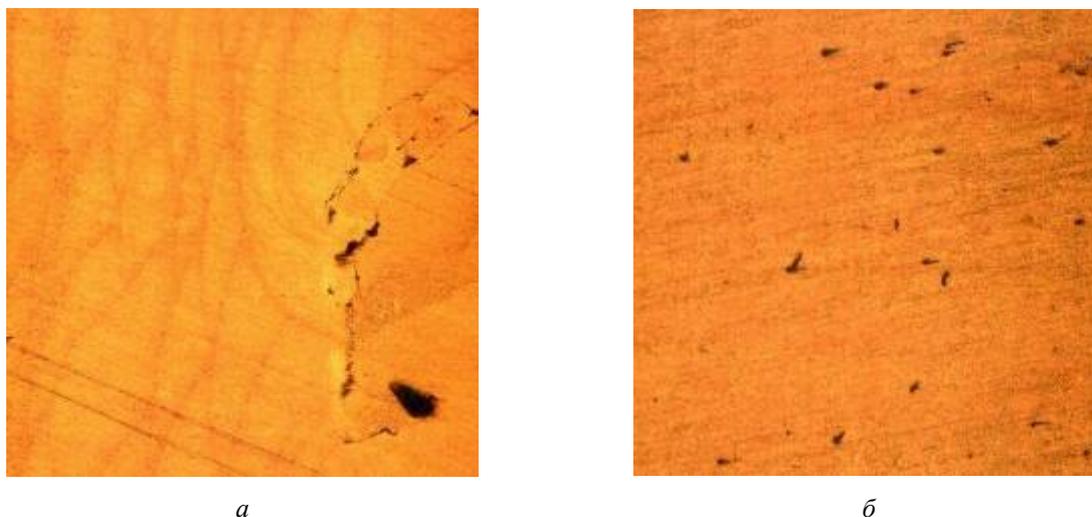


Рис. 1. Фото структуры образцов до химического травления:
а – без термообработки; *б* – образец с термообработкой.

На рис. 2, 3 представлена микроструктура образцов после химического травления. Микроструктура обоих образцов представляет собой мелкозернистую эвтектику $\alpha+Si$, характерную для литейных модифицированных эвтектических сплавов систем Al-Si (рис. 2, 3).

Строение микроструктуры материала обусловлено способом изготовления образцов методом аддитивных технологий.

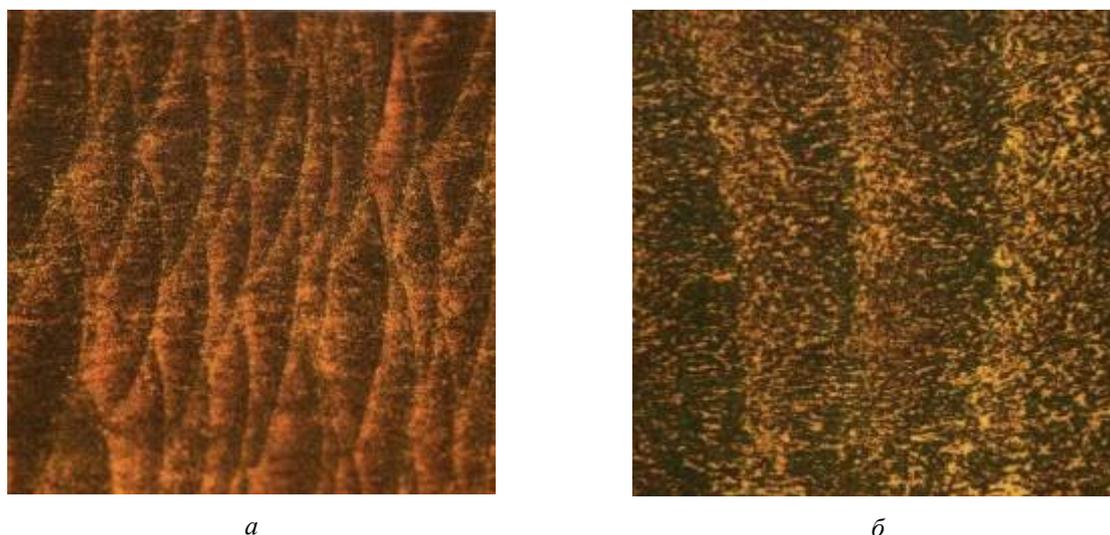


Рис. 2. Микроструктура образца без термообработки:
а – увеличение $\times 200$; *б* – увеличение $\times 1000$

Микроструктура образца после проведения термообработки стала более однородной, без выраженного формирования зёрен в направлении кристаллизации объекта. В материале образца без термообработки наблюдаются дефекты в виде окисных пленок протяженностью 0,06–0,35 мм (рис. 1, *а*). В материале образца с проведенной термооб-

работкой выявлены участки с микропористостью до $\varnothing 0,004$ мм (рис. 1, б), также наблюдается неравномерность (пористость) материала обусловленная способом изготовления.

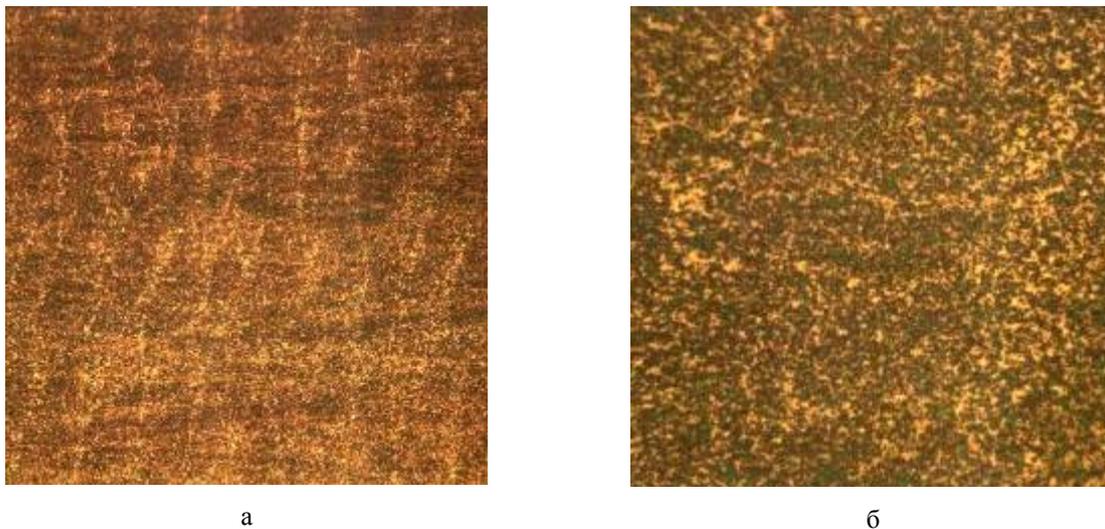


Рис. 3. Микроструктура образца после термообработки:
а – увеличение $\times 200$; б – увеличение $\times 1000$

В результате проведенных исследований установлено, что режимы 3D-печати и последующей термообработки оказывают значительное влияние на структуру материала изделий и требуют дополнительной обработки, уточнения и проведения металлографического анализа на образцах.

Библиографические ссылки

1. Аддитивные технологии – что это такое и где применяются [Электронный ресурс] / Сколково. URL: https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2019/09/18/additivnye-tehnologii-1320_-chto-eto-takoe-i-gde-primenyayutsya.aspx – свободный. (дата обращения: 28.06.2021).
2. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров. М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
3. Литвинцев А. И. Перспективы применения алюминиевых порошковых сплавов для изготовления деталей по аддитивной технологии // Технология легких сплавов. 2015. № 4. С. 25–30.
4. ГОСТ 1778–70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. М. : Стандартинформ, 2011. 31 с.

© Мумбер К. Е., Жигурова Е. Е., Казаков Р. А.,
Шестов Н. С., Бривкальн П. А., 2022

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 40Х ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННОГО ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

А. В. Гирн, С. В. Марченко, М. С. Руденко, А. Е. Михеев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com

В статье представлены результаты исследования глубины, твердости и микротвердости поверхностного слоя стали 40Х обработанного плазменной струей. Определена зависимость твердости, микротвердости и глубины упрочненного слоя от режимов плазменной обработки.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, плазматрон, микротвердость, поверхностное азотирование.

Увеличение срока эксплуатации деталей, работающих в условиях постоянной нагрузки, является актуальной задачей. Изделия чаще всего выходят из строя за счёт износа рабочей поверхности, поэтому повышение ее твердости увеличивает износостойкость, надежность и срок эксплуатации деталей машин и механизмов, а также режущего инструмента.

Одним из видов повышения твердости поверхности стальных изделий является поверхностная закалка, которая заключается в высокоскоростном нагреве рабочей поверхности концентрированным источником энергии (КИЭ) и ее последующем быстром охлаждении за счет теплоотвода внутрь материала детали. В качестве КИЭ может использоваться лазерный или электронный луч, плазменная струя или сжатая электрическая дуга [1]. Плазменная струя обладая высокой плотностью мощности (до 10^6 Вт/см²) позволяет вести обработку с высокой производительностью и минимальными экономическими затратами по сравнению с электронно-лучевыми и лазерными методами обработки, поэтому актуальной является задача отработки технологии плазменного упрочнения стальных изделий. Кроме того, в процессе плазменной обработки можно достаточно легко организовать подачу активных газов в зону обработки, с целью проведения химико-термической поверхностной обработки (цементация, азотирование) которая может обеспечить повышение микротвердости обрабатываемого изделия.

В предыдущей работе [2] нами были проведены исследование влияния режимов плазменной обработки на глубину и твердость поверхности стали 40Х (исходная твердость 15,8 HRC). Выявлено, что оптимальными режимами плазменной обработки стали 40Х является сила тока 400 А и скорость перемещения плазматрона 15 м/с. Твердость поверхностного слоя при этом может достигать 60 HRC, что в 4 раза выше твердости этой стали в состоянии поставки.

Для увеличения микротвердости поверхности в настоящей работе предлагается использовать комбинация двух способов – плазменное поверхностное упрочнения и азотирование. Азотирование – это технологический процесс химико-термической обработки (ХТО), заключающийся в насыщении поверхностного слоя деталей азотом в специальной азотирующей среде для поверхностно упрочнения, повышения твердости, контактной выносливости, теплостойкости и коррозионной стойкости. [3]. Целью работы является выявление оптимальных режимов ХТО и сравнение результатов термиче-

ской и химико-термической обработки. В качестве параметра сравнения была выбрана микротвердость поверхностного слоя.

Обработку проводили с помощью плазменного комплекса «Плакарт», в качестве генератора плазмы использовался плазматрон F4. Методика обработки плазменной струей представлена в работе [2]. Расстояние между поверхностью стали и срезом сопла плазматрона при каждом проходе составляло 15 мм. В качестве рабочего и защитного газа использовался аргон с постоянным расходом $P_{Ar} = 30$ л/мин, для химико-термического упрочнения использовался активный газ – азот, с расходом $P_N = 2; 4; 6$ л/мин. Для выявления оптимальных режимов обработки и режимов при которых начинается оплавление поверхности проводили серию экспериментов в ходе которых менялся объёмный расход азота. Сила тока I плазменной струи составляла 400 А при этом напряжение составляло 150 В. Скорость перемещения плазматрона V 0,15 м/с.

Микротвердость упрочненных слоев измерялась на микротвердомере ПМТ-3М, методом вдавливания в испытуемый материал алмазных наконечников и рассчитывалась как среднеарифметическое из 10 измерений. Глубина упрочненного слоя измерялась на оптическом микроскопе Neophot 32, оснащенный цифровой камерой с использованием специального программного обеспечения для металлографического анализа SIAMS 700. Для проведения металлографических исследований из пластины вырезали образцы и изготавливали поперечные шлифы.

Результаты влияния скорости обработки без азотирования на твердость, микротвёрдость и глубину упрочненного слоя представлены в табл. 1 и на рис. 1 ($P_{Ar} = 30$ л/мин, $P_N = 3$ л/мин).

Таблица 1

Влияние скорости обработки

№	I, А	V, м/с	HRC	Микротвердость, ГПа	Глубина упрочнения, мкм
1	400	0,12	54,9	9,2	306,5
2		0,18	46,2	4,6	235,6
3		0,24	43,2	7,8	146,2

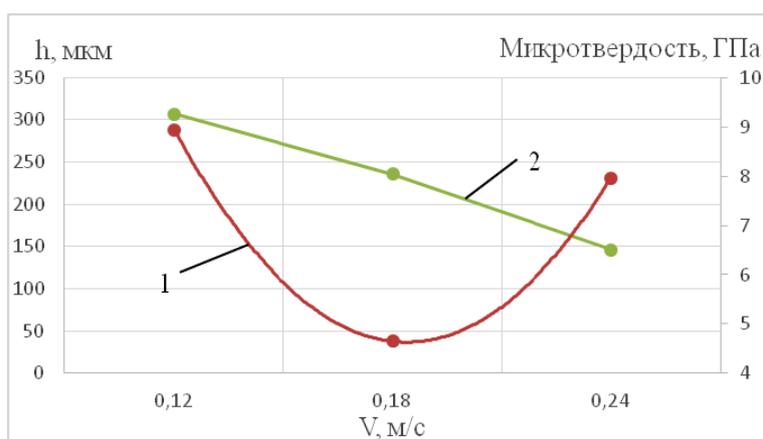


Рис. 1. Зависимость микротвердости (1) и толщины упрочненного слоя (2) от скорости перемещения плазменной струи

Результаты влияния тока плазменной струи при обработке без азотирования на твердость и глубину упрочненного слоя представлены в табл. 2 и рис. 2 ($P_{Ar} = 30$ л/мин, $P_N = 3$ л/мин).

Влияние силы тока

№	I, А	V, м/с	HRC	Микротвердость, ГПа	Глубина упрочнения, мкм
1	350	0,15	43,4	6,1	181,11
2	400		58,4	6,5	286,76
3	450		53,5	5,8	359,91

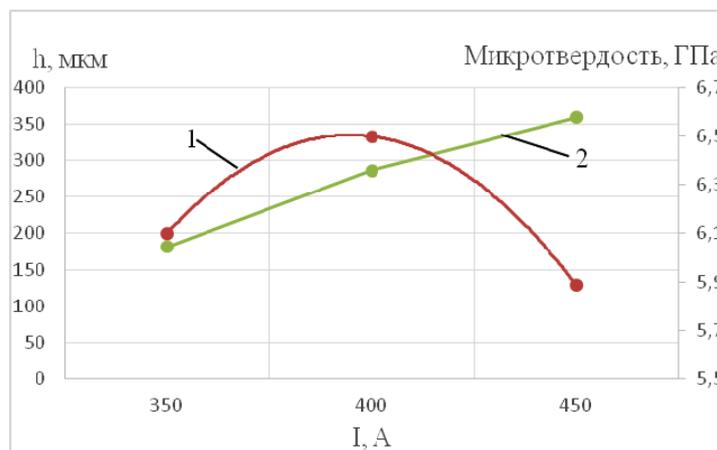


Рис. 2. Зависимость микротвердости (1) и толщины упрочненного слоя (2) от тока плазменной струи

Таким образом, после определения оптимальных режимов обработки в работе были проведены экспериментальные исследования по обработке поверхности с использованием азота в качестве активного газа, подаваемого в обрабатываемую область с расходом 2, 4 и 6 л/мин.

В результате на пластине получили серию «дорожек» соответствующих различным режимам плазменной обработки в азотной срезе. Фрагмент пластины представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид упрочнённой поверхности при добавлении азота
1 – $P_N = 2$ л/мин; 2 – $P_N = 4$ л/мин ; 3 – $P_N = 6$ л/мин

Результаты влияния азотирования на микротвердость упрочненной поверхности представлены в табл. 3 и на рис. 4. Структура упрочненного слоя представлены на рис. 5.

Влияние азотирования

№	I, А	V, м/с	P_N , л/мин	Микротвердость, ГПа	Глубина упрочнения, мкм
1	400	0,15	2	3,6	88,6
2			4	6,7	200,4
3			6	18,9	275,1

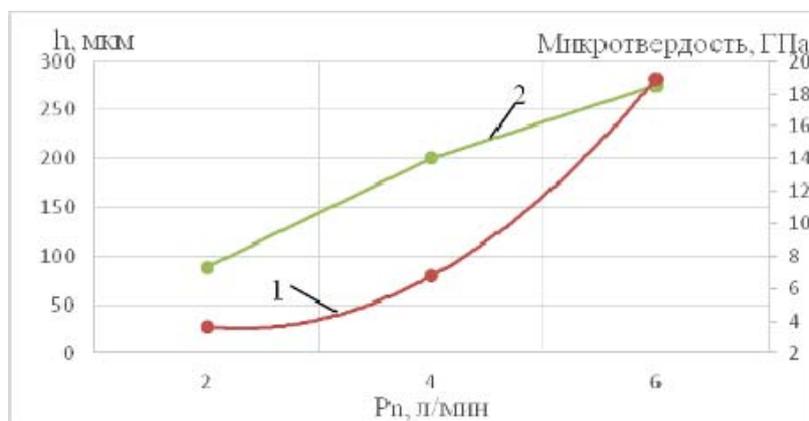
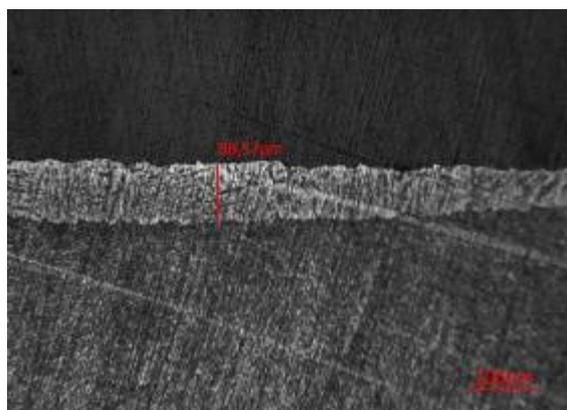
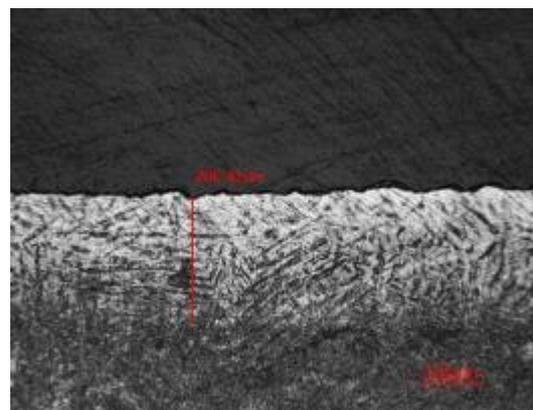


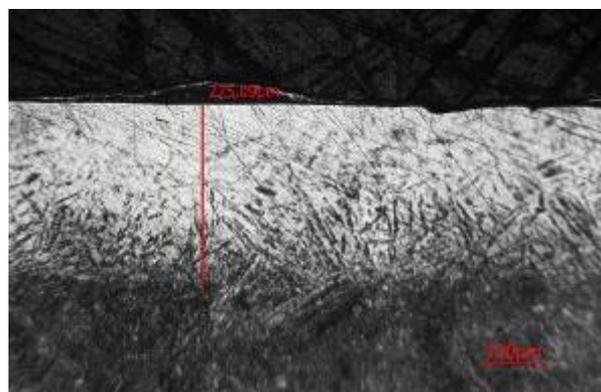
Рис. 4. Зависимость микротвердости (1) и толщины упрочненного слоя (2) от расхода азота



а



б



в

Рис. 5. Микрофотография образцов с упрочненным слоем ($\times 25$)
 а – $P_N = 2$ л/мин; б – $P_N = 4$ л/мин; в – $P_N = 6$ л/мин

Таким образом, выявлено, что при введении азота в область плазменной поверхностной обработки микротвердость упроченного слоя значительно увеличивается (более чем в три раза по сравнению с плазменной поверхностной обработкой), а глубина упроченного слоя сопоставима с глубиной при обработке без добавления азота и составляет около 200 мкм.

Библиографические ссылки

1. Михеев А. Е., Гирн А. В. Упрочнение металлических поверхностей воздействием концентрированных источников энергии : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 124 с.

2. Поверхностное упрочение стали 40х методом плазменной закалки Об / А. В. Гирн, С. В. Марченко, М. С. Руденко и др. // Машиностроение: новые концепции и технологии. 2020. С. 26–31.

3. Криони Н. К., Мордвинова А. Ю. Островковое азотирование как способ повышения износостойкости поверхности деталей // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 1 (83). С. 34–39.

© Гирн А. В., Марченко С. В., Руденко М. С., Михеев А. Е., 2022

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЛЮСОВ ДЛЯ ПАЙКИ ЭЛЕКТРОНИКИ

Т. Г. Орешенко, Р. В. Афанасьев, Г. М. Гринберг

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

E-mail: veisver@mail.ru, roman2000734@gmail.com, grinberg_gm@mail.ru

Среди всего многообразия соединения электронных компонентов при монтаже изделий электроники особое место занимает пайка, качество которой зависит от качества используемых материалов, в частности флюса. из-за дефектов паяных соединений могут происходить отказы электронных приборов.

В статье приведены требования к флюсам и дано обоснование необходимости проведения исследований свойств флюса, позволяющих потребителю убедиться в его качестве. Авторами выполнено исследование семи марок флюсов и представлены полученные результаты.

Ключевые слова: изделие электроники, флюс, пайка, лужение, припой, смачиваемость, смываемость, электропроводность.

Развитие электронизации и информатизации общества идет в направлении роста функциональной сложности, обеспечения высокого качества и требований надежности применяемых электронных устройств. Элементной базой для производства таких устройств являются современные электронные и электротехнические компоненты, сборка которых в настоящее время производится в основном по технологии печатного монтажа.

Сущность печатного монтажа заключается в формировании на изоляционном основании тонких медных проводников, выполняющих функции монтажных проводов к которым припаиваются элементы электронной схемы – полупроводниковые элементы, микросхемы, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, контактные детали и др.

Технология изготовления электронных изделий методом печатного монтажа включает в себя ряд технологических операций, особое значение среди которых имеет пайка. Так как качество пайки, в конечном счете, сильно влияет на работоспособность электронных изделий, то обеспечение высокого качества (отсутствие дефектов) паяного соединения имеет большое значение при их монтаже.

Статистические данные показывают, что 50–80 % всех отказов изделий электроники происходит вследствие дефектов паяных соединений, причем стоимость обнаружения и исправления отказа на этапе сборки электронных модулей обходится в 100 раз дешевле, чем при испытаниях аппаратуры, в которые эти модули были установлены [1].

Дефекты пайки согласно [2] могут проявляться в следующих видах – поверхностное окисление, поверхностная пора, подрез, непропай, неспай, общая и локальная эрозии.

Качество пайки зависит от таких факторов, как типы соединяемых металлов, вида соединения, температуры нагрева, используемых материалов – припоя и флюса.

Флюс является одним из основных материалов, обеспечивающих надежное и устойчивое протекание процесса пайки (особенно в низкотемпературных условиях). Им покрывают поверхности соединяемых деталей и припоя. Флюс удаляет окисные пленки, обеспечивает защиту металла от окисления поверхности соединяемых деталей и припоя, уменьшает поверхностное натяжение расплавленного припоя, повышает смачиваемость поверхностей и способствует лучшему затеканию припоя в зазоры между

детальями. Кроме того, флюс способствует эффективной передаче тепловой энергии при пайке для быстрого и равномерного прогрева выводов электронных компонентов.

Требования к флюсам для пайки электронных компонентов. Критерии выбора флюса.

Сегодня на рынке предлагается огромный выбор флюсов для пайки. Для успешного проведения процесса пайки и получения соединения высокого качества флюсы должны удовлетворять определенным требованиям.

Исходя из условий, необходимых для нормального протекания процесса пайки, флюс должен удовлетворять следующим общим требованиям:

- быть жидким при температуре пайки, обладать минимальной вязкостью и высокой текучестью, хорошо смачивать припой и паяемый металл, легко растекаться по поверхности основного металла и припоя с образованием сплошной пленки;
- сохранять свойства на протяжении всего процесса пайки и не изменять состав при нагреве в интервале рабочих температур;
- не образовывать химически стойких соединений с основным металлом и припоем и поглощаться ими, в противном случае снижается механическая прочность и коррозионная стойкость соединения [3].

Кроме общих требований для пайки электронных компонентов флюсы должны удовлетворять следующим специальным требованиям.

- иметь температуру плавления меньшую, чем у припоя;
- не вступать в химическую реакцию с материалом припоя;
- обладать высокой текучестью и хорошо смачивать поверхности соединяемых элементов;
- иметь низкий показатель удельной массы;
- растворять жировые и оксидные пленки;
- эффективно смываться с обработанной поверхности;
- не допускать коррозионной активности;
- отличаться легкостью и удобством нанесения;
- иметь доступную цену [4].

К этому перечню еще следует добавить отсутствие электропроводимости.

Жесткость требования к качеству пайки электронных и электрических сборок определяется в соответствии с их назначением в используемой аппаратуре. Согласно ГОСТ Р МЭК 61191-1–2017 установлены три основных класса, отражающие уровень работоспособности, требования к эксплуатационным характеристикам и периодичности проверок (контроля/ испытаний) аппаратуры.

Класс А: электронные изделия общего применения

Включает в себя товары широкого потребления, персональные компьютеры и периферийные устройства, электронные модули и блоки, пригодные для применения в областях, в которых главным требованием является функционирование готового изделия.

Класс В: специализированная электронная аппаратура.

Включает в себя коммуникационную аппаратуру, сложные вычислительные средства и электронную аппаратуру, для которых требуются высокое качество и длительный срок службы и для которых желательна, но не обязательна, бесперебойная эксплуатация. Типовые условия эксплуатации у конечного заказчика, как правило, не приводят к отказам.

Класс С: электронная аппаратура ответственного назначения.

Включает в себя все виды аппаратуры, для которых требования к надежности функционирования являются обязательными. Отказ аппаратуры недопустим, условия эксплуатации, заданные потребителем, могут быть исключительно жесткими, аппаратура должна функционировать в любое время включения. К таким, например, относятся системы жизнеобеспечения или другие ответственные системы [5].

Проведение предприятием-потребителем исследования используемых флюсов

Хотя предприятия-изготовители флюсов декларирует характеристики своей продукции и проводят выходной контроль этих характеристик, зачастую предприятию-потребителю этого недостаточно для окончательного решения о соответствии флюса решаемым задачам. Например, при изготовлении электронной аппаратуре классов В и С необходимо особое внимание обращать на все параметры флюсов, которые могут повлиять на надежность и долговечность изготавливаемых изделий. В некоторых может возникнуть потребность в получении к характеристикам, указанным в паспорте или другой документации, добавочных значений.

Поэтому предприятию-потребителю целесообразно проводить своими силами дополнительные исследования (производственное опробование) пригодности используемого флюса – своеобразный входной контроль.

Под входным контролем следует понимать контроль качества продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику и предназначенной для использования при изготовлении, ремонте или эксплуатации продукции [6].

Основными задачами входного контроля могут быть:

- получение с большой достоверностью оценки качества продукции, предъявляемой на контроль;
- обеспечение однозначности взаимного признания результатов оценки качества продукции поставщиком и потребителем, осуществляемой по одним и тем же методикам и по одним и тем же планам контроля;
- установление соответствия качества продукции установленным требованиям с целью своевременного предъявления претензий поставщикам, а также для оперативной работы с поставщиками по обеспечению требуемого уровня качества продукции;
- предотвращение запуска в производство или ремонт продукции, не соответствующей установленным требованиям.

Кроме того, входной контроль может предотвратить использование контрафактной продукции, являющейся подделкой подлинного товара. Контрафактный товар производится неизвестными изготовителями, вследствие чего не соответствует требованиям качества, которые предъявляют к оригинальной продукции. Продукция не соответствует требуемым техническим характеристикам. Использование подобных товаров может привести к выпуску некачественной техники.

Решение о необходимости введения входного контроля флюса и о перечне контролируемых параметров принимает предприятие-потребитель на основании особенности, характера и назначения выпускаемой им продукции.

Целью данной работы является исследование свойств и сравнительная оценка семи флюсов следующих марок: PJLSWNC-559-ASM, FluxPlusNC 21000, AmtechRMA-223, RusFluxER-700-Pro, AmtechNC-559-ASM-UV, MechanicMCN-UV10, CyberFluxRMA-223 Pro.

Оценка свойств флюсов проходила по следующим характеристикам: эффективность флюса, электропроводность, смываемость, качество лужения медного провода, качество пайки медного провода к медной пластине, качество пайки SMD-компонентов.

Первое исследование было направлено на оценку эффективности флюсов.

Конечным условием надежной пайки является смачивание поверхности соединяемых металлов припоем. Следовательно, главным требованием к флюсу является обеспечение хорошей смачиваемости поверхности паяного шва расплавленным припоем за счет уменьшения поверхностного натяжения припоя и улучшения его растекания по всем зазорам паяного шва [7].

В эксперименте оценка эффективности флюсов производится по степени растекания определенного количества припоя при контролируемых условиях плавления. Для

этого на подготовленную медную пластину были нанесены капли испытуемых флюсов, к которым были добавлены кусочки припоя (рис. 1).

Затем пластина была помещена на 60 сек на нагретую до температуры 310 °С плиту, осторожно снята и помещена на подставку для остывания. Полученные результаты представлены на рис. 2.



Рис. 1. Подготовленная к испытаниям медная пластина



Рис. 2. Тест на смачиваемость медной пластины припоем

Площадь распространения припоя по поверхности пластины оценивалась визуально. По итогам проведенного тестирования можно сделать следующие выводы:

- флюс AmtechRMA-223 показал неудовлетворительный результат, припой практически не смочил поверхность пластины;
- флюс FluxPlusNC 21000 справился удовлетворительно – припой прилип к пластине, но не растёкся, образовав небольшую каплю;
- флюсы RusFluxER-700-Pro и Mechanic показали хороший результат – припой надежно припаялся к пластине;
- наиболее хорошее смачивание пластины припоем, обеспечили флюсы AmtechNC-559-ASM-UV, PJLSWNC-559-ASM и CyberFluxRMA-223 Pro.

В дополнение к сказанному можно отметить, что флюсы AmtechNC-559-ASM-UV, PJLSWNC-559-ASM и FluxPlusNC 21000 достаточно сильно дымят.

Для оценки качества лужения был использован медный провод, площадь сечения которого составляет 1 мм². Все образцы флюсов, кроме AmtechRMA-223, справились с этой задачей хорошо, качество лужения флюсом AmtechRMA-223 – удовлетворительное.

Следующим испытанием была оценка качества пайки медного провода к медной пластине. Полученные результаты представлены на рис. 3.



Рис. 3. Результаты пайки медного провода к медной пластине

Лучше всего припаялись провода с применением флюсов AmtechNC-559-ASM-UV, PJLSWNC-559-ASM и CyberFluxRMA-223 Pro. Очень хороший результат показали флюсы FluxPlusNC 21000, RusFluxER-700-Pro и Mechanic. С применением флюса AmtechRMA-223 припаять провод к плате не получилось – припой просто не смог смочить поверхности, что заставляет задуматься о его качестве и оригинальности.

Оценка качества пайки SMD-компонентов проводилась на примере пайки SMD-резисторов к печатной плате. Полученные результаты представлены на рисунке 4:

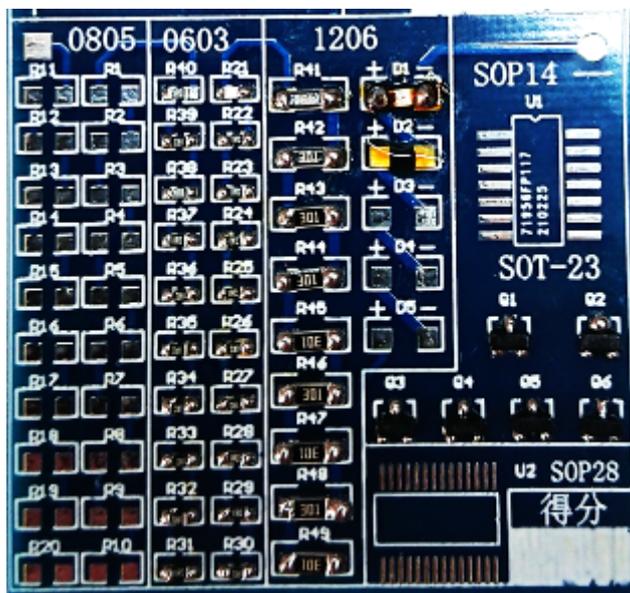


Рис. 4. Результаты пайки SMD-резисторов к печатной плате

Для большей достоверности каждый флюс был использован для пайки трёх резисторов:

- с использованием флюса FluxPlusNC 21000 были припаяны резисторы R28-R30;
- с использованием флюса AmtechRMA-223 были припаяны резисторы R38-R40;
- с использованием флюса CyberFluxRMA-223 Pro были припаяны резисторы R35-R37;
- с использованием флюса RusFluxER-700-Pro были припаяны резисторы R32-R34;
- с использованием флюса PJLSWNC-559-ASM были припаяны резисторы R41-R43;
- с использованием флюса AmtechNC-559-ASM-UV были припаяны резисторы R44-R46;
- с использованием флюса Mechanic были припаяны резисторы R47-R49.

По результатам этого теста можно сделать следующие выводы: хорошее качество пайки продемонстрировали все образцы флюсов за исключением AmtechRMA-223. И хотя припаять резисторы с его помощью удалось, качество пайки оставляет желать лучшего.

Для оценки смываемости флюсов была использована смывающая жидкость – ацетон. Все образцы флюсов, за исключением FluxPlusNC 21000 и AmtechNC-559-ASM-UV, хорошо смываются ацетоном. Флюсы NC 21000 и NC-559-ASM-UV очищаются немного хуже остальных.

Электропроводность флюсов оценивалась по удельному сопротивлению полоски флюса длиной 10 мм, нанесенной на диэлектрическое основание. Сопротивление образцов измерялось при помощи мегаомметра в 4 точках (на расстоянии между измерительными щупами 10; 5; 20,5 и 1,5 мм). Испытательное напряжение на выходе мегаом-

метра было взято равное 100 В, что позволило дополнительно провести испытание на пробой.

Все образцы флюсов обладают достаточно большим и стабильным сопротивлением, кроме флюса AmtechNC-559-ASM-UV, у которого наблюдалось уменьшение сопротивления, причём эффект был до и во время нагрева флюса, а после остывания эффект исчезал.

Полученные в процессе проведенных исследований результаты представлены в таблице.

Результаты исследования флюсов

	PJLSWN C-559- ASM	Flux- PlusNC 21000	Amtech RMA-223	RusFluxE R-700- Pro	Am- techNC- 559-ASM- UV	Mechanic MCN- UV10	Cyber- FluxRM A-223 Pro
Смачиваемость	Отличная	Удовлетворительная	Неудовлетворительная	Хорошая	Отличная	Хорошая	Отличная
Смываемость	Хорошая	Удовлетворительная	Хорошая	Хорошая	Удовлетворительная	Хорошая	Хорошая
Электропроводность	Не проводит	Не проводит	Не проводит	Не проводит	*Не постоянная	Не проводит	Не проводит
Качество лужения медного провода	Хорошее	Хорошее	Неудовлетворительное	Хорошее	Хорошее	Хорошее	Хорошее
Качество пайки медного провода к пластине	Отличное	Хорошее	Неудовлетворительное	Хорошее	Отличное	Хорошее	Отличное
Качество пайки SMD компонентов	Отличное	Отличное	Удовлетворительное	Отличное	Отличное	Отличное	Отличное

Примечание. *Проводит до и во время нагрева, после остывания – не проводит.

Подводя итогу, можно сказать, что для повседневных задач лучше всего подходят флюсы RusFluxER-700-Pro, MechanicMCN-UV10, PJLSWNC-559-ASM и AmtechNC-559-ASM-UV, однако следует принять во внимание на то, что 559-е не является безотмывочными. Для пайки SMD-компонентов наиболее оптимальными являются Flux-PlusNC 21000 и CyberFluxRMA-223 Pro. AmtechRMA-223 показал не очень хорошие результаты, что заставляет усомниться в его качестве и оригинальности.

Правильный выбор флюса позволяет получить требуемое качество соединения при пайке.

Библиографические ссылки

1. Ланин В. Л., Достанко А. П., Телеш Е. В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники. Минск : Изд. центр БГУ, 2007. 574 с.
2. ГОСТ 24715–81. Соединения паяные. Методы контроля качества [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008837> (дата обращения: 19.11.2021).

3. Пайка в приборостроении [Электронный ресурс]. URL: <https://megaobuchalka.ru/6/50144.html> (дата обращения: 19.11.2021).

4. Выбор флюса для пайки BGA микросхем [Электронный ресурс]. URL: <https://svarkaipayka.ru/material/flyus-dlya-payki/vyibor-flyusa-dlya-bga-mikroshem.html> (дата обращения: 19.11.2021).

5. ГОСТ Р МЭК 61191-1-2017 Печатные узлы. Часть 1. Поверхностный монтаж и связанные с ним технологии. Общие технические требования [Электронный ресурс]. URL: https://allgosts.ru/31/190/gost_r_mek_61191-1-2017 (дата обращения: 19.11.2021).

6. Р 50-601-40-93 Рекомендации. Входной контроль продукции. Основные положения [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/R506014093RekomendaciiVxo.html> (дата обращения: 19.11.2021).

7. Медведев А. М. Сборка и монтаж электронных устройств [Электронный ресурс] // Мир электроники. М. : РИЦ Техносфера, 2007. 256 с. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=89013> (дата обращения: 30.10.2020). ISBN 978-5-94836-131-4.

© Орешенко Т. Г., Афанасьев Р. В., Гринберг Г. М., 2022

**«ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»**

УДК 621.314.6

**МЕТОДИКА ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО
ИМИТАЦИОННО-НАТУРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Е. А. Мизрах, Д. К. Лобанов, С. Б. Ткачев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: enis-home@mail.com

В статье описана методика эскизного проектирования энергосберегающего имитационно-натурного комплекса для испытаний систем электропитания космических аппаратов, рассмотрены основные этапы эскизного проектирования.

Ключевые слова: эскизное проектирование, испытания, системы электропитания, космический аппарат, энергосбережение.

Энергосберегающий имитационно-натурный комплекс (ЭИНК) для испытаний систем электропитания космических аппаратов представляет собой систему, предназначенную для проведения электрических испытаний энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) системы электропитания (СЭП) космического аппарата. Топология ЭИНК [1–3], наиболее полно, отвечающая задачам электрических испытаний ЭПА (рис. 1), состоит из следующих основных подсистем: натурального образца испытываемой СЭП, имитатора солнечной батареи (ИСБ), имитатора аккумуляторной батареи (ИАБ), нагрузочного устройства комбинированного типа (НУК) и выпрямителя – стабилизатора (ВС), служащего источником электроэнергии модуля ЭИНК.

При проектировании [4] ЭИНК руководствуются техническими требованиями (ТТ), в которых указываются назначение системы с указанием условий применения и зафиксированы требования к техническим характеристикам. В соответствии с ТТ составляются технические задания на проектирование основных подсистем ЭИНК.

Основные подсистемы ЭИНК: ИСБ, ИАБ, представляют собой источники электроэнергии с нелинейными внешними характеристиками, воспроизводящие ВАХ прототипов. НУРТ также можно рассматривать как источник электроэнергии, так как в нем используется импульсный преобразователь входной электрической энергии одного уровня напряжения в выходную энергию другого уровня напряжения, рекуперированную в сеть электропитания ЭИНК. К ИСБ, ИАБ, НУРТ могут быть применены методы проектирования стабилизированных источников электропитания постоянного тока.

С другой стороны основные подсистемы ЭИНК, для обеспечения требуемой точности воспроизведения статических и динамических характеристик прототипов, представляют собой нелинейные системы автоматического управления (САУ). Для обеспечения технических требований и энергосбережения в основных подсистемах применён

принцип двойного регулирования, использующий непрерывный и импульсный законы управления, что усложняет проектирование этих подсистем. При проектировании основных подсистем как САУ, требуется проведение статического и динамического расчетов, математического и имитационного моделирования.

Задача статического расчета заключается в выборе функционально необходимых устройств и составных частей структурной схемы, разработке их математических моделей, составлении и преобразовании функциональной схемы основной подсистемы, анализе статической точности, выборе и назначении передаточных коэффициентов звеньев функциональной схемы.

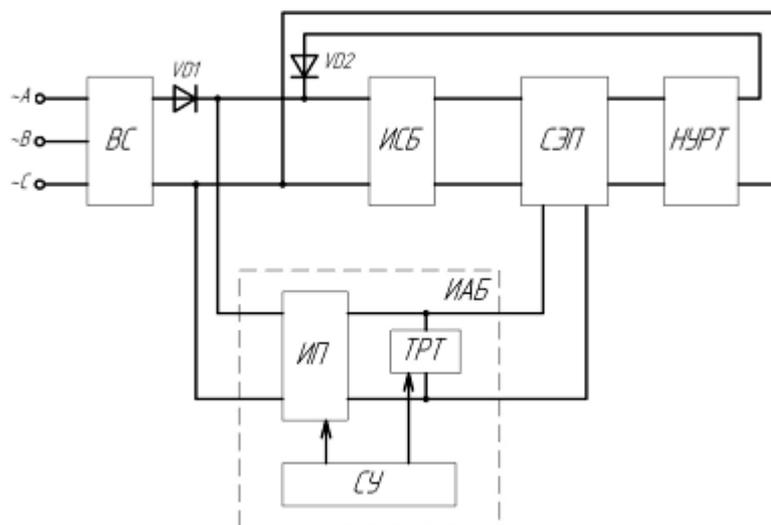


Рис. 1. Структурная схема модуля ЭИНК с общим источником питания ИСБ и ИАБ и с двунаправленным ИП в ИАБ:

ВС – выпрямитель-стабилизатор; ИСБ – имитатор солнечной батареи;
 СЭП – испытываемая система электропитания; НУРТ – нагрузочное устройство рекуперативного типа; ИАБ – имитатор аккумуляторной батареи;
 ИП – импульсный преобразователь; ТРТ – транзисторный регулятор тока;
 СУ – система управления

Задачей динамического расчета является создание методами анализа и синтеза САУ, полностью удовлетворяющей требованиям качества. С целью получения требуемых динамических свойств в САУ вводят дополнительные устройства, называемые корректирующими (КУ).

Учитывая многолетний опыт участников проекта по разработке и созданию подобных систем и используя широко распространенные методы проектирования источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры [1–3], общую структуру методики эскизного проектирования ЭИНК с заданными статистическими и динамическими свойствами можно представить в виде последовательности следующих этапов (рис. 2).

На этапе 1 проводится анализ технических характеристик ЭПА СЭП с целью формирования технических требований к основным подсистемам ЭИНК. На этом этапе устанавливаются требования к электрическим статическим параметрам (величинам токов, напряжений, мощностей) и динамическим параметрам (перерегулирование, время регулирования, диапазон частот воспроизведения импедансных и адмитансных характеристик) основных подсистем ЭИНК.

На этапе 2 проводится выбор и разработка структурных схем основных подсистем ЭИНК с требуемой точностью воспроизводящих статические и динамические характеристики прототипов (солнечных батарей, аккумуляторных батарей, полезных нагрузок и т. п.).

На этапе 3 разрабатывают эскизные проекты основных подсистем ЭИНК, разрабатывают методики статического и динамического расчётов основных подсистем ЭИНК с требуемой точностью воспроизводящих статические и динамические характеристики прототипов, создают имитационные и математические модели основных подсистем.

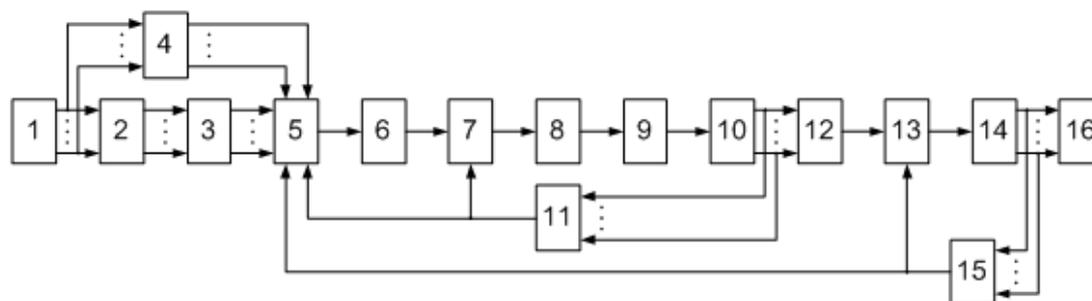


Рис. 2. Общая структура методики эскизного проектирования ЭИНК модульного типа

1 этап – анализ технических характеристик ЭПА СЭП; 2 этап – выбор и разработка структурных схем основных подсистем ЭИНК; 3 этап – эскизное проектирование основных подсистем ЭИНК; 4 этап – разработка имитационных и математических моделей ЭПА СЭП; 5 этап – разработка описания имитационных моделей основных подсистем ЭИНК; 6 этап – проведение вычислительных экспериментов с имитационными и математическими моделями основных подсистем ЭИНК; 7 этап – разработка эскизной конструкторской документации макета ЭИНК модульного типа; 8 этап – изготовление макета ЭИНК модульного типа; 9 этап – разработка программ и методик исследовательских испытаний макета ЭИНК модульного типа; 10 этап – исследовательские испытания макета ЭИНК модульного типа; 11 этап – уточнение параметров электрических схем, математических и имитационных моделей основных подсистем ЭИНК; 12 этап – разработка эскизной конструкторской документации экспериментального образца ЭИНК модульного типа; 13 этап – разработка программы и методики исследовательских испытаний экспериментального образца ЭИНК модульного типа; 14 этап – исследовательские испытания экспериментального образца ЭИНК модульного типа, 15 этап – проведение корректировки эскизной конструкторской документации, математических и имитационных моделей; 16 этап – разработка документа «Руководство по эксплуатации экспериментального образца ЭИНК модульного типа и его основных подсистем».

На этапе 4 разрабатывают имитационные и математические модели ЭПА СЭП для различных режимов функционирования СЭП с целью использования при моделировании работы модуля ЭИНК в соответствующих режимах.

На этапе 5 разрабатывают и составляют описания имитационных моделей основных подсистем ЭИНК в стандарте пакета схемотехнического моделирования MicroCAP.

На этапе 6 осуществляется проведение вычислительных экспериментов с имитационными и математическими моделями основных подсистем и ЭИНК в целом для проверки и отработки их работоспособности, установления соответствия результатов моделирования предъявляемым требованиям и, в случае необходимости, корректировки параметров моделей. На этом этапе проводится проверка работоспособности имитационных моделей основных подсистем в автономных режимах и в составе ЭИНК при моделировании работы СЭП КА на освещенном и теневом участках орбиты.

На этапе 7 разрабатывают эскизную конструкторскую документацию макета ЭИНК модульного типа;

На этапе 8 осуществляют изготовление макета ЭИНК модульного типа.

На этапе 9 разрабатывают программы и методики исследовательских испытаний макета ЭИНК модульного типа и оформляют соответствующие документы.

На этапе 10 проводят исследовательские испытания изготовленного макета ЭИНК модульного типа с целью установления соответствия свойств ЭИНК предъявляемым статическим и динамическим требованиям, оформляют акт и протокол испытаний.

На этапе 11 производится уточнение параметров электрических схем составных частей, математических и имитационных моделей отдельных основных подсистем ЭИНК, внесение исправлений в документацию.

На этапе 12 разрабатывают эскизную конструкторскую документацию экспериментального образца ЭИНК модульного типа и оформляют отчетную документацию.

На этапе 13 разрабатывают программы и методики исследовательских испытаний экспериментального образца ЭИНК модульного типа и оформляют соответствующие документы.

На этапе 14 проводят исследовательские испытания экспериментального образца ЭИНК модульного типа в автономном режиме и с использованием натурального образца вторичного источника электроэнергии системы электропитания космического аппарата.

На этапе 15 в результате сравнительного анализа достигнутых результатов и требований ТЗ проводят корректировки параметров математических и имитационных моделей, эскизной конструкторской документации экспериментального образца ЭИНК модульного типа и его основных подсистем.

Этап 16 эскизного проектирования – заключительный и заканчивается разработкой комплексного документа «Руководство по эксплуатации экспериментального образца ЭИНК модульного типа и его основных подсистем».

Разработанная общая структура методики эскизного проектирования ЭИНК позволяет обеспечить заданные статические и динамические свойства комплекса для испытания систем электропитания космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Патент на полезную модель 59208 Российская Федерация. Комплекс для наземных испытаний систем электропитания космических аппаратов / Е. А. Мизрах, Р. В. Балакирев, Д. К. Лобанов, С. Б. Ткачев, А. С. Федченко ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Оpubл. 10.02.2016, бюл. № 4.

2. Лобанов Д. К., Федченко А. С. Энергосберегающий комплекс модульного типа для испытаний систем электропитания космических аппаратов [Электронный ресурс] // Сборник тезисов науч.-техн. конф. молодых специалистов АО «ИСС» (22–25 августа 2017 г.), Железногорск: URL: <https://ntk.iss-reshetnev.ru/index/collection.pdf> (дата обращения: 01.02.2020).

3. Прикладные научные исследования для разработки имитационно натуральных исследовательских комплексов мощных бортовых энергетических установок и систем аккумуляции энергии космических аппаратов : отчет о ПНИ (промежуточ., 1 этап) / Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России» на 2014–2020 гг., приоритетное направление «Транспортные и космические системы» ; рук. Мизрах Е. А., исполн.: Лобанов Д. К., Федченко А. С., Ткачев С. Б., Пойманов Д. Н., Балакирев Р. В., Штабель Н. В. Красноярск, 2014. 208 с. № гос. регистрации 114090470019. Инв. № 2511201403.

4. ГОСТ 2.119–2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эскизный проект. М. : Стандартинформ, 2018. 9 с.

© Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., Ткачев С. Б. 2022

**БАЗОВАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
КАК ЭЛЕМЕНТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ**

В. В. Серватинский, Н. А. Емельяненко

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: natasha-8658@mail.ru

Определена базовая конфигурация подсистем для внедрения интеллектуальных транспортных систем в городской агломерации с учетом особенности функционирования улично-дорожной сети. Создан научный задел по созданию конструктора базовой комплектности интеллектуальных транспортных систем с учетом основных характеристик района внедрения по различным показателям.

Ключевые слова: управление транспортными потоками, интеллектуальные транспортные системы, безопасность дорожного движения.

В настоящее время транспорт является главной силой экономики и развития. С одной стороны, современные реалии диктуют новые требования к мобильности, а с другой – более жесткие требования к безопасности движения, в связи с чем возникает необходимость развития новых сервисов для участников всех уровней транспортной системы. Решение данной проблемы найдено во внедрении интеллектуальных транспортных систем (далее – ИТС).

Интеллектуальной транспортной системой называют систему управления, в рамках которой производится интеграция различных информационных и телематических технологий. Система предназначена для автоматизации, поиска и принятия решений по эффективному управлению дорожно-транспортным комплексом субъекта, транспортным средством или их группой для достижения заданной мобильности населения, увеличения безопасности транспортного комплекса, а так же повышения уровня комфорта водителя и пользователя транспорта. Основная глобальная цель построения ИТС на автомобильных дорогах заключается в создании системы мониторинга и управления в реальном времени.

Высокая интенсивность, большое количество дорожно-транспортных происшествий, происходящих из-за нарушения скоростного режима, неравномерная транспортная нагрузка на автомобильные дороги в зависимости от времени суток, дней недели и сезонности, а так же слабое информирование участников дорожного движения с целью перераспределения транспортного потока – всё это является основными проблемами, связанными с управлением дорожным движением. Создание Единой цифровой интеллектуальной транспортной системы является решением вышеназванных проблем.

К главным задачам ИТС относятся:

- динамичное развитие улично-дорожной сети (далее – УДС) в городской агломерации;
- сокращение числа и тяжести дорожно-транспортных происшествий (далее – ДТП);
- увеличение скорости и снижение потерь времени на всех видах транспорта;
- повышение уровня информационной осведомленности участников движения;
- автоматизированный контроль и управление движением транспорта в режиме реального времени [1].

Отличительной чертой интеллектуальных транспортных системам от отдельных систем является наличие единого аналитического и управленческого центра, который объединяет и координирует работу всех элементов системы. Таким образом, интеллектуальной транспортной системой можно назвать ту совокупность отдельных подсистем, обмен информационной, аналитической и управленческой информацией которых сосредоточен в едином центре управления такими подсистемами. Такой подход является комплексным и позволяет проводить сбалансированное развитие транспортной инфраструктуры, детально прорабатывать организацию дорожного движения и разработку системы приоритетного развития общественного транспорта.

Внедрение интеллектуальных транспортных систем осуществляется на трех уровнях: федеральном, региональном, муниципальном. Каждый уровень представлен определенными модулями и подсистемами, реализация которых выстраивает единую взаимосвязанную систему.

В соответствии с ОДМ 218.9.011-2016 [2] выделяются следующие подсистемы:

Комплексные подсистемы ИТС:

- подсистема косвенного управления транспортными потоками;
- подсистема директивного управления транспортными потоками;
- автоматизированная система управления дорожным движением;
- подсистема управления состоянием дорог;
- подсистема контроля соблюдения правил дорожного движения и контроля транспортных средств;

– подсистема пользовательских сервисов.

Инструментальные подсистемы ИТС:

- подсистема метеомониторинга;
- подсистема мониторинга состояния дороги и дорожной инфраструктуры;
- подсистема обеспечения противогололедной обстановки;
- подсистема диспетчерского управления ТС служб содержания дорог;
- подсистема автоматизированного сбора платы за проезд;
- подсистема видеонаблюдения, детектирования ДТП и ЧС;
- подсистема мониторинга параметров транспортного потока;
- подсистема весогабаритного контроля транспортных средств;
- подсистема информирования участников дорожного движения (далее – УДД) с помощью дорожное информационных табло и знаков переменной информации;
- подсистема информирования пользователей подсистемы ИТС с помощью бортовых устройств транспортных средств и персональных устройств;
- подсистема светофорного управления;
- подсистема управления выездом и въездом на парковки;
- подсистема управления выездом на автомагистраль;
- подсистема регистрации нарушений ПДД;
- подсистема детектирования опасных грузов;
- подсистема пополосного управления;
- подсистема мониторинга экологических параметров;
- подсистема обеспечения приоритета движения транспортных средств.

Одной из важных функций ИТС является объединение транспортной, дорожной, сервисной, информационной и технологической инфраструктур в единый комплекс. Он включает в себя ряд подсистем, для их эффективного взаимодействия необходимо формировать центр управления, который будет осуществлять мониторинг эффективности элементов ИТС, а также поддержание их в рабочем состоянии. Учитывая практический опыт, городская среда требует постоянного мониторинга и управления движением, в реальном времени с учетом динамических процессов и информации о них, поступающей в центр управления. Стоит отметить, что в функционал ИТС заключается

не в удобстве работы городских служб, а в решение проблем, с которыми сталкиваются участники дорожного движения, а также задач городской мобильности, комфорта и безопасности [3, с. 19].

Состав инструментальных подсистем ИТС определяется ГОСТ Р 56294–2014 «Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональной и физической архитектурам интеллектуальных транспортных систем» [4] и Распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 25 марта 2020 г. № АК-60-р «Об утверждении методики оценки и ранжирования локальных проектов в целях реализации мероприятия «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [5]. Однако функциональность и архитектура в вышеназванном документе элементов ИТС не определены. В связи тем, что отсутствие единой нормативной базы отрицательно сказывается на проектировании системы, наиболее актуальной задачей в настоящее время является формирование на государственном уровне политики развития национальной сети, а также нормативно правовой, технической и методологической базы.

В субъектах, где построение ИТС необходимо осуществлять «с нуля» возникают сложности с формированием приоритетных подсистем для первоочередного развития. В связи с чем, появляется потребность в разработке универсального комплекта подсистем ИТС, так называемой базы, пригодной для применения на муниципальном уровне с учетом особенностей функционирования транспортной системы городских агломераций.

В книге «Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России» [3] И. А. Евстигнеев выделяет основные отличительные черты функционирования транспортной системы.

Учитывая особенности функционирования УДС, выделим три приоритетных направления развития в городской агломерации:

- повышение безопасности дорожного движения;
- развитие физической и информационной доступности;
- снижение негативного воздействия на окружающую среду.

При создании базовой конфигурации подсистем для внедрения ИТС в городской агломерации рекомендовано руководствоваться приоритетными направлениями развития в городской черте, а также общими требованиями к элементам ИТС [5].

В настоящее время на территории Российской Федерации уровень развития ИТС остается низким. Однако стоит отметить, что каждый субъект имеет в своем подчинении одну или несколько подсистем ИТС. Дальнейшие шаги развития состоят из наполнения и увеличения степени зрелости ИТС на территории субъекта.

Основная цель всех участников внедрения ИТС на сети автомобильных дорог – повышение уровня безопасности дорожного движения и уровня комфорта поездки.

При возникновении ДТП время реагирования (например, скорость приезда скорой медицинской помощи) зачастую становится вопросом жизни и смерти. Учитывая этот факт, первоочередным для внедрения будут являться подсистемы мониторинга управления состоянием дорог. Целью внедрения вышеназванной подсистемы является обеспечение БДД, заданной пропускной способности, поддержание нормативного уровня содержания дорожного полотна и элементов дорожной инфраструктуры; мониторинг текущего состояния и оперативного реагирования служб содержания [2].

Далее рекомендуется проводить поэтапное развитие автоматизированной системы управления дорожным движением, которая представляет собой комплексную систему косвенного или директивного управления, или их сочетаний. К основным функциям

системы косвенного управления относится мониторинг транспортного потока, маршрутное ориентирование, информационный сервис; к основным функциям директивного управления относят светофорное регулирование, управление транспортными потоками с помощью ДИТ и ЗПИ. Для эффективной работы интеллектуальной транспортной системы необходимо создавать комплексный подход к внедрению основных этапов ИТС.

Следующим приоритетным направлением является подсистема контроля соблюдения правил дорожного движения и контроля транспорта. Помимо цели повышения безопасности дорожного движения данная подсистема направлена на принуждение участников дорожного движения к соблюдению ПДД и формирование поведения и культуры вождения УДД [2].

Заключаящим элементом в базовом сценарии внедрения ИТС является Единая цифровая платформа транспортной системы (далее – ЕПУТС), которая представляет собой систему аналитики и сбора информации о транспортных потоках в режиме реального времени. Основная задача ЕПУТС состоит в организации функционирования всех подсистем и сервисов ИТС как единой системы для достижения заданных целей и задач, заложенных в основе внедрения ИТС. Важно отметить, что ЕПУТС является обязательной частью при внедрении, без которой набор отдельных подсистем нельзя считать ИТС.

Однако стоит отметить, что для более детальной проработки приоритетных к развитию элементов ИТС необходимо провести оценку территории внедрения по показателям готовности к внедрению и по показателям наличия или отсутствия той или иной подсистемы.

Дальнейшая цель исследования состоит в создании конструктора базовой комплектности ИТС на основе технико-экономических критериев оценки организационно-технической составляющей объекта внедрения. Благодаря созданию данного конструктора комплектации ИТС появится возможность автоматизированного подбора состава интеллектуальной транспортной системы с учетом основных характеристик района внедрения по различным показателям.

Библиографические ссылки

1. Проект Концепции создания и функционирования национальной сети интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования.
2. ОДМ 218.9.011–2016. Рекомендации по выполнению обоснования интеллектуальных транспортных систем. М., 2019. 76 с.
3. Евстигнеев И. А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России. М. : Перо, 2021. 294 с.
4. ГОСТ Р 56294–2014. Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональной и физической архитектурам интеллектуальных транспортных систем. М., 2014.
5. Методика оценки и ранжирования локальных проектов в целях реализации мероприятия «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» в рамках Федерального проекта «общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги». М., 2020.

© Серватинский В. В., Емельяненко Н. А., 2022

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ SPACEWIRE НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ СПЕЦИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО ПРОТОКОЛА RMAP

А. С. Максютин

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

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: Ellis1998@yandex.ru

В зарубежной космической отрасли на протяжении долгого времени используется международный стандарт коммуникаций бортового авиационного и космического оборудования – SpaceWire. Стандарт, разработанный международной группой специалистов, регламентирует высокоскоростную передачу больших объемов информации, создание единой инфраструктуры высокоскоростной обработки данных для соединения датчиков, элементов системы обработки данных и блоков массовой памяти. В России SpaceWire постепенно внедряется и используется на перспективных космических аппаратах. Существует ряд протоколов связи, которые можно использовать в сочетании со стандартом SpaceWire. RMAP – один из таких протоколов, позволяет записывать и считывать данные из памяти удаленного узла SpaceWire. В рамках данной статьи описывается разработка алгоритмов тестирования бортовой аппаратуры SpaceWire, оснащенной блоком RMAP на соответствие стандарту ECSS-E-ST-50-52C. Представлено рабочее место для проведения тестирования вместе с кратким описанием используемого оборудования. Разработанные алгоритмы тестирования реализованы в виде программного кода, преобразованного в консольное пользовательское приложение для удобного взаимодействия с оператором. В статье описывается общая структура тестирования и в качестве примера приводится тестирование команды записи протокола RMAP. Данный алгоритм описывается при помощи блок-схемы тестирования, а также текста. В заключении изложены дальнейшие планы по развитию данной тематики в виде дополнительных тестов.

Ключевые слова: космические аппараты, бортовая аппаратура, алгоритмы тестирования, SpaceWire, RMAP.

SpaceWire – технология, обеспечивающая высокоскоростную передачу больших объемов информации, создание единой инфраструктуры высокоскоростной обработки данных для соединения датчиков, элементов системы обработки данных и блоков массовой памяти [1].

Если рассматривать базовую эталонную модель взаимодействия систем – OSI, то стандарт SpaceWire охватывает три нижних уровня данной модели и не охватывает транспортный уровень, что представлено на рис. 1 [2].

Для поддержки данной технологии был разработан транспортный протокол RMAP. Основной функционал данного протокола заключается в записи и считывании данных из памяти удаленных узлов SpaceWire. RMAP может быть использован для настройки сети, контроля узлов и передачи данных между ними [3].

В актуальной версии протокола ECSS-E-ST-50-52C [4] описываются положения, согласно которым должно работать оборудование SpaceWire, оснащенное RMAP. В связи с этим были разработаны и программно реализованы алгоритмы тестирования, осуществляющие проверку соответствия оборудования SpaceWire этим положениям.

Для проведения тестирования были использованы технические средства, представленные в таблице.

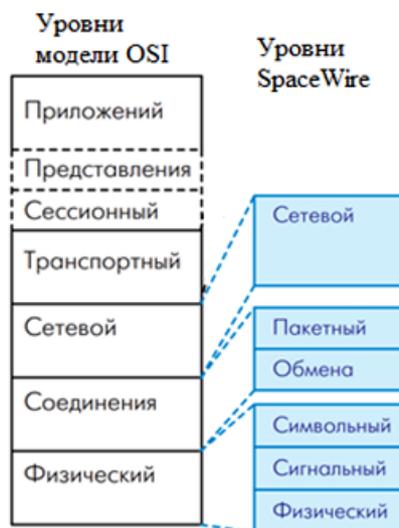


Рис. 1. Сопоставление иерархии протоколов стандарта SpaceWire с моделью Open Systems Interconnection

Список оборудования

№	Оборудование	Количество	Описание
1	ПК	1	Управляющее устройство
2	Мост Ethernet-SpaceWire	1	Устройство для связи интерфейсов Ethernet и SpaceWire
3	Оборудование SpaceWire	1	В испытаниях использовался 12-портовый коммутатор SpaceWire с блоком контроллера RMAP
4	Адаптер питания моста	1	Адаптер питания (АП-1) на 12 В
5	Адаптер питания оборудования	1	Адаптер питания (АП-2) на 5 В
6	Кабель Ethernet	1	Кабель для соединения ПК с мостом
7	Кабель SpaceWire	1	Кабель для соединения моста с оборудованием

Структурная схема разработанного рабочего места приведена на рис. 2.

Для тестирования оборудования было разработано специальное программное обеспечение (СПО). Для взаимодействия с данным СПО используется консольное пользовательское приложение, при помощи которого можно запустить определенный алгоритм тестирования [5].

Алгоритмы тестирования RMAP могут быть разделены на 3 основные группы:

1. Тестирование команды записи.
2. Тестирование команды чтения.
3. Тестирование команды RMW.

На начальном этапе тестирования производится выбор команды, которая подлежит проверке, что представлено в виде блок-схемы на рис. 3.

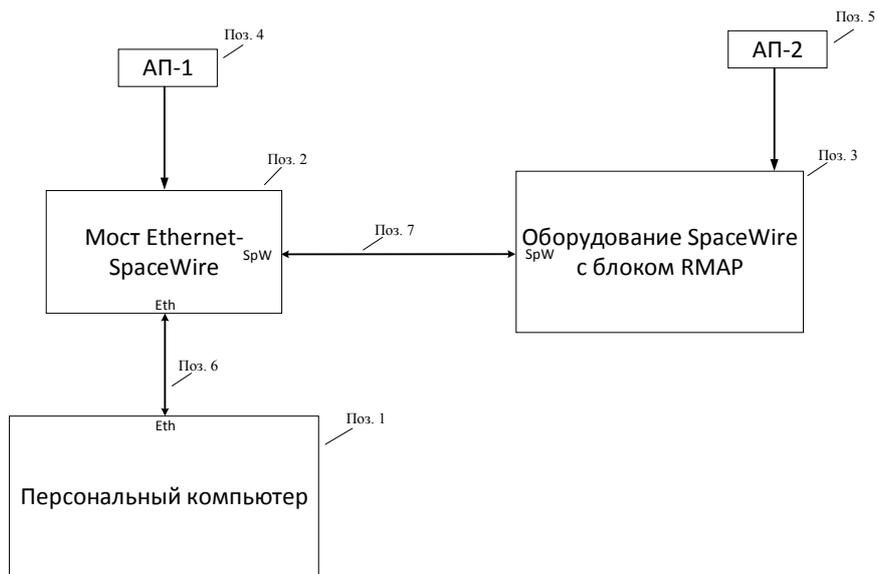


Рис. 2. Рабочее место тестирования блока RMAP оборудования SpaceWire

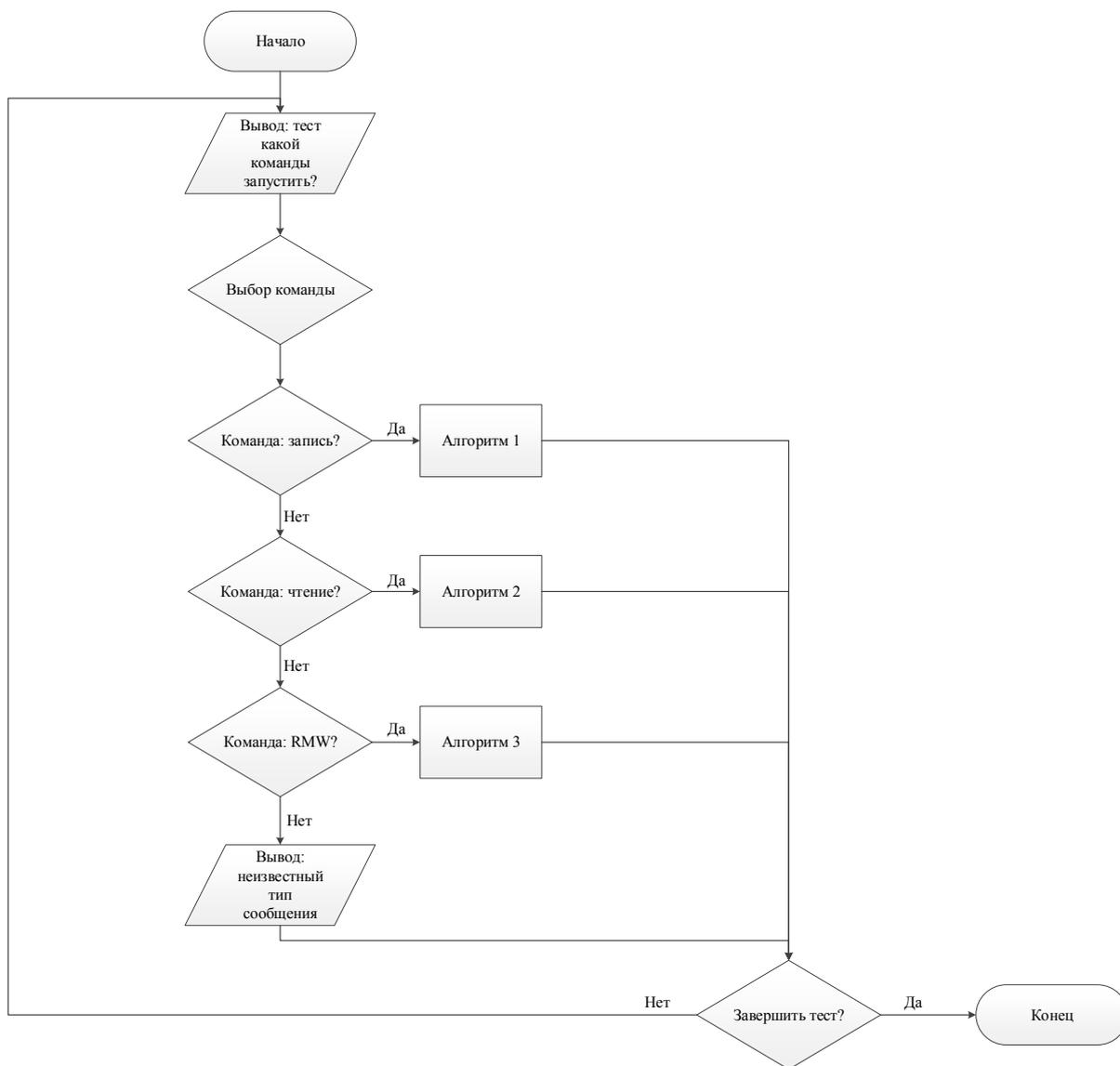


Рис. 3. Блок-схема выбора одного из алгоритмов тестирования RMAP

В качестве примера предлагается рассмотреть команду записи. С точки зрения стандарта ECSS-E-ST-50-52C команда записи проходит этапы, представленные на рис. 4.

Среди этих этапов реальный контроль при управлении передатчиком возможно осуществлять только при запросе на запись.

Процедура команды записи начинается тогда, когда приложение для пользователя инициатора отправляет запрос на выполнение команды записи (запрос на запись).

Согласно стандарту ECSS-E-ST-50-52C пользовательское приложение инициатора должно предоставить информацию, характеризующую общую структуру команды записи, которая представлена на рис. 5.

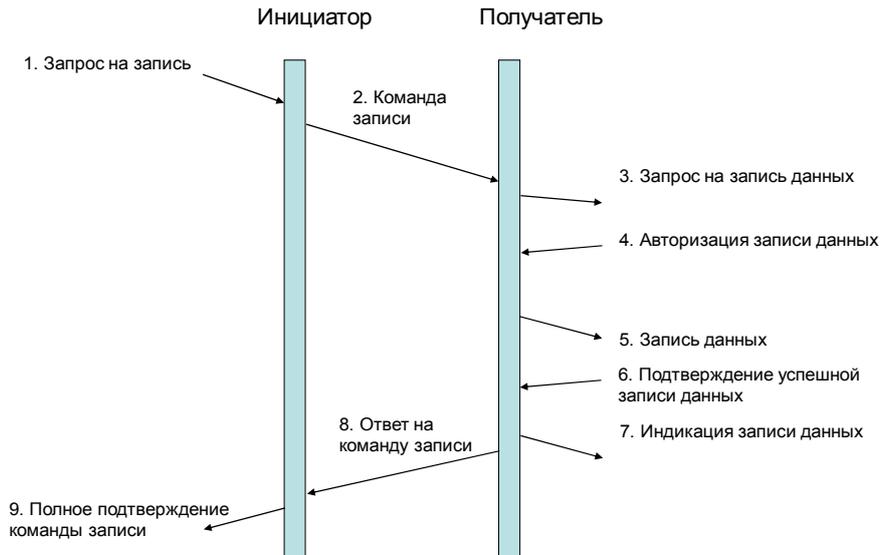


Рис. 4. Этапы прохождения команды записи транспортного протокола RMAP

Первый переданный байт

	Адрес получателя	Адрес получателя
Логический адрес получателя	Идентификатор протокола	Код операции	Ключ
Адрес ответа	Адрес ответа	Адрес ответа	Адрес ответа
Адрес ответа	Адрес ответа	Адрес ответа	Адрес ответа
Адрес ответа	Адрес ответа	Адрес ответа	Адрес ответа
Логический адрес инициатора	Идентификатор передачи (MS)	Идентификатор передачи (LS)	Расширенный адрес
Адрес (MS)	Адрес	Адрес	Адрес (LS)
Размер данных (MS)	Размер данных	Размер данных (LS)	CRC заголовка
Данные	Данные	Данные	Данные
Данные	Данные
Данные	CRC данных	Конец пакета	

Последний переданный байт

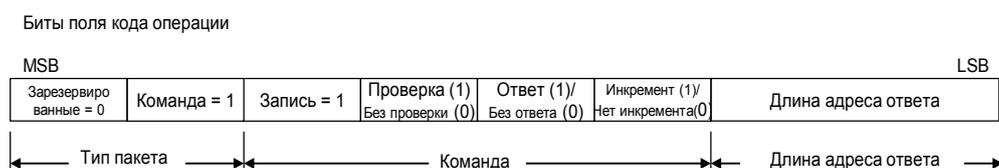


Рис. 5. Структура пакета команды записи транспортного протокола RMAP

Производя изменения в этих данных можно ввести ошибки, которые описаны в стандарте. Например, для команды записи это такие ошибки как:

1. Неполный заголовок.
2. Ошибка конца пакета.
3. Ошибка CRC заголовка.
4. Неиспользуемый тип пакета.
5. Неверный командный код.
6. Неверный ключ.
7. Неверный логический адрес.
8. Отклонение команды.
9. Превышение объема буфера.
10. Ошибка CRC данных (бит проверки данных задан (1)).
11. Неожиданный конец пакета (бит проверки данных задан (1)).
12. Избыток данных (бит проверки данных задан (1)).
13. Ошибка конца пакета (бит проверки данных задан (1)).
14. Ошибка CRC данных (бит проверки данных не задан (0)).
15. Неожиданный конец пакета (бит проверки данных не задан (0)).
16. Избыток данных (бит проверки данных не задан (0)).
17. Ошибка конца пакета (бит проверки данных не задан (0)).

Рассматривается алгоритм тестирования команды записи. Данный алгоритм тестирования представляет собой цикл проверок соответствия требованиям положений стандарта RMAP. Это положения о реакции тестируемого оборудования на соответствующую корректную команду, а также на команды, содержащие в своей структуре ошибки, описанные в стандарте.

Для команды записи число рассматриваемых в стандарте ошибок N равно 17. При N равном 0 осуществляется отправка корректной команды записи. Для всех команд устанавливается бит ответа равный 1, благодаря чему с тестируемого устройства должен приходиться ответ на команду.

На тестирующем устройстве формируется корректная команда записи и отправляется на конфигурационный порт тестируемого устройства. Данное устройство должно принять и обработать пакет в соответствии со стандартом – записать в обозначенный адрес своей памяти прописанные в команде записи значения (если данная память доступна для записи), затем отправить ответный пакет. Ответные пакеты имеют в своем составе бит статуса, исходя из которого можно судить о возникших ошибках в ходе выполнения команды. В случае корректной команды этот код должен быть равен 0. В случае совпадения ожидаемого статуса выводится сообщение об успешном прохождении цикла теста. Запускается следующий цикл с N равным 1, что обозначает ошибку «Неполный заголовок». Это продолжается до тех пор, пока N не достигнет своего предельного значения. В случае если для того или иного цикла на тестирующее устройство приходит ответ на команду с некорректным статусом ошибки или не приходит вовсе в течении нескольких секунд, то выводится сообщение о некорректности работы оборудования на данном цикле тестирования. Таким образом, после прохождения всех циклов можно ознакомиться с тем, каким положениям стандарта соответствует тестируемое оборудование, а каким нет.

Блок-схема данного алгоритма тестирования представлена на рис. 6.

Тесты для команд чтения и RMW являются аналогичными, меняются вводимые ошибки в соответствии с положениями в стандарте для данных команд.

Данные алгоритмы были отработаны на 12 портовом коммутаторе SpaceWire, с реализованным в нем блоком контроллера RMAP, что подтверждает их корректность [6]. Коммутатор успешно принимал команды записи, чтения и RMW, а также реаги-

вал в соответствии со стандартом на большинство вводимых ошибок. Те ошибки, на которые коммутатор отвечал некорректно с точки зрения стандарта, были описаны отдельно в технической документации на него.

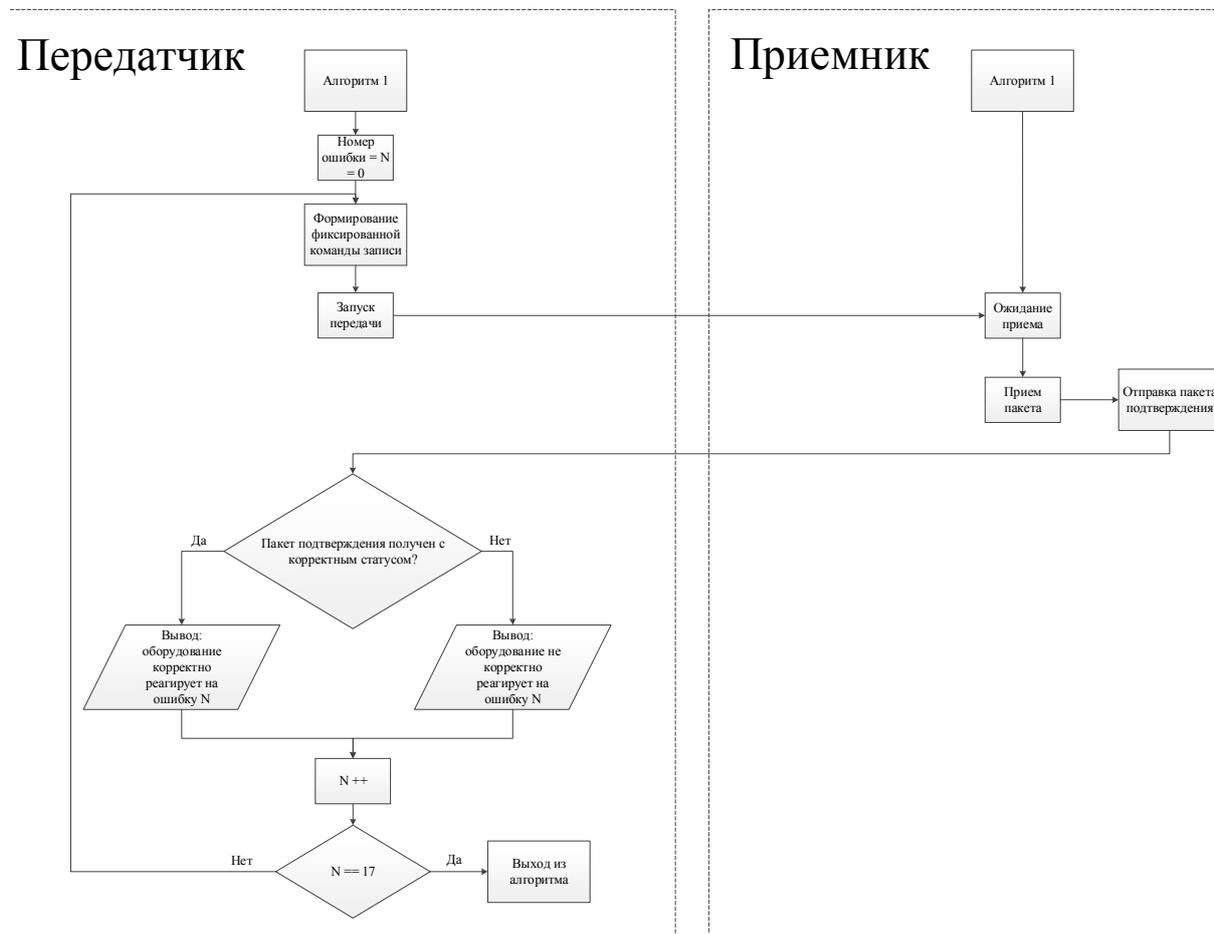


Рис. 6. Блок-схема алгоритма тестирования команды записи RMAP

В дальнейшем разработанные тесты будут дополнены новыми пунктами, такими как:

1. Проверка реакции оборудования SpaceWire на ответы на команды записи, чтения и RMW;
2. Проверка реакции оборудования SpaceWire на ошибки ответов на команды записи, чтения и RMW обозначенные стандартом.

Библиографические ссылки

1. Горбунов С. Ф., Гришин В. Ю., Еремеев П. М. Сетевые интерфейсы космических аппаратов: перспективы развития и проблемы внедрения // Наноиндустрия. 2019. № 89. С. 128–130.
2. Шейнин Ю., Солохина Т., Петричкович Я., Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых вычислительных комплексов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/759> (дата обращения: 03.01.2022).
3. Parkes S., Macclements C. SpaceWire Remote Memory Access Protocol [Электронный ресурс]. URL: <https://ci-builder.ru/07/Index05.htm> (дата обращения: 03.01.2022).

4. Remote memory access protocol (normative) [Электронный ресурс]. URL: <http://spacewire.esa.int/content/Standard/documents/SpaceWire%20RMAP%20Protocol%20Draft%20F%204th%20Dec%202006.pdf> (дата обращения: 05.01.2022).

5. Создание консольного приложения [Электронный ресурс]. URL: <https://ci-builder.ru/07/Index05.htm> (дата обращения: 07.01.2022).

6. Бортовые сети космических аппаратов нового поколения [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.com/137755601-Bortovye-seti-kosmicheskikh-apparatov-novogo-pokoleniya-na-osnove-setey-tehnologii-spacewire.html> (дата обращения: 19.01.2022).

© Максютин А. С., 2022

ЦИФРОВОЙ ПРОТОТИП РАЗРАБОТКИ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА ПО ЗАДАВАЕМОЙ ТРАЕКТОРИИ В SIMINTECH

В. А. Мызникова, А. В. Чубарь, И. В. Солопко

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: alexchub@mail.ru

Представление пульта управления в виде кнопок, указывающих направления движения робота, который обеспечивает простоту управления. Наглядное представление, с помощью 3D-визуализации, движение робота по траектории, задаваемой оператором.

Ключевые слова: робот, управление, математическая модель, визуализация.

При проектировании любого объекта неизбежно приходится сталкиваться с проведением испытаний в различных условиях. Для этого можно построить тестовую модель, но, если объект является достаточно сложным, и моделей нужно построить сразу несколько, сэкономить трудовые и материальные ресурсы может помочь математическое моделирование.

Система управления – строго последовательный набор средств принятия информации об объекте и средств влияния на него, созданный для выполнения поставленных задач.

Сегодня автономное управление становится все более значимым в робототехнике, потому что снижает нагрузку на оператора. Под автономным объектом будет понимать мобильный робот, так как он может осуществлять свою деятельность под управлением оператора или автономно. Мобильные роботы, имеющие автономность, нуждаются в решении многих сложных технических задач, в первую очередь это построение траектории движения.

Идеальным движением можно назвать траекторию, которая известна заранее и на пути которой нет непредусмотренных внешних воздействий. В таком случае объект движется по четкой схеме или алгоритму заданным пользователем.

Направление движения робота по плоскости задает пульт управления, состоящий из 8 кнопок.

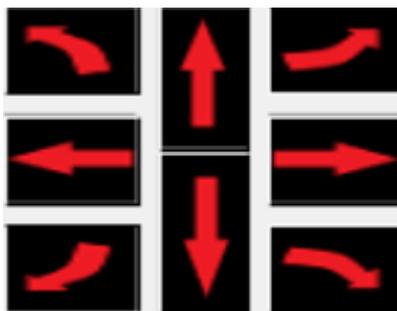


Рис. 1. Пульт управления

Рассмотрим возможные случаи поворота колес, учитывая принятые решения, что оба левых колеса робота будут вращаться с одинаковой скоростью, как и оба правых колеса, поэтому четырехколесную модель робота мы свели к двухколесной. Обозначим направления движения робота: вперед, назад, вперед левее, вперед правее, назад левее, назад правее, направо и налево. Для передачи информации, что кнопка была нажата, необходимо создать сигналы. Каждому направлению движения соответствует свой сигнал. Связь между сигналами, колесами, направлениями и кнопками на пульте управления представлены в таблице.

Связь между сигналами, колесами и кнопками

Направление	Сигнал	Левое колесо	Правое колесо	Кнопка
Вперед	Up	Вперед	Вперед	Button
Назад	Down	Назад	Назад	Button1
Налево	L	Назад	Вперед	Button2
Направо	R	Вперед	Назад	Button3
Вперед левее	UpL	Стоит	Вперед	Button4
Вперед правее	UpR	Вперед	Стоит	Button5
Назад левее	DownL	Стоит	Назад	Button6
Назад правее	DownR	Назад	Стоит	Button7

Схему передачи сигнала с пульта управления на колеса.

Используем блок *Субмодель* из вкладки *Субструктуры*, который формирует “оболочку” для создания вложенной схемы. Информация о срабатывании кнопки будет передаваться через *Вход алгоритма*, обязательно необходимо внести используемые сигналы в Список сигналов проекта указав тип данных – вещественное, режим – вход, значение – 0, способ расчета – переменная. Поступающие сигналы суммируются перед записью в сигналы колес с помощью блока *Сумматор*.

Согласно таблице, установим знаки в сумматоре и соединим блоки *Вход алгоритма* и *Сумматор*, если колесо крутится вперед, то знак в блоке будет “+”, если колесо крутится в назад, то соответственно “-”, если колесо стоит на месте, то связи между блоками не будет. Полученная схема представлена на рис. 2.

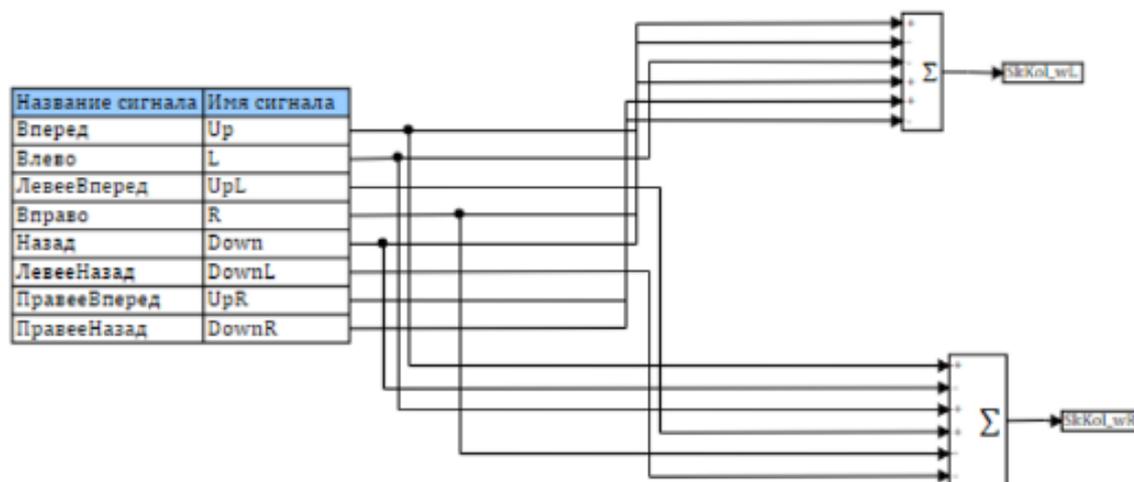


Рис. 2. Схема передачи сигнала с пульта управления

Связь между сигналами и кнопками на пульте управления.

Редактор связей предназначен для наглядного установления связей между сигналами базы данных или сигналами проекта и свойствами графических примитивов или

внешними свойствами графических групп. Источниками будут служить кнопки на пульте управления, а приемниками сигналы.

Создадим скрипт для визуализации движения робота в окне графического редактора. С помощью функции *viewer3dcreate* создадим окно 3D-визуализации, функция *viewer3dplotparallelepiped* создает параллелепипед с размерами и координатами в пространстве, которые мы указываем через запятую. В дальнейшем мы заменим параллелепипед на 3D-объект. Установим размеры окна с помощью функции *Viewer3DSetWindowSize*, указав через запятую идентификатор окна 3D-визуализации и размеры окна x, y. Функция *Viewer3DSetWindowPosition* помогает установить положение окна. Процедура *Viewer3DSetCameraPosition* задает для камеры координаты базовой точки, которые мы указываем через запятую вместе с идентификатором окна 3D-визуализации. Задать 3D-примитив в качестве цели камеры можно с помощью процедуры *viewer3dsetcameraposition*, где сообщим идентификатор окна 3D-визуализации и объект-цель камеры. Функция *viewer3dsetcolor* устанавливает цвет для 3D-объекта в окне 3D-визуализации. Полученный скрипт представлен на рис. 3.

```
initialization
WinID = viewer3dcreate;
wid = 1; //ширина
len = 1; //длина
hei = 2; //высота
x0 = 0;
y0 = 0;
z0 = 0;
Obj = viewer3dplotparallelepiped(WinID, wid, len, hei, x0, y0, z0);
Viewer3DSetWindowSize(WinID, 140, 60);
Viewer3DSetWindowPosition(WinID, 600, 130);
Viewer3DSetCameraTarget(WinID, Obj);
viewer3dsetcameraposition(WinID, -5, 5, 5);
viewer3dsetcolor(WinID, Obj, ObjColor);
end;
```

Рис. 3. Скрипт окна визуализации

В *Список сигналов* следует добавить сигнал цвет и координаты положения объекта. Выполним пуск, результат которого представлен на рис. 4.

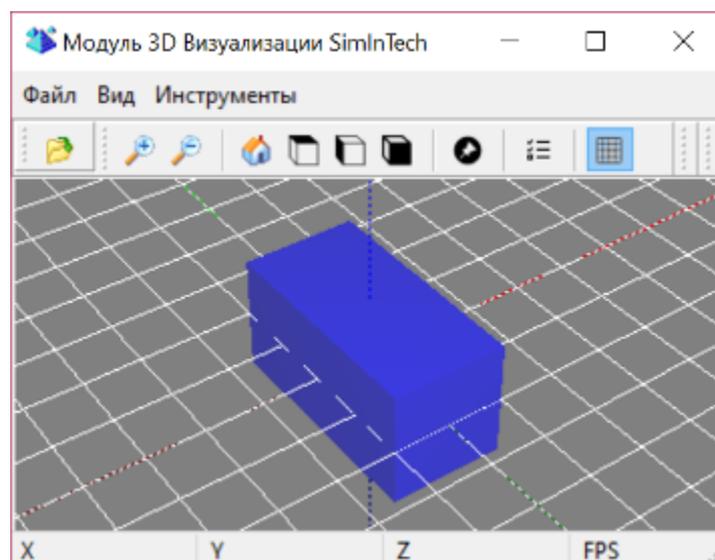


Рис. 4. Окно «Модуль 3D-Визуализации»

Заменяем брусок на 3D-объект, для этого в скрипте изменим функцию создания параллелепипеда на функцию создания объекта из файла *Viewer3dplotfromfile* указав путь к файлу с 3D-объектом.

Представленный пульт управления в виде кнопок, указывает направления движения автономного объекта, таким образом, обеспечивает простоту управления. Цифровой прототип помогает существенно сократить количество ошибок, повысить уровень информирования и обеспечить наиболее эффективную работу человека.

Библиографические ссылки

1. Звонарев Д. А. Управление мобильным роботом с электрическим двигателем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 2. С. 368–372.

2. Бартенев В. В., Яцун С. Ф., Аль-Еззи А. С. Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. Т. 13, № 4. С. 288–293.

3. Грищенко И. А., Чубарь А. В. Создание математической модели робота с дифференциальным приводом // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово : Западно-Сибирский научный центр, 2016. Т. 2. С. 35–37.

4. Мызникова В. А., Толстенков Е. Д., Чубарь А. В. Моделирование и диагностика системы управления движением автономного объекта в среде SIMINTECH // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика. 2020. № 1. С. 63–70.

© Мызникова В. А., Чубарь А. В., Солопко И. В., 2022

ДИАГНОСТИКА АВТОПИЛОТА ВОЗДУШНОГО СУДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯТОРА ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ

Н. С. Писарев, Е. С. Семенкин

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: nike0996@mail.ru

Автопилот воздушного судна является сложной системой, в которой могут возникать ошибки на многих этапах работы, в том числе и на этапе обработки входных сигналов. Для уменьшения вероятности возникновения такой ошибки в данной работе предлагается концепция устройства, которое сможет выявлять возможную неисправность на этапе предполетной подготовки.

Ключевые слова: воздушное судно, автопилот, диагностика, техническое обслуживание.

Автопилот самолета создан для стабилизации всех параметров полета и ведения по заданному курсу. При этом соблюдается установленная человеком-пилотом скорость и высота полета. Перед тем как переводить летательный аппарат на режим автопилота, необходимо вывести воздушное судно в состояние устойчивого полета без скольжения или завала машины. После стабилизации самолета по всем плоскостям можно производить включение системы автоматического управления, но при этом в дальнейшем необходимо проводить регулярный контроль показателей. Автопилот самолета ведет его по заданному маршруту, при этом используется комплексная информация навигационных приборов, собственных и наземных датчиков, которые проводят анализ полета. Данная система проводит управление всеми агрегатами летательного аппарата. Также работают траекторные системы, которые проводят заход на посадку с высокими показателями точности без каких-либо действий пилотов [1].

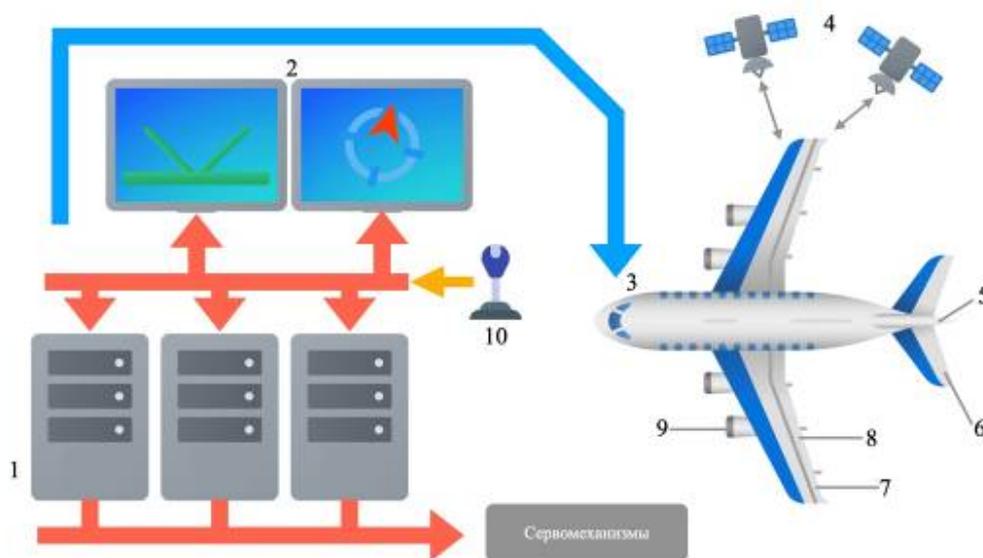


Рис. 1. Схема работы автопилота

На рис. 1 показана стандартная схема работы автопилота. Заранее рассчитанные параметры полета вводятся в компьютеры самолета (1). Дисплеи (2) показывают положение самолета, его предполагаемый маршрут и высоту. Изменение положения воздушного судна в пространстве фиксируется приборным оборудованием и сигналы от них поступают в системы автопилота.

На рисунке, в качестве примера, представлена глобальная система навигации (ГСН) (4). Приемник расположен на верхней части корпуса (3). Компьютеры следят за маршрутом и автоматически производят необходимые изменения посредством подачи сигналов на сервомеханизмы, которые управляют рулем направления (5), рулями высоты (6), элеронами (7), закрылками (8) и настройкой дросселей двигателей (9) При необходимости пилот может в любой момент отключить автопилот и перейти к ручному управлению (10).

Поскольку автопилот является комплексной системой, ошибки в работе могут возникать на разных этапах, в том числе на этапе обработки входных сигналов с датчиков приборного оборудования.

Так как приборное оборудование современной авиатехники по большей части цифровое, то разновидности входных и выходных сигналов могут быть записаны в памяти устройства, как эталонные и использоваться для проверки способности системы автопилота правильно обрабатывать эти сигналы.



Рис. 2. Блок-схема работы автопилота при подключении модулятора

Это устройство может модулировать цифровые сигналы, которые будут подаваться на автопилот при проверке.

На рис. 2 показана блок-схема работы автопилота при подключении модулятора. Во время полета автопилот связан с приборным оборудованием и различными датчиками, по показаниям которых, определяет дальнейшее воздействие на органы управления посредством работы сервомеханизмов. При подключении модулятора на этапе предполетной проверки система автопилота включена, однако входные сигналы поступают не от приборного оборудования, а от модулятора. Выходные сигналы автопилота поступают на тот же модулятор, после чего идет сравнение его с эталонным сигналом и выдается результат проверки [2].

В таблице описаны взаимодействия модулятора с автопилотом на примере имитации сигналов от приборного оборудования и курсовой системы.

Взаимодействия модулятора с автопилотом

Сигнал, исходящий из модулятора	Команда, исходящая от системы автопилота	Эталонный выходной сигнал автопилота	Результат
<ul style="list-style-type: none"> – Высота: 8000 – Скорость: 389 – Угол крена: 25 – Курсовой угол: 5 	<ul style="list-style-type: none"> – Отклонить элероны влево на 20 %. – Отклонить руль высоты вверх на 15 %. – Отклонить руль направления влево на 20 % 	<ul style="list-style-type: none"> – Отклонить элероны влево на 18 %. – Отклонить руль высоты вверх на 15 %. Отклонить руль направления влево на 21 % 	Расхождения со значениями по отклонению элеронов и руля направления – автопилот работает некорректно
<ul style="list-style-type: none"> – Высота: 8500 – Скорость: 295 – Угол крена: 10 – Курсовой угол: 10 	<ul style="list-style-type: none"> – Отклонить элероны вправо на 10 %. – Отклонить руль направления вправо на 10 % 	<ul style="list-style-type: none"> – Отклонить элероны вправо на 10 %. – Отклонить руль направления вправо на 10 % 	Расхождений нет – автопилот работает корректно

На рис. 3 представлена схема проверки корректности работы автопилота по обработке входных сигналов.

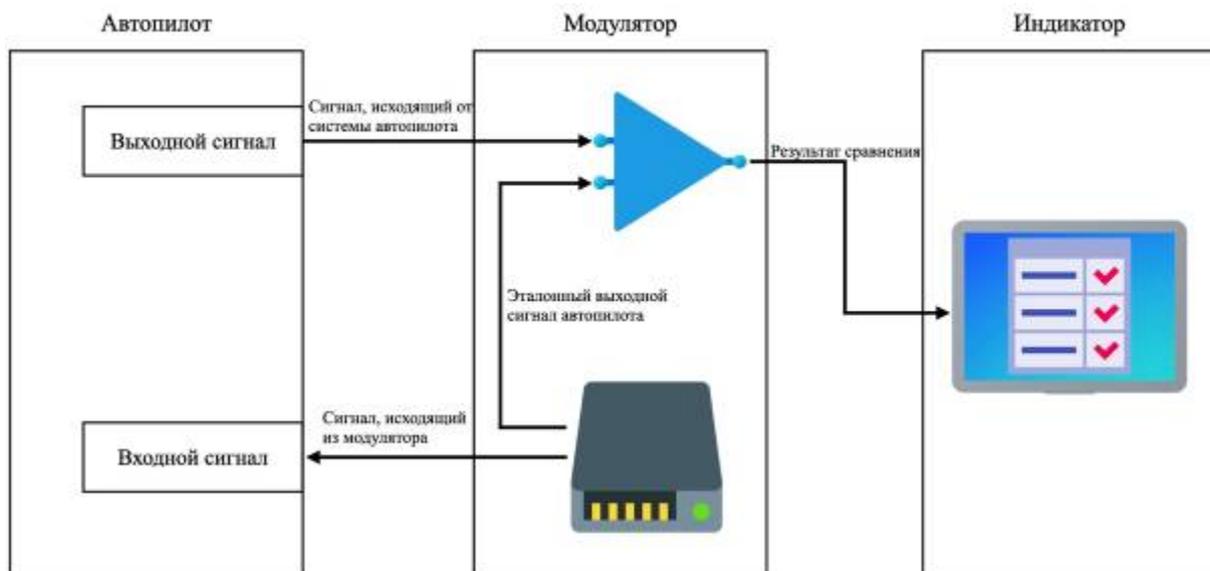


Рис. 3. Схема проверки корректности работы автопилота

При подключении модулятора автопилот автоматически переключается в режим проверки. При включении проверки прибора микроконтроллер подает сигнал на ПЗУ для передачи двух сигналов. Один сигнал поступает на прибор и представляет собой двоичный код, моделирующий внешнее воздействие. Второй сигнал поступает в цифровой компаратор и представляет собой образцовый сигнал, который должен выдаваться прибором при заданном внешнем воздействии. На цифровой компаратор поступает также сигнал, выдаваемый автопилотом, и далее происходит сравнение этих двух сигналов. Результат сравнения поступает на индикатор, где будет отображаться информация об исправности прибора

Реализация технической возможности подключения модулятора позволит на этапе предполетной проверки избежать наличия ошибок в работе автопилота во время совершения полета, что сделает полет более безопасным.

Описанная в работе концепция использования модулятора для диагностики работоспособности может быть применена в других системах на борту воздушного судна, например в системе ручного управления полетом. А при использовании бесконтактных датчиков – и при оперативном контроле состояния пилотов [3].

Библиографические ссылки

1. Мирошник И. В. Теория автоматического управления. М. : Питер, 2005.
2. Водовозов А. М. Микроконтроллеры для систем автоматики : учеб. пособие. Вологда : ВоГТУ, 2002. 123 с.
3. Akhmedova S., Stanovov V., Vishnevskaya S., Miyajima C., Kamiya Y. Automatically Generated Data Mining Tools for Complex System Operator's Condition Detection Using Non-Contact Vital Sensing // IEICE Trans. Commun., vol. e104–b, No. 6, pp. 571–579, 2021.

© Писарев Н. С., Семенкин Е. С., 2022

УДК 629.7.01:001.4:004.92

**ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ВИБРОИСПЫТАНИЙ КАМЕРЫ –
ДЕМОНСТРАТОРА ЖРД МАЛОЙ ТЯГИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

И. В. Дергач, И. А. Фесенко, А. А. Фоменко, Н. С. Шестов, Э. С. Манохина
Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: dergach.2021@inbox.ru

Рассматривается методика и результаты вибрационных испытаний камеры – демонстратора малой тяги.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, виброиспытания, вибростенд.

В настоящее время продолжается совершенствование конструктивных схем и технологии изготовления ракетных двигателей. В зарубежном и отечественном ракетном двигателестроении особое внимание уделяется разработке и внедрению аддитивных технологий – изготовлению деталей методами лазерного послойного сплавления металлического порошкового материала на 3D-принтерах. Данные технологии находятся в стадии экспериментальной отработки, поэтому проектно-конструкторскими организациями и промышленными предприятиями проводятся комплексные исследования и испытания изделий – демонстраторов, изготовленных методами 3D-печати.

Одним из видов таких испытаний являются виброиспытания узлов и агрегатов ракетных двигателей, поскольку при работе двигателя возможно возникновение вибрации, вызывающее механические повреждения и нарушение режима работы, которые могут стать причиной поломки или отказа системы. Соответственно, в ходе производства и разработки изделия их необходимо тестировать на воздействие вибрации. Проверка продукции на воздействие вибраций производится с помощью вибрационных установок. Подтверждение работоспособности на всех стадиях эксплуатации изделия добиваются проведением испытаний при имитировании внешних воздействий.

Существует различные типы испытаний изделий на виброустойчивость и вибропрочность, которые можно разделить на три типа [1]:

1) испытания, в которых на объект воздействуют сигналом, описываемым базовой математической моделью – синус, широкополосная случайная вибрация (ШСВ), классический удар;

2) испытания, в которых на объект воздействуют сигналом, описываемым совокупностью двух или трех базовых моделей – смешанные испытания, виброудар (имитация стрелковопушечного воздействия);

3) испытания, в которых на объект воздействуют сигналом, описываемым акселерограммой (испытания с воспроизведением заданной акселерограммы).

Виброустойчивостью называется способность двигателя, его систем и аппаратуры сохранять работоспособность в условиях воздействия вибрации. Виброустойчивость определяет степень чувствительности испытуемого объекта к динамическим нагрузкам. Она характеризуется амплитудой ускорений и частотой вибрации, при которых не нарушается нормальное функционирование испытуемого объекта.

Вибропрочность – это свойство узлов, аппаратуры и летательного аппарата (ЛА) в целом противостоять разрушающему действию вибрации в заданных диапазонах частот и оставаться работоспособными после воздействия вибрационных нагрузок. Она характеризуется максимальными амплитудами ускорений, собственными частотами колебаний испытуемой конструкции, демпфирующими свойствами материала конструкции и продолжительностью действия вибрационной нагрузки.

Испытания крупногабаритных конструкций большой массы проводят с использованием электрогидравлических вибростендов, а для испытаний элементов меньшей массы используются менее мощные вибростенды на базе электродинамических вибраторов [2].

Данные стенды подходят для моделирования воздействия вибрации на различные образцы: космические аппараты (КА), приборы аэрокосмической промышленности, автомобили, стальные конструкции, механические и электрические изделия – в реальных условиях эксплуатации.

Электродинамический вибростенд (рис. 1) состоит:

- из стенда, на который крепят объект и датчики – акселерометры;
- усилителя, основная задача которого подвести необходимую мощность к стенду;
- системы управления вибрацией (СУВ), основная задача которой следить за тем, чтобы сигнал, получаемый с акселерометра, соответствовал заданию пользователя, и корректировать сигнал, подаваемый на усилитель.
- компьютера, с помощью которого пользователь устанавливает задания и который управляет ходом испытания, отображает результаты испытания – графики измерений, погрешности и т. д.

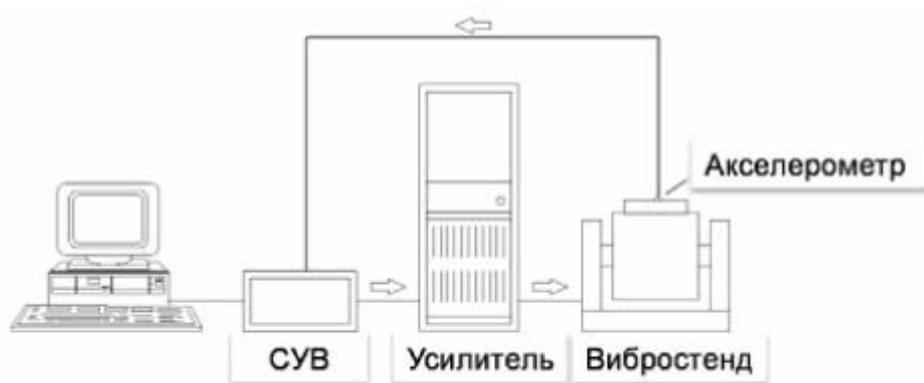


Рис. 1. Общая схема вибрационной электродинамической установки

В данной работе рассматривается методика виброиспытаний камеры – демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленной из модельного материала Силумин – РС300. На 3D-принтере путем лазерного аддитивного сплавления (SLM-технология). Испытаниям подвергался корпус камеры (нижняя часть без смесительной головки)

Испытания были проведены на вибростенде СУВ – ВС-207, так как данная система реализуют все существующие типы испытаний [3]. Поскольку стенд может создавать вибрацию только в одном направлении, то камеру демонстратор закрепляли в двух положениях: вертикальном (рис. 2) и горизонтальном (рис. 3).

Для проведения испытаний были разработаны два режима (одинаковые для обоих положений камеры):

1. Начальные испытания на обнаружение резонансных частот в соответствии с требованиями ГОСТ 30630.1.1-99 [4] по методу 100-1 с диапазоном частот 20–2000 Гц, с постоянной амплитудой ускорения 0,5g и скоростью качения частоты не более 2 октав/мин (всего 4–5 минут).

2. Испытания на синусоидальную вибрацию (режим Б) в соответствии с требованиями ОСТ 92-0266-73 [5].



Рис. 2. Вертикальное положение камеры на стенде



Рис. 3. Горизонтальное положение камеры на стенде

Параметры режимов испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры режимов испытаний

Частота (Гц)	Амплитуда виброиспытаний (g)
Первый режим	
20–2000	0,5
Второй режим	
5–10	1-2
10–20	2-2,5
20–40	2,5-3
40–80	3-5
80–160	5-9
160–320	9-15
320–640	15
640–1280	15
1280–2000	15

В результате были получены графики зависимости ускорения от частоты для вертикального положения камеры при выполнении первого режима испытания (рис. 4) и второго (рис. 5), и соответственно горизонтального (рис. 6) и (рис. 7). Испытание камеры в горизонтальном положении на втором режиме не завершено до конца из-за амплитуд колебаний, превышавших допускаемые значения. Полученные критические частоты приведены в табл. 2.

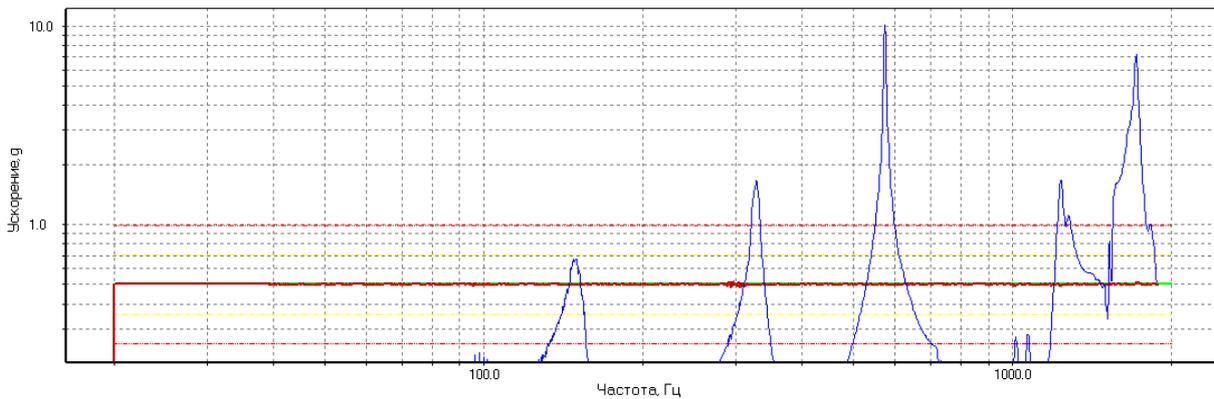


Рис. 4. График выполнения 1 режима испытания (вертикальное положение): ускорение от частоты

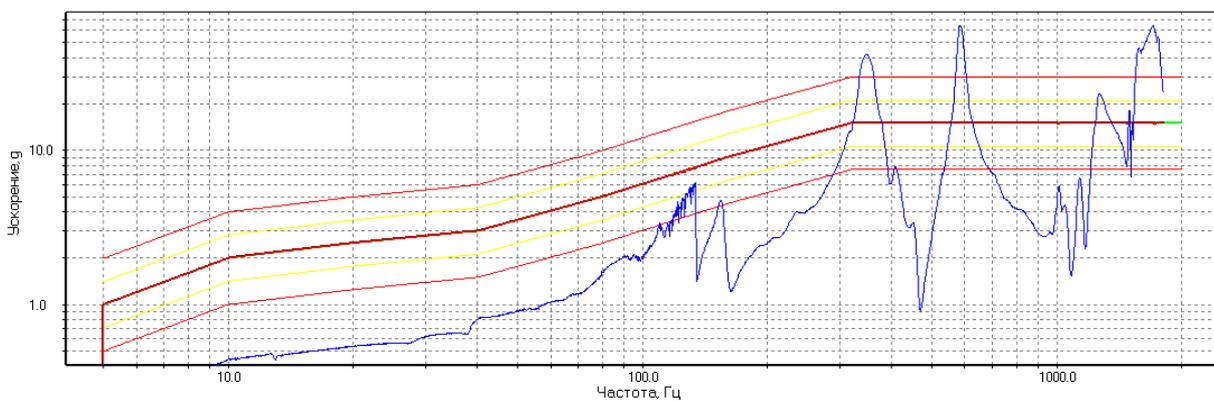


Рис. 5. График выполнения 2 режима испытания (вертикальное положение): ускорение от частоты

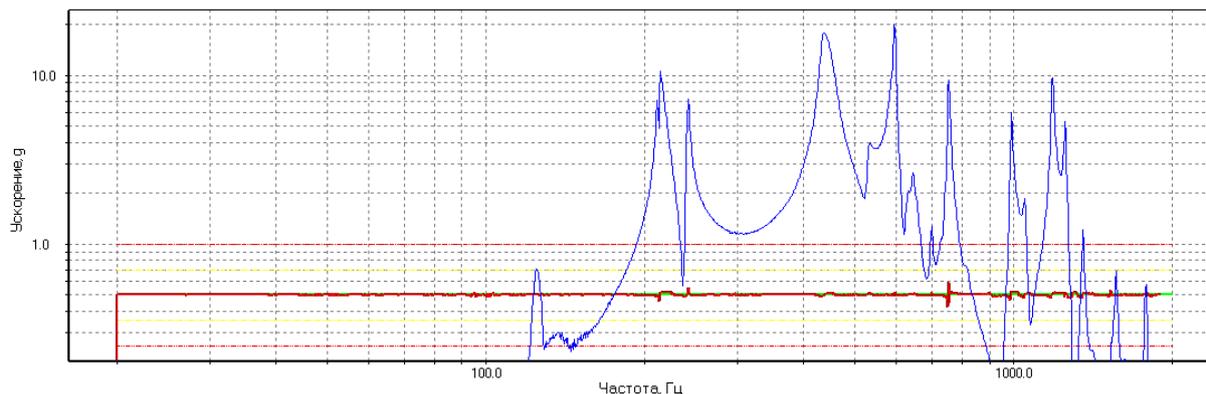


Рис. 6. График выполнения 1 режима испытания (горизонтальное положение): ускорение от частоты

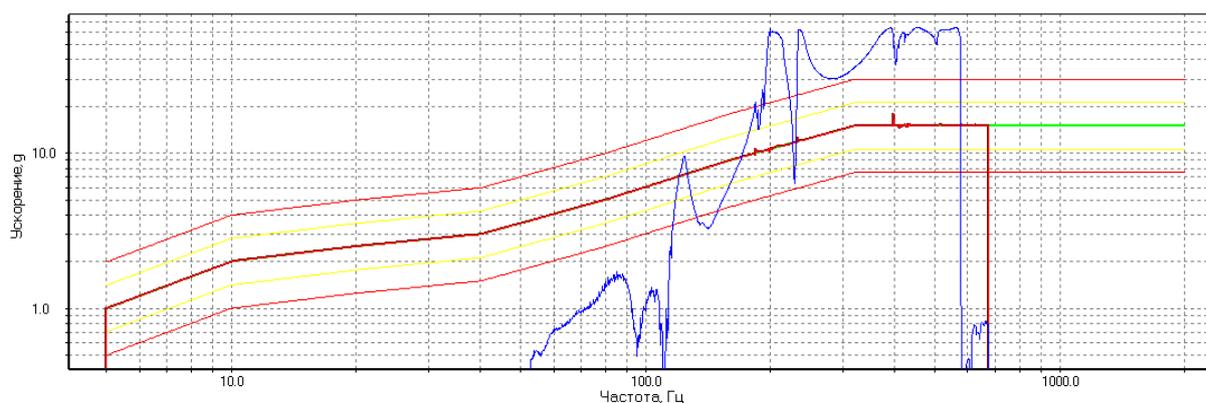


Рис. 7. График выполнения 2 режима испытания (горизонтальное положение): ускорение от частоты

Таблица 2

Критические частоты

Режим испытания	Положение камеры	Частоты (Гц)
Первый режим	Вертикального положение	149; 328; 574; 1015; 1070; 1237; 1713
	Горизонтальное положение	133; 154; 345; 585; 1010; 1133; 1264; 1704
Второй режим	Вертикального положение	125; 214; 242; 436; 594; 643; 697; 751; 988; 1181; 1250; 1349; 1561; 1779
	Горизонтальное положение	103; 123; 202; 235; 416; 618

В результате испытаний установлено, что корпус камеры – демонстратора, изготовленный методом аддитивной технологии из модельного материала Силумин – РС300 выдержал вибрационные испытания. Разрушения изделия не произошло. При внешнем осмотре камеры дефектов и нарушений сплошности поверхностей изделия не обнаружено.

Библиографические ссылки

1. Бакулин Я. Ю., Журавлев В. Ю. Виброиспытания изделий ракетно-космической техники // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения генер. конструктора ракет-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (11–14 ноября 2014, г. Красноярск) : в 3 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 123–124.

2. Особенности проверки изделий ракетно-космической техники на вибропрочность / М. А. Зайцев, Д. В. Остапенко, Д. С. Швецова, Т. А. Королева, В. Ю. Журавлев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 1, № 14. С. 189–191.

3. Система управления виброиспытаниями ВС-207 : руководство по эксплуатации. ВАПМ.466961.002 РЭ. Смоленск, 2016.

4. ГОСТ 30630.1.1–99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. М. : Изд-во стандартов, 2000. 27 с.

5. ОСТ 92-0266–73. Агрегаты и узлы пневмогидравлических систем (ПГС). Общие технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1973. 57 с.

© Дергач И. В., Фесенко И. А., Фоменко А. А.,
Шестов Н. С., Манохина Э. С., 2022

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ ЖРД МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

К. О. Зенюк, М. Л. Шелудько, Д. А. Колодин, В. И. Шорников, В. А. Финк
Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: sheludkomax@yandex.ru

Расчет и анализ газогенератора ЖРД является важным этапом при проектировании и разработке современных образцов двигателей. При помощи метода конечных элементов программного пакета SOLID WORKS, были построены модели существующих газогенераторов и проведены различные испытания на устойчивость. В результате работы было определено распределение основных динамических параметров, получены числовые характеристики запаса устойчивости.

Ключевые слова: газогенератор, метод конечных элементов, Solid Works, ЖРД.

Газогенератор – это энергетическое устройство, необходимое для выработки сжатого газа с возможностью регулирования его количества, расхода, а также давления. Полученная энергия используется для привода насосов, обеспечивающих поступление компонентов ракетного топлива в камеру сгорания.

Кроме того, газогенераторы могут использоваться как аккумуляторы давления при вытеснительной подаче топлива (ПАД или ЖАД), для наддува баков и привода вспомогательных систем. Газогенераторы могут работать на жидком и твердом топливе. Газогенераторы на твердом топливе (ПАД) применяют обычно для запуска ТНА или как аккумуляторы давления при вытеснительной подаче. Для привода ТНА применяют главным образом газогенераторы на жидком топливе.

Отличие газогенератора от пиропатронов или пироэнергодатчиков заключается в том, что газогенератор имеет сопло со сверхкритическим перепадом давления. В следствии этого процесс горения в газогенераторе не зависит от условий в объеме, в то место, куда протекает газ. Конструкция газогенератора имеет много схожих черт с обычным жидкостным ракетным двигателем.

Газогенератор имеет в своей конструкции форсуночную головку с передним, средним и огневыми днищами, камеру сгорания с внутренней оболочкой, оборудованной продольными каналами охлаждения, а также коллектор с патрубками подвода избыточного компонента.

Подытожив можно сказать, что газогенератор – это неотъемлемый агрегат ЖРД в котором в результате экзотермических химических реакций преобразуется в генераторный газ. Температура генераторного газа для привода турбины выбирается в основном в диапазоне 700–1200 К, в зависимости от типа газа. В случае с восстановительным газом температура может достигать до 1200 К, когда температура окислительного газа выбирается до 700 К. Данный диапазон обусловлен тем, что, если температура генераторного газа будет слишком высокая, возможно повреждение рабочих лопаток турбины [4].

Основными требованиями, предъявляемыми к газогенераторам, являются высокая стабильность работы, простота управления рабочим процессом, а также высокая работоспособность генераторного газа. Кроме этого, если применительно к газогенерато-

рам, используемым для система наддува, а также используемым в турбонасосных агрегатах жидкостных ракетных двигателей без дожигания, массогабаритные характеристики не играют особо важной роли, то для газогенераторов схем двигателей с дожиганием одной из проблем проектирования является также задача по снижению массы и габаритов агрегата.

Основными областями применения газогенераторов и генераторных газов являются:

1. Привод турбины основного и бустерного турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя посредством раскручивания лопаток турбины за счет генераторного газа.
2. Привод турбины бортовой энергоустановки или бортового источника питания.
3. Наддув баков с компонентами ракетного топлива жидкостного ракетного двигателя.
4. Привод сопел реактивной системы управления космическим летательным аппаратом.
5. Использование газогенераторов в составе ЖРД малой тяги (ЖРДМТ).

Перечень рассматриваемых вопросов широк. В случае отказа газогенератора гарантированно отказывается вся ЖРДУ. Вследствие этого все вопросы и проблемы, сопряженные с получением генераторного газа – выбор компонентов ракетного топлива, конструктивных схем и параметров ГГ, а также организация работоспособного состояния агрегата несомненно актуальны и являются одной из первостепенных задач, стоящих перед конструкторами и инженерами.

Большая часть существующих на сегодняшний день методик расчета запаса устойчивости газогенератора носит критериально-эмпирический характер и основана на обработке экспериментальных результатов, что не всегда обеспечивает требуемую точность расчета динамических и тепловых характеристик. Необходимость экспериментально-теоретического уточнения расчетных методик запаса устойчивости газогенератора двигателей летательных аппаратов является актуальной задачей, которая позволит существенно снизить материальные и временные затраты на эскизное проектирование, испытания и доводку современных образцов двигателей и энергосиловых установок летательных аппаратов.

Под устойчивостью понимают способность сохранять значения параметров в пределах заданных отклонений. Под неустойчивостью понимают способность систем при действии весьма малых возмущений получать большие перемещения. Минимальное значение силы, при котором система впервые не возвращается к исходному состоянию, называется бифуркационным. При этом значении нагрузки происходит нарушение единственности решения задачи, так как наряду с исходной прямолинейной формой равновесия стержня существует отклонённая форма. Другим, более общим, определением устойчивости состояния равновесия является определение Лагранжа: исходное состояние равновесия упругой системы устойчиво, если после отклонения её от этого состояния она, предоставленная самой себе, стремится вернуться к нему, совершая малые колебания, затухающие со временем при наличии сил внешнего и внутреннего сопротивления [5]. Если система испытывает пластические деформации, то при любом малом возмущении он изгибается и затем при снятии возмущения не возвращается в своё исходное состояние. Частное определение устойчивости сжатой системы за пределом упругости: состояние равновесия упругопластической системы является устойчивым, если она после статического приложения и последующего снятия малой возмущающей силы стремится вернуться в своё исходное состояние, пребывая в его малой окрестности.

Давление в газогенераторе определяется следующей формулой:

$$p_{\text{ГГ}} = \dot{m}_{\text{Т}} \cdot \varphi_{\text{ГГ}} \cdot \beta_{\text{ГГ}} / F_{\text{кр.Т}},$$

где $\dot{m}_{\text{Т}}$ – массовый расход компонентов топлива; $\varphi_{\text{ГГ}} = \frac{T_{12}^* - T_0}{T_1 - T_0}$ – коэффициент, характеризующий потери в сопле; $\beta_{\text{ГГ}}$ – расходный комплекс; $F_{\text{кр.Т}}$ – площадь критического сечения в газогенераторе.

В ходе расчетов, для их точности, будет учтен каждый из параметров, входящий в данную формулу [3].

Для оценки устойчивости, использовалось программное обеспечение *SOLIDWORKS* с добавлением пакета *Simulation*. Построение модели течения, обеспечивает пакет *Flow Simulation*. Объектом исследования были выбраны газогенераторы от ЖРД. Созданы 3D-модели газогенераторов (рис. 1 и 2) по алгоритмам трехмерного твердотельного моделирования и проведены исследования на устойчивость и смоделировано течение рабочего тела в газогенераторе.

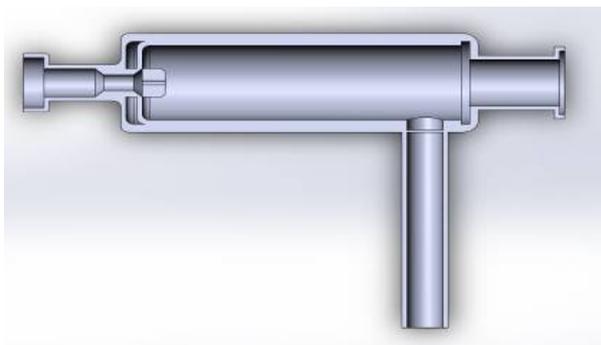


Рис. 1. Геометрическая модель газогенератора

Рис. 2. Геометрическая модель газогенератора

С добавлением пакета *Simulation*, проведены исследования на потерю устойчивости и запаса прочности. В качестве материала была использована сталь 12X18H10T. Для оценки запаса устойчивости выбрано среднее рабочее давление газогенератора, равное 11 Мпа, и температура в 900 К.

Исследование на потерю устойчивости. Анализ проводился по 3 формам потери устойчивости и показал, что потеря устойчивости при заданных параметрах в данной модели не прогнозируется [1].

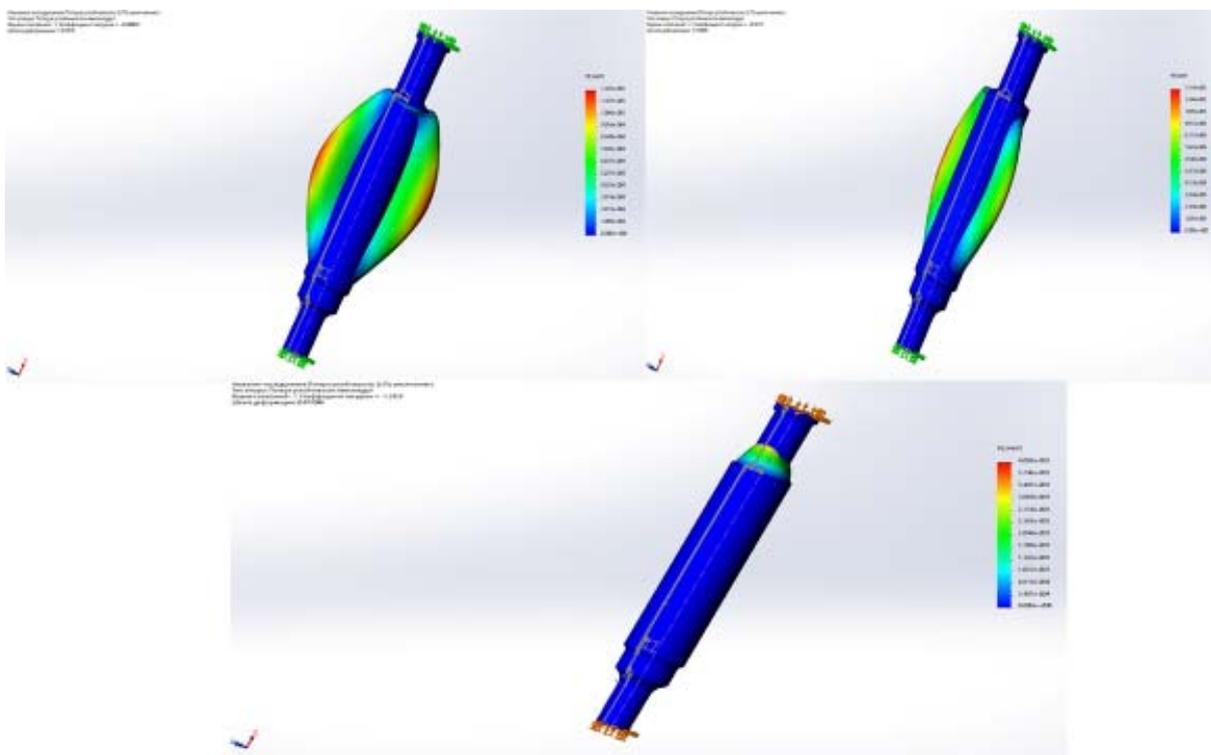


Рис. 3. Исследование на потерю устойчивости

Из исследования были определены коэффициенты нагрузки для трех форм колебаний равные: $-0,9$; $-0,92$; $-1,2$. Данные коэффициенты говорят о том, что потеря устойчивости не прогнозируется.

Оценка запаса прочности. Исследование показало, что коэффициент запаса прочности равен $1,8$, следовательно, конструкция выдерживает заданные нагрузки.

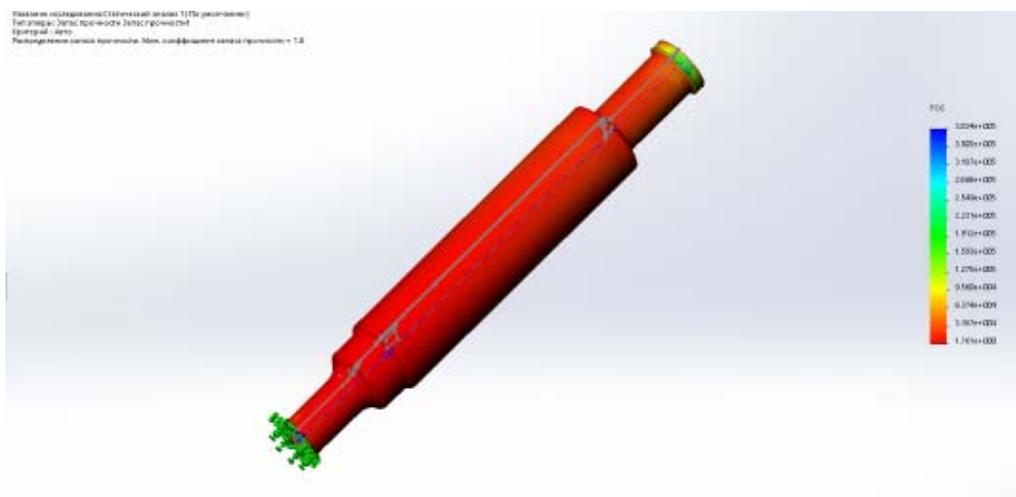


Рис. 4. Оценка запаса прочности

При помощи пакета *Flow Simulation* смоделировано течение рабочего тела в газогенераторе [2].

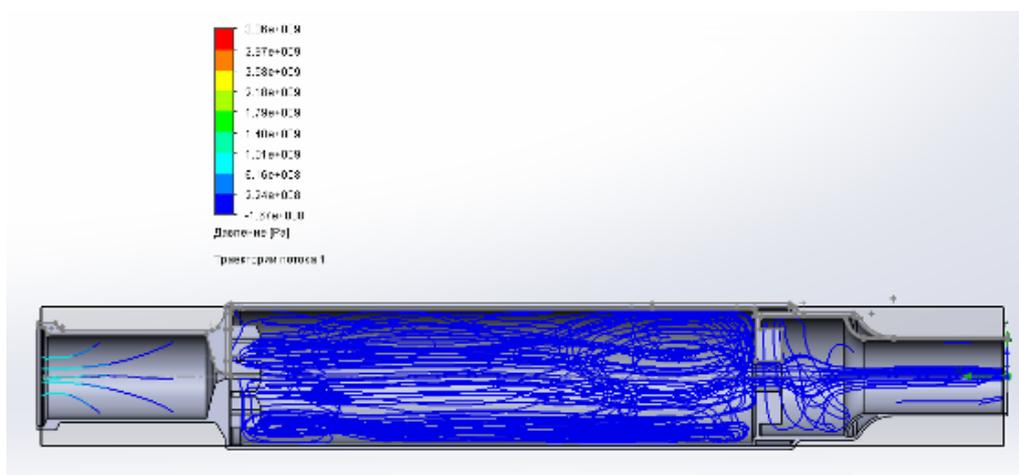


Рис. 5. Траектория потока рабочего тела в газогенераторе

Методика, представленная в данной работе дает полную оценку изделию. Визуализированные градиенты распределения давлений, температур, получены коэффициенты потери устойчивости и запаса прочности, отображена траектория потока течения рабочего тела. Данные, полученные в исследовании помогают в полной мере оценить работу изделия на этапах разработки без использования стендовых испытаний.

Библиографические ссылки

1. Бабкина Л. А., Сорокин Д. В. Численное моделирование в пакете SolidWorks Simulation : лаб. практикум / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. 74 с.

2. Бабкина Л. А., Сорокин Д. В. Моделирование течения жидкости и газа в пакете SolidWorks Flow Simulation : лаб. практикум / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. 72 с.

3. Бирюков В. И., Назаров В. П., Царапкин Р. А. Экспериментальная и аналитическая оценка устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей // Решетневские чтения. 2017. №. 21-1. С. 197–199.

4. Газогенератор жидкостного ракетного двигателя / Е. А. Гриценко и др. 2003.

5. Егоров А. В. Устойчивость цилиндрических оболочек в жесткой среде // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 9 (69). С. 3.

© Зенюк К. О., Шелудько М. Л., Колодин Д. А.,
Шорников В. И., Финк В. А., 2021

ВЫБОР ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ УЧЕБНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КАМЕРЫ ЖРД МАЛОЙ ТЯГИ

М. А. Шикарев, Э. С. Манохина, В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: 89134467140@bk.ru

Разработка Жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) невозможна без проведения комплекса испытаний разного уровня. В статье рассматриваются варианты технического оснащения стенда для автономных испытаний камеры ЖРД малой тяги, работающего на несамовоспламеняющихся компонентах топлива.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель малой тяги, стендовые испытания.

Жидкостные ракетные двигатели малой тяги (ЖРДМТ) применяются для коррекции орбиты, ориентации и стабилизации в пространстве космических аппаратов различных типов.

Назначение ЖРДМТ и условия их эксплуатации предъявляют к ним целый ряд специфических требований, в частности, следующие:

- многорежимность, обусловленная работой в непрерывном (длительность до $\tau_b > 10^3$ с) и в различных импульсных режимах с минимальным временем включения 0,03 с и менее и с различными паузами от 0,03 с до нескольких суток;
- большой ресурс по суммарному времени работы – до 50 000 с и более;
- большой ресурс по суммарному количеству включений – до 10^6 ;
- возможность любого сочетания времен включений и пауз (в большинстве случаев оговаривается);
- срок активного существования до 15–20 лет [1].

К современным ЖРДМТ, как и к другим изделиям ракетно-космической техники, применяются высокие требования надёжности и экономичности. Достоверное заключение о надёжности разрабатываемого изделия можно сделать только на основе испытаний опытных образцов. Поэтому при проектировании ЖРДМТ проводят комплекс испытаний отдельных систем, узлов, агрегатов и ЖРДМТ в целом.

Программа, состав, последовательность проведения, объём испытаний ЖРДМТ устанавливаются в соответствии с комплексной программой экспериментальной отработки двигателя таким образом, чтобы обеспечить заданные характеристики, надёжность, определённую стоимость разрабатываемого ЖРДМТ. Испытания стараются проводить в максимально возможно короткие сроки и с минимальными затратами средств.

По наличию при испытаниях процесса горения испытания ЖРДМТ или их отдельных узлов агрегатов можно разделить на огневые и холодные. Огневые испытания проходят с наличием процессов горения или разложения.

При наземных испытаниях ЖРДМТ испытывается в непрерывных и пульсационных режимах для оценки работоспособности двигателя, надёжности элементов конструкции

К особенностям измерения параметров ЖРДМТ можно отнести:

- малый объём камеры сгорания;

- специфичную организацию процесса смесеобразования;
- нестационарность режимов работы;
- отсутствие регенеративного охлаждения.

К основным параметрам ЖРДМТ, измеряемым при испытаниях относятся: тяга двигателя, расходы компонентов топлива, давление в камере сгорания, магистралях, температуры компонентов топлива, стенок конструкции, время работы двигателя.

Диапазоны измеряемых параметров в процессе огневых испытаний ЖРДМТ указаны в таблице.

Измеряемые и регистрируемые параметры в процессе огневых испытаний ЖРДМТ

Наименование параметра, его размерность	Диапазон измерений	Погрешность измерений, %	Частота измерений, 1/с
Тяга двигателя, Н	0,1–1600	± 1	10–200
		± 3	≥ 1000
Давление в камере сгорания, МПа	0,1–2,5	± 0,4	1–10
		± 2	1000
Массовый секундный расход компонентов топлива, г/с	0,1–400	± (0,5–2,5)	1–500
Температура компонентов топлива на входе в двигатель, °С	–50...+50	± 2	1–10
Температура конструкции ЖРДМТ, °С	–50 + 1200	± (1...2)	1–10
Время, с	0,01–1	± 1	1000
	≥(1–150)	± 1	1–10

Понижение противодавления на выходе из сопла, обеспечивающее безотрывное истечение газа, можно получить тремя способами, применяя на стенде: барокамеры с откачивающими средствами, эжекторные установки и сверхзвуковые выхлопные диффузоры.

При испытаниях ЖРДМТ характерны измерения малых по абсолютному значению тяг и малых секундных расходов топлива и быстроизменяющихся параметров в импульсном режиме работы. Средства измерения этих параметров должны обеспечивать надежную регистрацию параметров работы двигателя, как на непрерывных, так и на импульсных режимах.

Существует два метода измерения тяги ЖРДМТ – реактивный и активный. Реактивный метод заключается в измерениях силы реакции, которую оказывают узлы крепления двигателя, расположенные на испытательном станке, препятствуя его перемещению при работе в направлении действия тяги. Активный метод заключается в измерении импульса силы, создаваемого в единицу времени продуктами сгорания (ПС), истекающими из сопла.

Для разрабатываемого стенда выберем реактивный метод измерения тяги. При таком методе измерения применяется устройство в виде консольно закрепленной на массивной опоре упругой балки, на которую монтируется ЖРДМТ обычно в вертикальном положении, соплом вниз. При истечении ПС из сопла камеры ЖРДМТ балка прогибается и по значению упругой деформации определяется тяга двигателя. Возникающие в балке напряжения регистрируются парой тензопреобразователей, наклеенных для увеличения выходного электрического сигнала на противоположные верхнюю и нижнюю стороны балки. Для гашения колебания упругой системы, появляющиеся в момент начала и окончания работы ЖРДМТ применяется гидравлический демпфер.

При использовании данного тягоизмерительного устройства необходимо проводить измерения тяги на непрерывных режимах работы ЖРДМТ. Тогда достигается достаточно высокая точность измерений (до ±1,0 %). На режиме с малой продолжительности импульса точность измерений существенно снижается [2].

Схема приспособления для измерения тяги ЖРДМТ в ходе огневых испытаний представлена на рис. 1.

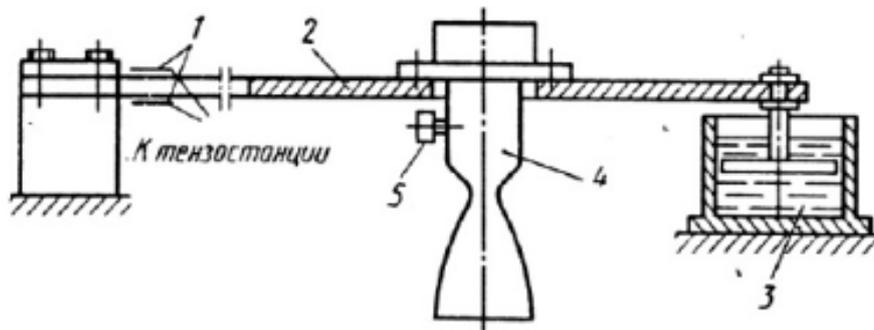


Рис. 1. Схема измерения тяги ЖРДМТ реактивным методом:
1 – тензопреобразователь; 2 – упругая балка; 3 – гидравлический демпфер;
4 – ЖРДМТ; 5 – датчик измерения давления в КС

Расходы компонентов топлива измеряют в ходе испытаний главным образом для получения оценки энергетической эффективности двигателя.

Особенностями измерения расходов при испытаниях ЖРДМТ являются малые значения расходов, их значительное изменение в течение переходного процесса и пульсация, вызываемая волновыми явлениями в трубопроводах.

Как при непрерывных, так и при импульсивных режимах испытаний ЖРДМТ процесс измерения расхода заключается в определении объемного расхода компонентов топлива за время работы двигателя и пересчёте его на массовый расход.

Для замера расхода компонента обычно используются объёмные расходомеры-уровнемеры, конструктивно выполняемые в виде расходомерной трубки устанавливаемой на магистраль. Уровень компонента в расходомерной трубке может фиксироваться с помощью ультразвукового датчика, датчика перепада давления или магнитострикционного датчика. Также возможны варианты использования расходомеров измеряющих перепад давления на сужающемся устройстве и турбинных расходомеров.

Давление в КС, топливных и пневматических магистралях на непрерывных режимах работы могут замеряться с помощью датчиков разного типа: потенциометрических, индуктивных, тензодатчиков.

На импульсивных режимах работы при измерении быстропеременных давлений зачастую используют датчики с первичными преобразователями индуктивного типа. При заданных параметрах переменного напряжения питания ток в цепи рабочей катушки оказывается пропорциональным прогибу мембраны. Сигнал с первичного преобразователя давления поступает на усилитель-преобразователь и после него – на обработку электронно-вычислительной машине.

Сложность определения давлений в импульсных режимах работы ЖРДМТ состоит в том, что при этом возможны динамические искажения, вносимые измерительным каналом, который предусматривается в связи с невозможностью устанавливать существующие первичные преобразователи давления непосредственно на камеру из-за небольших размеров камер сгорания ЖРДМТ и высоких температуры газов. Наличие трубопровода приводит к различию между реальными и измеренными значениями давления [2].

При разработке системы измерения давления необходимо оптимизировать значение площади сечения трубопровода, обеспечивающей допустимые изменения процесса в КС и не допускающей слишком большие динамические погрешности.

Для измерения температур компонентов топлива и элементов конструкции ЖРДМТ используются современные платиновые и медные термосопротивления, хромель-копелевые, хромель-алюмелевые и вольфрам-рениевые термопары [3].

Для измерения температуры наружной поверхности камеры ЖРДМТ применяется бесконтактный метод с использованием инфракрасной тепловизионной системы.

Поскольку разрабатываемый ЖРДМТ работает на несамовоспламеняющихся компонентах топлива, то в конструкции необходимо предусмотреть устройство воспламенения. В этих целях возможно использование автомобильной свечи с удалённым боковым электродом и удлиненным центральным.

При использовании свечи зажигания запуск двигателя при испытаниях можно осуществить по следующей схеме: при поступлении команды на запуск происходит открытие управляющих топливных клапанов и подача напряжения на свечу зажигания; далее кислород проходит область электрического разряда, в результате чего генерируется плазма, выбрасываемая в камеру; при контакте плазмы с горючей смесью происходит воспламенение компонентов [4].

Управление работой ЖРДМТ, регистрация и обработка его параметров осуществляются с помощью автоматизированной системы управления и информационного обеспечения испытаний. Автоматизированная система включает в себя компьютер с адаптерами для формирования сигналов управления и сбора информации с измерительных устройств, а также транзисторные ключи, которые обеспечивают необходимые токи и напряжения для включения клапанов при получении сигналов от компьютера. Управление осуществляется по заданной циклограмме испытаний, а вся информация, получаемая в ходе испытаний, предоставляется в требуемой форме и заносится в базу данных.

На рис. 2 представлена примерная циклограмма испытания ЖРДМТ по ГОСТ 22396–77.

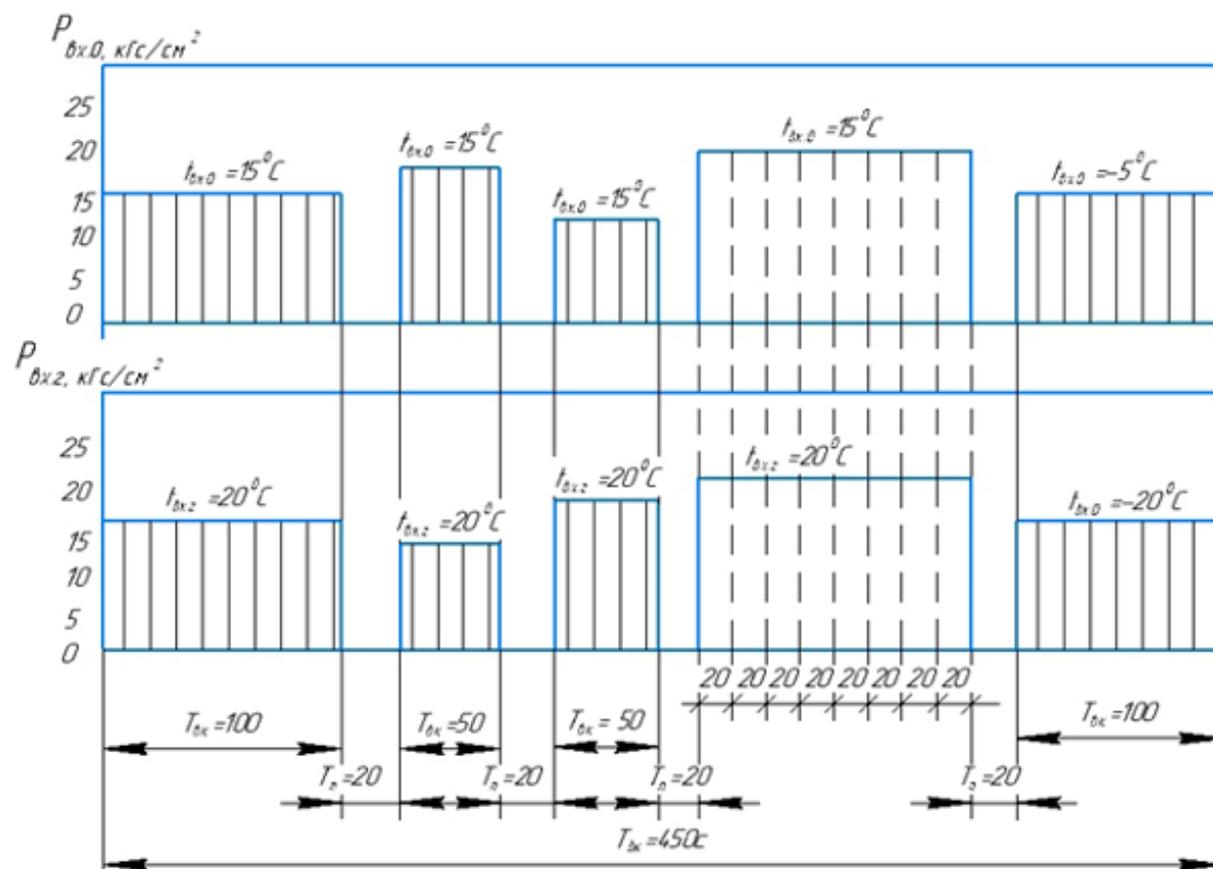


Рис. 2. Циклограмма испытания ЖРДМТ

Весь стендовый комплекс формируется на основе совокупности взаимосвязанных систем по функциональному признаку. К основным системам стенда относятся:

1. Системы подачи компонентов
2. Система запала компонентов
3. Система аварийного отключения подачи компонентов
4. Система измерения параметров
5. Система регистрации параметров
6. Система электроснабжения стенда
7. Система пространственно-габаритного размещения
8. Система продувки стенда
9. Система пожаротушения.

Обоснованный выбор принципиальной схемы учебно-демонстрационного стенда для автономных испытаний ЖРДМТ позволяет эффективно и с минимальными затратами средств провести необходимый комплекс испытаний, вследствие чего дать оценку надежности разрабатываемого двигателя и сделать вывод о соответствии запланированных параметров с действительными.

Библиографические ссылки

1. Особенности испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги / В. П. Назаров, В. Ю. Пиунов, В. Г. Яцуненко, Д. А. Савчин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 339–354. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-339-354.

2. Егорычев В. С., Сулинов А. В. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги и их характеристики : учеб. пособие. 2014. 128 с.: ил.

3. Автоматизированный термовакуумный огневой стенд для испытаний и исследований рабочего процесса ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива [Электронный ресурс] / Р. Н. Гальперин, Ю. С. Ивашин, В. Е. Нигодюк, В. В. Рыжков, А. В. Сулинов // Вестник СГАУ. 2014. № 5-2 (47). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannyy-termovakuumnyy-ognevoy-stend-dlya-ispytan-iy-i-issledovaniy-raboche-go-protssessa-zhrdmt-na> (дата обращения: 16.02.2022).

4. Салич В. Л. Экспериментальные исследования по созданию ракетного двигателя малой тяги на топливе «газообразный кислород + керосин» // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 129–140. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-129-140.

© Шикарев М. А., Манохина Э. С., Журавлев В. Ю., 2022

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ, ВЫПОЛНЕННОГО МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

В. П. Назаров, А. А. Зуев, М. И. Толстопяттов

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: nazarov@mail.sibsau.ru

Рассматриваются результаты контрольного обмера экспериментального образца камеры ракетного двигателя, изготовленного по технологии 3D-печати из модельного материала.

Ключевые слова: ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, контроль размеров.

Развитие и совершенствование ракетно-космической техники в значительной степени обусловлено применением производственных технологий, обеспечивающих изготовление изделий с высокими характеристиками надежности и энергетической эффективности при одновременном снижении показателей материалоемкости и уменьшения длительности производственного цикла. К таким прогрессивным технологиям следует отнести аддитивные технологии, физическая сущность которых заключается в получении деталей методом послойного наращивания материала на основе компьютерной 3D-модели изделия в камере специального 3D-принтера, оснащенного лазерным устройством [1–3].

Применение аддитивных технологий в ракетном двигателестроении требует проведения большого объема научно-исследовательских и экспериментальных работ для подтверждения соответствия нормативным критериям и правилам, установленным в отрасли, а также обязательной сертификации на государственном уровне [4; 5].

В соответствии с программой приоритетных научно-исследовательских работ СибГУ кафедрой ДЛА совместно с индустриальным партнером ООО «Полихром» проводится комплекс экспериментальных работ по апробации и отработке режимов 3D-печати образца камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги из модельного материала Силумина РС-300. Выбор данного материала объясняется его пластичностью, низкой температурой плавления и невысокой стоимостью.

Изготовленные экземпляры камеры-демонстратора подвергались различным видам исследований и испытаний в лабораторных и производственных условиях. В данной статье рассматриваются результаты контроля геометрических размеров первого экспериментального образца корпуса камеры (без смесительной головки).

3D-печать изделия производилась в соответствии с геометрической формой и размерами компьютерной 3D-модели, разработанной В. Д. Нестеровым и С. П. Перфильевым (рис. 1). Изготовление камеры осуществлялось методом SLM-печати из металлического порошка алюминиево-кремниевого сплава силумин РС-300 на 3D-принтере «Астра 420» собственной разработки ООО «Полихром».

Особенности принтера «Астра 420» стала реализация инновационных решений и динамической модуляции лазерного пятна с возможностью корректировки мощности лазера, что позволяет достичь высоких скоростей построения деталей.

3D-принтер обеспечивает возможность печати 3D CAD-моделей методом послойного селективного лазерного сплавления из порошков цветных металлов, всех видов сталей, никелевых сплавов, кобальт-хромовых, тана, Инконеля 718.

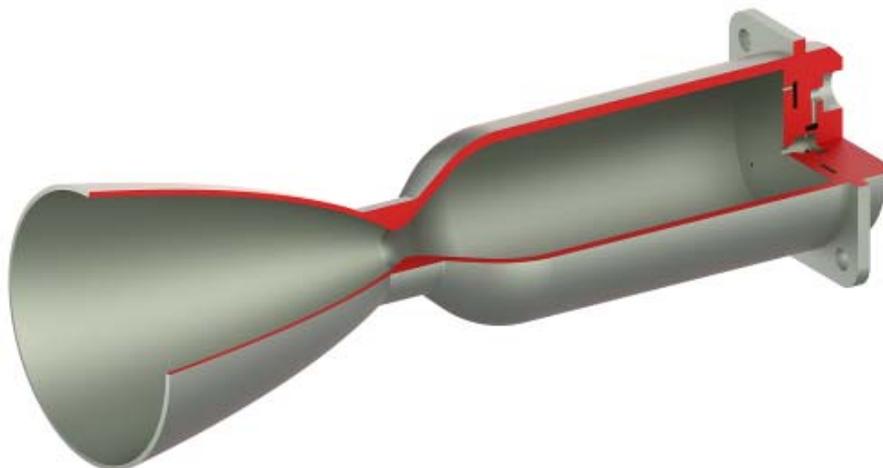


Рис. 1. Компьютерная 3D-модель камеры-демонстратора

Основные технические характеристики принтера:

- размер камеры построения 420×420×280 мм;
- возможность работы со всем спектром порошков для SLM 3D-печати;
- динамическая фокусировка лазерного пятна от 40 мкм до 2 мм;
- время фокусирования менее 0,2 секунды;
- минимальная толщина стенки детали от 80 мкм;
- скорость построения до 15 см³/ч;
- российское программное обеспечение;
- лазер ИК непрерывный, длина волны 1080 нм;
- мощность лазерного излучения 500 Вт.

Управляющая программа позволяет устанавливать технологические параметры выполнения задания, контролировать все процессы, связанные с работой принтера, задавать траектории движения лазерного пятна, его модуляцию, контролировать выполняемое задание, вести видео-регистрацию процесса построения детали.

Программа подготовки задания включает в себя программное обеспечение для обработки STL-файлов (оптимизацию геометрии, построение опорных элементов, разрезание на слои).

Разработка программы печати, выбор технологических режимов, настройка параметров и контроль за процессом печати выполнялись А. Н. Щелкановым и А. Н. Романовым

На различных этапах реализации технологического процесса печати оперативный контроль режимов осуществлялся при участии группы студентов пятого курса СибГУ, обучающихся по специализации «Проектирование жидкостных ракетных двигателей». По завершению печати была проведена термическая обработка – низкотемпературный отжиг при температуре 250 °С с выдержкой 4 часа. Поверхности камеры-демонстратора обработаны на пескоструйной установке.

Измерения геометрических размеров корпуса камеры были выполнены на координатно-измерительной машине (КИМ) ZEISS ACCURA, которая предназначена для измерений геометрических размеров деталей сложной формы, контроля отклонения формы и расположения поверхностей элементов деталей в авиационной, ракетно-

космической и других отраслях промышленности. Машина имеет сертификат годности и аттестована для проведения штатных измерений на предприятиях отрасли.

КИМ оснащена щуповой измерительной головкой с набором щупов разного диаметра и формы. Перемещения центра щупа головки измеряются цифровыми измерительными системами, установленными вдоль каждой из осей. Перемещение измерительной головки по направляющим вдоль осей обеспечивается электродвигателями постоянного тока, питающимися от трех усилителей мощности двигателя сервомотра. Все электродвигатели, считывающие головки, измерительные шкалы, приводные механизмы и направляющие по осям закрыты защитными панелями. Машина оборудована неподвижным измерительным столом, установленным на антивибрационных опорах и снабжена встроенной системой компенсации температурных погрешностей.

Измерения производились в микропроцессорном режиме с использованием программного обеспечения Calypso. Предел допускаемой абсолютной погрешности щуповой головки составляет 1,7 мкм. Программа измерений включает в себя 15 измерений в трех точках с вычислением среднего арифметического значения, соответствующего фактически измеренному размеру, для каждого из 15 измерений (рис. 2). Разработка программы и контрольный обмер узла выполнены Д. Ю. Волошенюк.

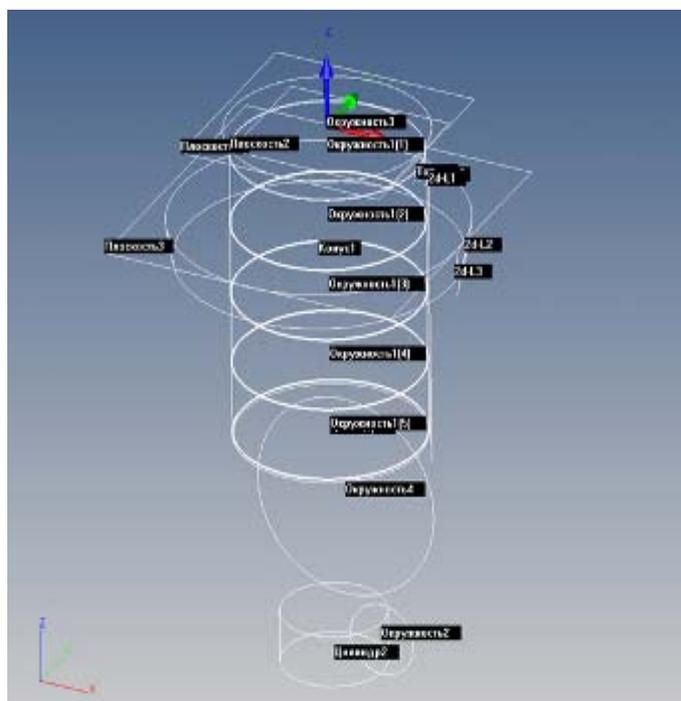


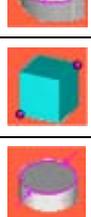
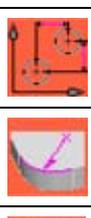
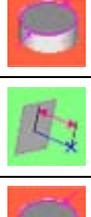
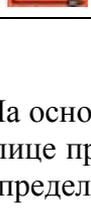
Рис. 2. Программа измерений

Из-за недостаточной длины измерительного щупа КИМ не удалось измерить внутренние размеры критического сечения. Замер внутреннего диаметра камеры (1-5) проводился 5 раз с заданным интервалом.

Результаты измерений представлены в таблице в форме протокола.

Результаты измерения радиуса входа в критическое сечение сопла (6) и радиуса дозвуковой части сопла (10) имеет значительное отклонение от чертежа, существенно отличающееся от отклонений других размеров, что говорит о неточности при построении программы измерений для данных размеров, что говорит о неточности при построении программы измерений для данных размеров в связи с отсутствием штатной методики контрольного обмера деталей, обладающих аналогичным профилем.

Протокол измерения геометрических размеров корпуса камеры

№		Заданные чертежом значения, мм	Фактические измеренные значения, мм	Квалитет точности изготовления на основании отклонения фактического размера от заданного чертежом
1		61,38	61,795	13
2		61,38	61,6896	13
3		61,38	61,7193	13
4		61,38	61,6856	13
5		61,38	61,6845	13
6		11,00	11,9452	-
7		4,00	4,0779	11
8		65,38	66,0897	14
9		3,00	2,7081	14
10		30,69	34,9338	-
11		34,00	34,2968	13
12		282,94	283,7676	14
13		96,16	96,8393	14
14		10°0'0"	10°52'23"	14
15		2,00	2,1024	13

На основании отклонений фактически измеренных размеров от заданных чертежом в таблице приведены квалитеты точности выполненных размеров. Ниже приведен пример определения квалитета для размера (1):

61,38 (Заданное чертёжом) – 61,795 (Фактически измеренное значение) = 0,415 (Допуск размера);
Значение допуска 0,415 для размера 61,38 соответствует 13 качеству.

По результатам оценки качеств можно сделать вывод о недостаточной точности фактических размеров корпуса. Исходя из характера полученных результатов измерений вероятной причиной несоответствия точности изготовления корпуса камеры требованиям конструкторской документации является влияние термической обработки (термоусадка) после 3D-печати изделия, а также повышенная шероховатость поверхности ($R_a = 15,12 \div 22,32$ мкм) в точках замера. С целью повышения точности изготовления изделий методом аддитивных технологий и уменьшения шероховатости поверхностей деталей следует проводить дальнейшие комплексные теоретические и экспериментальные работы по совершенствованию программного обеспечения и режимов печати.

Библиографические ссылки

1. Логачева, А. И. Аддитивные технологии от изделий ракетно-космической техники : перспективы и проблемы применения // Технология легких сплавов. 2015. № 3. С. 39–44.
2. Разработка технологии изготовления завихрителя фронтального устройства камеры сгорания перспективного двигателя ПД-14 // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 55. С. 101–102.
3. Перспективы применения аддитивных технологии в производстве сложных деталей газотурбинных двигателей из металлических материалов / С. В. Белов и др. // Аддитивные технологии в российской промышленности : сб. науч. тр. М. : ВИАМ, 2015. С. 101–102.
4. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей перспективных газотурбинных двигателей / Л. А. Магеррамова, Ю. А. Ножницкий, Б. Е. Васильев и др. // Технология легких сплавов. 2015. № 4. С. 7–13.
5. NASA tests limits of 3D-printing with powerful rocket engine check [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nasa.gov>. 27.08.2013.

© Назаров В. П., Зуев А. А., Толстопятов М. И., 2022

КОНЦЕПЦИЯ ПРОТОКОЛА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Д. Д. Абрамчик*, Н. В. Шпигер, В. Г. Сомов, К. Э. Гаипов

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: abramchik_daniil@mail.ru

Потребность в мобильной связи и наличие больших территорий с невысокой плотностью населения определяют необходимость и перспективы использования радиочастотного спектра для удовлетворения потребностей общества в части доступа к инфокоммуникационной инфраструктуре. Обеспечение прироста объемов потребляемого контента и сетевого трафика в беспроводных сетях путем добавления новых полос частот и освоения новых высокочастотных диапазонов имеет предел. Резервы спектра сокращаются. В этих условиях для удовлетворения растущих потребностей инфокоммуникационного общества в области беспроводных радиотехнологий необходимо повышение эффективности использования радиочастотного спектра». [1] Предметом исследования в статье является сетевой протокол распределения частотных диапазонов при некотором количестве узлов радиостанций.

Ключевые слова: частотное планирование, mesh сети, сетевые протоколы.

Введение

При проектировании радиосети одной из главных проблем является распределение выделенного частотного ресурса, так как при неправильном выделении частот для радиостанций возможен эффект интерференции радиоволн, что способствует искажению передаваемой информации. Существует алгоритм частотного планирования для выделенного частотного ресурса радиосети, под радиостанции с круговой диаграммой направленности, а также известными координатами радиостанций и мощностью излучения антенн. [2]

Актуальность темы: представленный сетевой протокол распределения не использует координаты расположения радиостанций, а только их ID и некоторую mesh-сеть [3], создаваемую имеющимися узлами.

Цель работы: разработка сетевого протокола для распределения частотных диапазонов среди некоторого числа узлов.

Задача: пусть имеется n -е количество узлов радиостанций (далее – РС), каждому из которых присвоен номер ID от 1 до n и не соединенных между собой. Необходимо распределить между ними частотные диапазоны Δf_k (где $k = 1, 2, 3, \dots$), чтобы не возникло интерференции радиоволн.

Решение

Для примера решения данной задачи и формирования сетевого протокола распределения, было взято 9 узлов РС.

Для распределения частотных диапазонов, необходимо определить связь между узлами, с помощью которой они создают некоторую топологию. Для этого предполагаем, что каждый узел делает широковещательную рассылку служебного сообщения на некоторой доступной всем частоте, с помощью которой создается mesh-сеть (рис. 1).

Возможны два случая связи между узлами:

1) Между узлами устанавливается дуплексная связь. Например, в нашем примере такая связь между узлом 4 и 1, между 6 и 9 и т. д. В данном случае узлы обмениваются информацией о полученных диапазонах напрямую.

2) Между узлами существует симплексное взаимодействие. В примере такая связь между узлом 6 и 3, 5 и 8. В этом случае узлы обмениваются информацией о полученных диапазонах через соседние узлы.

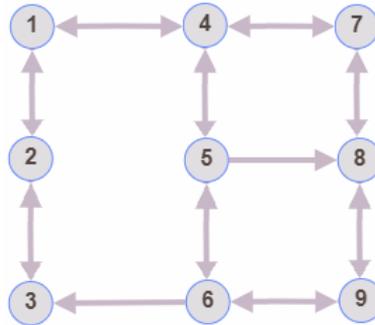


Рис. 1. Mesh-сеть, полученная с помощью широковещательной рассылки служебного сообщения на некоторой доступной всем узлам частоте

Получив mesh-сеть, выбирается узел, который имеет наибольшее количество входящих сигналов от соседних РС и имеет наименьший номер ID, в примере таким узлом является узел под номером 4, и назначается главным. Он присваивает себе первый частотный диапазон Δf_1 и распределяет между узлами, которые с ним связаны, доступные частотные диапазоны Δf_s ($s = 2, 3, 4, \dots$) (рис. 2). В данном случае узлу 1 будет назначен частотный диапазон Δf_2 , узлу 5 – Δf_3 , узлу 7 – Δf_4 . Затем узлы, соседние с главным, передают последующим узлам перечень частотных диапазонов, которые недоступны для присвоения. Недоступные для присвоения диапазоны – это такие диапазоны, на которых узел осуществляет передачу и прием от других узлов. В нашем примере, узел 1 передает узлу 2, что для присвоения недоступны диапазоны Δf_1 и Δf_2 , узел 5 передает для 6 и 8: Δf_1 и Δf_3 , узел 7 передает для 8: Δf_1 и Δf_4 . После этого последующие узлы присваивают наименьший по порядку частотный диапазон в зависимости от своего номера ID (рис. 3). Узел с меньшим номером ID получает приоритет для получения частотного диапазона.

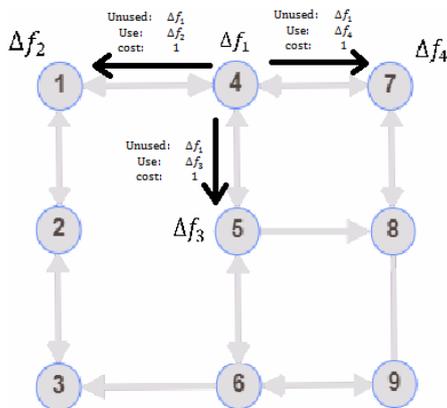


Рис. 2. Обозначение узла 4 как главного и распределение им диапазонов между соседними узлами

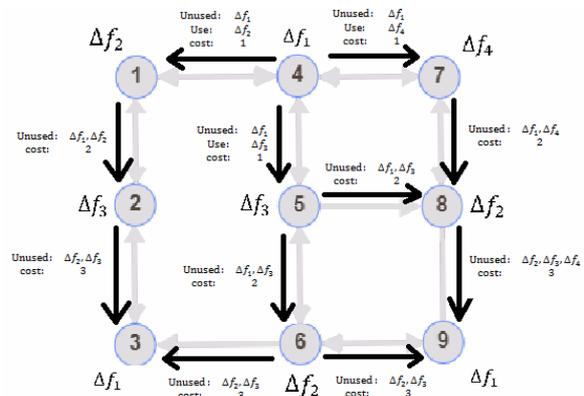


Рис. 3. Первоначальное распределение частотных диапазонов во всех mesh-сети

После данного распределения каждый узел начинает вещать свой диапазон остальным, которые с ним связаны.

Если находится узел, в который входит 2 и более одинаковых диапазонов, то он рассматривается как узел с ошибкой назначения, в нашем примере это узлы 6 и 9 (рис. 4, а). В этом случае, рассматриваются узлы с одинаковым диапазоном, которые с ним связаны, в примере 3 и 8 (рис. 4, б).

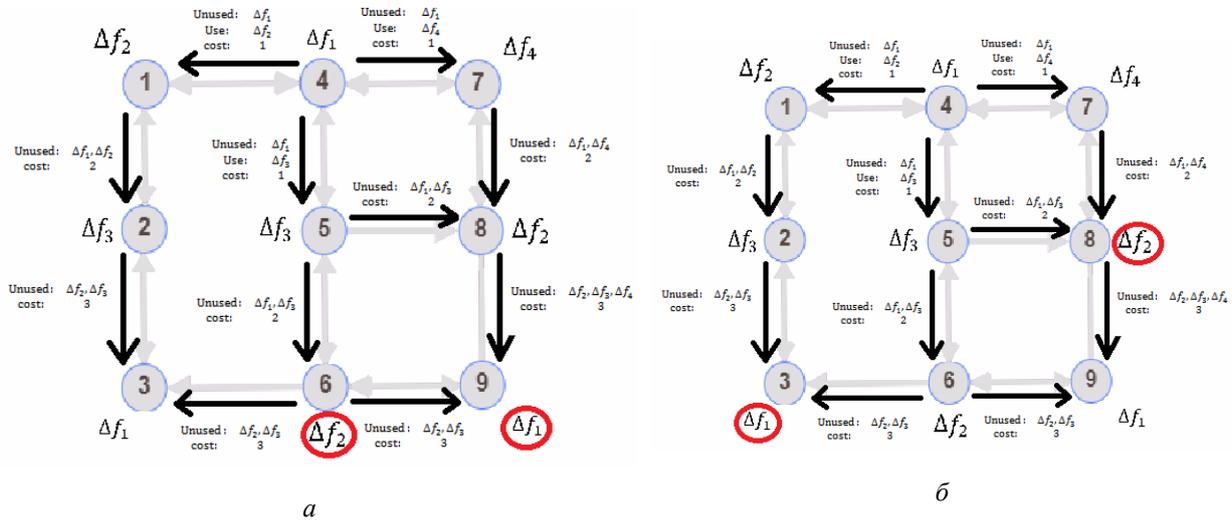


Рис. 4. Распределение узлов:

- а – обозначение узлов, которые получают два одинаковых диапазона;
- б – рассмотрение узлов, связанных с ошибками назначения и выделение их для замены

Происходит замена имеющихся диапазонов на дополнительные, при условии отсутствия в них новых ошибок назначения. Полученная mesh-сеть, с распределенными частотными диапазонами, будет являться решением поставленной задачи (рис. 5). Из неё следует, что нужно 5 частотных диапазонов.

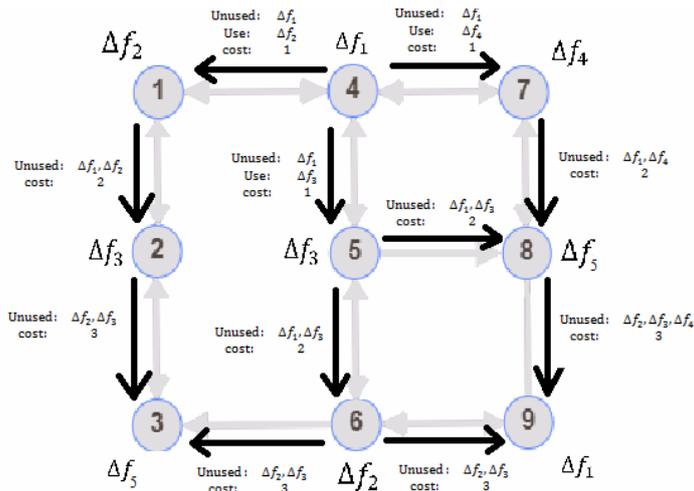


Рис. 5. Итоговая схема распределения частотных диапазонов

Данный протокол в виде общего списка действий:

1. С помощью широковещательной рассылки служебного сообщения, которую делает каждый узел, на некоторой доступной всем частоте производится построение mesh-сети.

2. Выбирается узел, который имеет наибольшее количество входящих сигналов от соседних РС и имеет наименьший номер ID.

3. Главный узел присваивает себе первый частотный диапазон и распределяет доступные, начиная со второго, узлам, которые с ним связаны.

4. Узлы, получившие частотные диапазоны, передают последующим, кроме главного, перечень диапазонов, которые недоступны для присвоения.

5. Узлы присваивают наименьший по порядку частотный диапазон в зависимости от своего номера ID.

6. Получив частотный диапазон, узлы начинают его вещать другим.

7. а) Если находится узел, в который входит 2 и более сигналов на одинаковых диапазонах частот, то он рассматривается как узел с ошибкой назначения; б) если 2 и более узлов вещают друг другу одинаковый частотный диапазон, то они будут обозначаться как ошибочные.

8. Исправление ошибки назначения:

Для случая 7(а): Рассматриваются узлы с одинаковым диапазоном, которые с ним связаны и происходит замена имеющихся диапазонов на дополнительные, при условии отсутствия в них новых ошибок назначения.

Для случая 7(б): Происходит замена имеющихся диапазонов в этих узлах на дополнительные, при условии отсутствия в них новых ошибок назначения.

9. В соответствии с полученной mesh-сетью определить необходимое количество частотных диапазонов.

Рассмотрим пример № 2, для подтверждения правильности протокола. Возьмем количество точек равно 6.

Определяем mesh-сеть, используя широковещательную рассылку служебного сообщения на некоторой доступной всем частоте. На рис.6 представлен возможный результат соединения, для которого будем применять остальные пункты протокола.

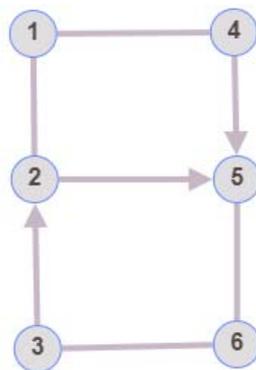


Рис. 6. Mesh-сеть, полученная с помощью широковещательной рассылки служебного сообщения на некоторой доступной всем узлам частоте

В данном случае имеются оба вида связи между узлами. Дуплексная связь обозначается прямой без направления, а симплексное взаимодействие обозначена стрелкой в одном направлении.

Назначаем узел 2 главным, поскольку в него входит наибольшее число сигналов и он имеет наименьший ID. Он распределит доступные диапазоны частот между связанными с ним узлами (рис. 7). Используя полученное распределение от главного узла, распределим диапазоны для оставшихся узлов (рис. 8).

В данном примере ошибок при первом распределении и вещании не возникает, пункт 7 протокола не используется, значит, mesh-сеть на рис. 8 будет итоговой. Для 6 точек и полученной сети количество необходимых частотных диапазонов равно 4.

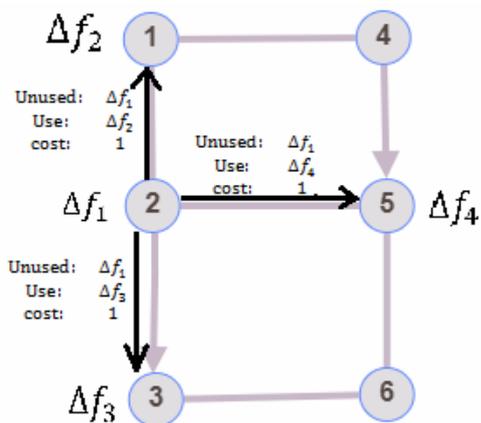


Рис. 7. Обозначение узла 2 как главного и распределение им диапазонов между соседними узлами

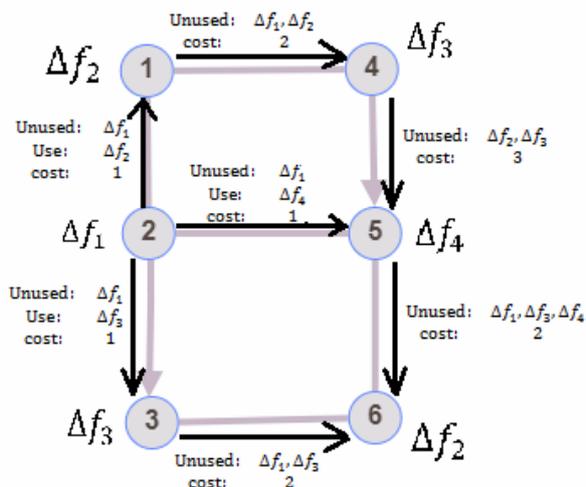


Рис. 8. Первоначальное распределение частотных диапазонов во всех mesh-сети

Заключение. В результате проделанной работы был разработан основной алгоритм работы сетевого протокола, позволяющий распределить частотные диапазоны между некоторым количеством узлов РС. Дальнейшие исследования будут направлены на проработку вопросов таймеров протоколов, структуры его сообщений, процедур связанных с изменением топологии при добавлении или удалении узла или пропадании канала связи. По своему характеру данный протокол напоминает работу дистанционно-векторных протоколов маршрутизации, так как узлы не обладают полным представлением о структуре сети, а лишь знают какие узлы находятся рядом. Поэтому также необходимо исследовать альтернативный подход на основе состояния каналов, когда каждый узел сообщает о себе и о подключённых к нему каналах, тем самым каждый узел будет иметь полное представление о топологии mesh-сети, и, выполнив алгоритм из работы [2], определит частотное распределение.

Библиографические ссылки

1. Кизима С. В., Девяткин Е. Е., Пальцин Д. А. Показатели, критерии и меры оценки эффективности использования радиочастотного спектра [Электронный ресурс] // Электросвязь. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41126361&> (дата обращения: 28.06.2021).
2. Демичев М. С., Гаипов К. Э., Демичева А. А., Нарожный А. И. «Радиочастотное планирование радиосети с исключением интерференции радиоволн» [Электронный ресурс] // Кибернетика и программирование. URL: http://e-notabene.ru/kp/article_23786.html (дата обращения: 28.06.2021).
3. Богданов Д. В., Иванилов М. Г. Оптимизация использования частот в mesh-сетях [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-ispolzovaniya-chastot-v-mesh-setyah/viewer> (дата обращения: 28.06.2021).