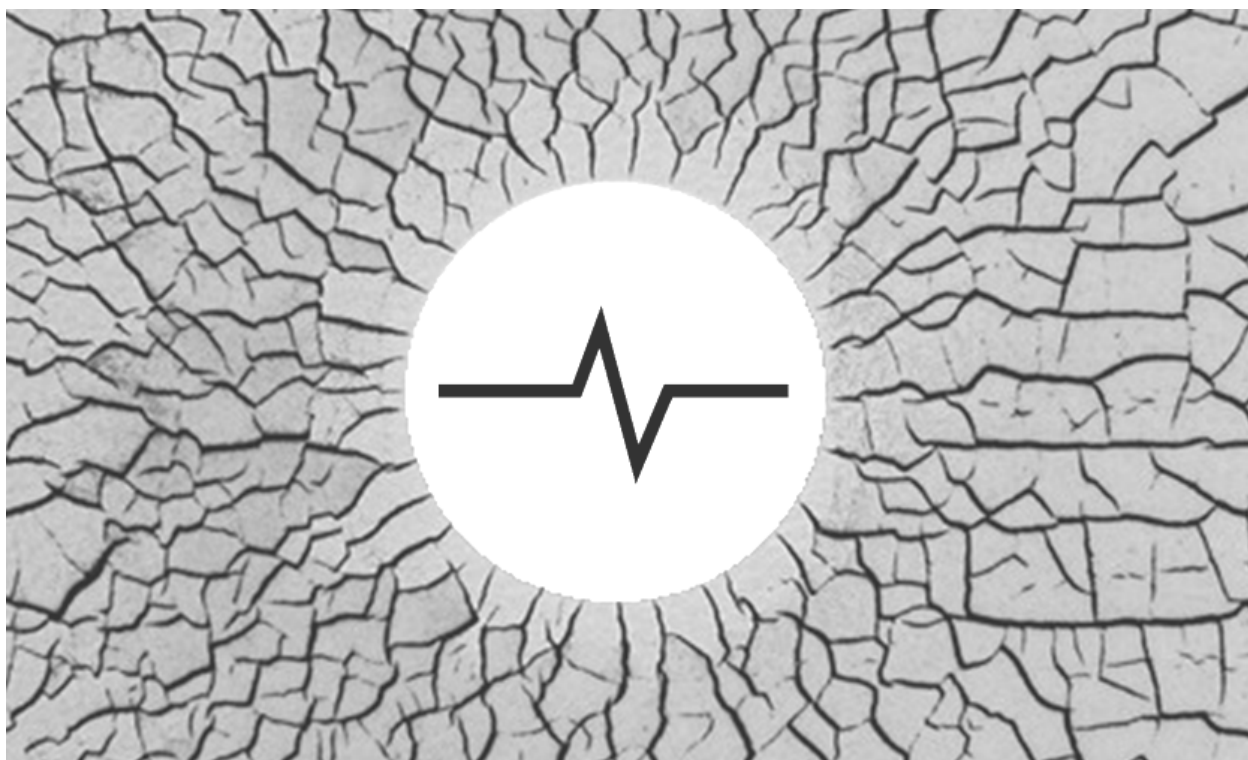




Сибирский государственный университет
науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



КРАСНОЯРСК 2021

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 Всероссийской научно-практической конференции
(24–26 февраля 2021 г., Красноярск)*

Электронное издание

Красноярск 2021

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021

УДК 629.7
ББК 39.5
И88

Редакционная коллегия:

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

Под общей редакцией

кандидата технических наук, профессора В. П. НАЗАРОВА

Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика [Электронный И88 ресурс] : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. (24–26 февраля 2021 г., Красноярск). – Электрон. текстовые дан. (1 файл, 4,6 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, 2021. – Режим доступа: <https://www.sibsau.ru/scientific-publication/>, свободный. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-86433-864-3

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**

ISBN 978-5-86433-864-3



Подписано к использованию: 06.04.2021. Объем 4,6 МБ. С 121/21.

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) 201-50-99.

СОДЕРЖАНИЕ

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

Секция

«Современные методы испытаний и диагностики изделий»

Гончаренко Г. Д. Испытания на надежность бортовых электронных вычислительных машин	7
Петрова А. А., Менчиков Р. В. Применение SiminTech для моделирования автоматической системы электронно-лучевой сварки	11
Бегишев А. М., Журавлев В. Ю., Торгашин А. С. Влияние способа задания плеч рычагов на точность передаточного отношения рычажной системы	14
Едимичева Е. Е., Гринберг Г. М. Применение программного комплекса SIMINTECH для математического моделирования блоков стенда вибрационных испытаний	19
Султанова В. В., Менчиков Р. В. Разработка программно-аппаратного комплекса на базе SiminTech для электронно-лучевой сварки деталей из разнородных сплавов	25
Кишкин А. А., Делков А. В., Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Павленко П. А. Особенности высокоточной градуировки термисторов платиновым термометром сопротивления на высокоинертной термической базе	28

Секция

«Контроль и диагностика технологических процессов машиностроения»

Левко В. А., Литовка О. В. Особенности моделирования обработки абразивным потоком рабочей среды высокой вязкости	34
Васильева Е. К., Жирнова Е. А., Трифанов М. В. Совершенствование инструментального контроля колес на основе анализа измерительных систем	37
Руденко М. С., Гирн А. В., Михеев А. Е. Результаты испытаний антифрикционных покрытий нанесенных методом магнетронного распыления	44
Амельченко Н. А., Григорьев М. А., Раменская Е. В., Янковская Н. Ф. Оценка надежности твердосплавного инструмента при обработке конструкционных материалов	49
Швалева Н. А., Фадеев А. А., Стахнова М. В., Шестаков И. Я. Прочностной анализ шелевого катодного инструмента для обработки вафельного фона электрохимическим способом	56

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

Алилекова К. С., Сидоров В. Г. Современные способы диагностики систем автоматического управления	60
Кашапова Н. Р., Жирнова Е. А. Повышение надежности систем автоматического управления на основе средств измерений с метрологическим самоконтролем	64
Гринберг Г. М., Федоров В. А., Бакулин Р. В. Контроль процесса 3D-печати с использованием технологий нейросетей	67

Секция
«Контроль и испытания ракетно-космической техники»

Талай Е. П., Назаров В. П. Методы снижения неустойчивости рабочего процесса в камерах ЖРД	72
Шевченко Ю. Б., Шилкин О. В., Чайкина К. А. Стенд для энергетических испытаний микротурбин. Результаты сравнительных испытаний микротурбин с направляющим лопаточным аппаратом	78
Воложанин П. А., Толстомятов М. И., Бабкина Л. А. Моделирование контура камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя	85
Алексеев А. О., Назаров В. П., Голиковская К. Ф. Особенности испытаний узлов и агрегатов автоматики ЖРД	88
Максютин А. С. Европейский и отечественный подходы к этапам разработки космических аппаратов	95
Пучков А. В., Дружинин А. А. Двухэтапная система тестирования электронных устройств космической техники на этапе изготовления	98
Кишкин А. А., Делков А. В., Шевченко Ю. Н., Абдуллаев М. У. Методика обработки экспериментальных испытаний тангенциального подвода дозвуковой центростремительной турбины	102

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 629.7.018

ИСПЫТАНИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ БОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Г. Д. Гончаренко
Научный руководитель – В. Г. Сидоров

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

Целью статьи является рассмотрение методов проверки надежности бортовых вычислительных систем, в ходе практических исследований и работ с моделями. Также рассматривается анализ методов на этапе опытно-конструкторских работ для достоверности полученных результатов.

Ключевые слова: надежность, оценка надежности, наработка на отказ, бортовое электрооборудование, циклические испытания, электрорадиоизделия, HALT (Highly Accelerated Life Testing).

Бортовые ЭВМ применяются на летательных аппаратах и используются для произведения вычислительных действий, базируясь на информации, которая исходит от тех или иных датчиков, например, рассчитывается скорость, высота, осуществляется наведение на стратегические объекты, а также определяется положение в пространстве.

С момента создания бортовых ЭВМ к их надежности предъявляются высокие требования. Для обеспечения требуемых стандартов разрабатываются различные методы оценки надежности. Сами методы условно можно разделить на количественные и качественные.

Количественная оценка обращается к методике прогнозирования интенсивности отказов, статистическим методам контроля надежности и ресурсным испытаниям. В действительности, количественная оценка как математическая модель, имеет завышенную интенсивность отказов, а также критически низкие или высокие показатели надежности, не соответствующие реальным эксплуатационным данным.

В основе качественной оценки лежат методы априорного анализа, включающего в себя следующие процессы [1; 2]:

- Оценка функциональных опасностей (FHA);
- Предварительная оценка безопасности системы (PSSA):
 - анализ дерева неисправности (FTA);
 - анализ логической схемы (DD);
 - марковский анализ (MA).
- Оценка безопасности систем (SSA):
 - список отказных состояний и их классификация (FHA, PSSA);
 - качественный и количественный анализ отказных состояний (FTA, DD, MA, FMEA(S));

- анализ общих причин отказов (ССА);
- верификация учета требований предварительной оценки безопасности в проекте и испытаниях;
- испытания.

Анализ общих причин отказов (ССА):

- анализ общих режимов (СМА);
- анализ зонной безопасности (ZSA);
- анализ специфических рисков (PRA).

Достоверность данных качественной оценки определяется множеством факторов:

- зависимостью от экспоненциальных распределения, несвойственного периоду разработки и начальному этапу эксплуатации, при максимальном потоке отказов;
- последовательностью появления отказных событий, при этом не учитывается независимость (параллельность) появления отказных состояний;
- трудоёмкость анализа отказных событий бортового электрооборудования с большим количеством составных частей с учетом степени важности и исключения менее вероятных отказных состояний [3].

Исходя из перечисленных процессов анализа и факторов, можно сказать, что наиболее точными являются ресурсные испытания на этапе опытно-конструкторских работ. Широкое применение получили методы эквивалентно-циклических испытаний, основанные на процедурах стресс-скрининга.

Процессы стресс-скрининга предполагают превышение уровней внешних воздействующих факторов, приводящих к ранней деградации и отказному состоянию. Данный метод позволяет в относительно короткие сроки выявить значимые недостатки и обнаружить потенциальные отказы.

В качестве процедур стресс-скрининга используют процессы, на подобии HALT (Highly Accelerated Life Testing), они отличаются от ранних отечественных тем, что не предназначены для количественной оценки показателей надежности, а используются для повышения качества разработки и технологии производства за счет определенной выработки ресурса в короткие сроки.

Испытания HALT состоят из нескольких процедур [4; 5]:

- ступенчатое изменение повышенной и пониженной температуры;
- термоциклирование со скоростью набора температуры 10–60 °С/мин на уровнях воздействий, превышающих на 10–20 % диапазон предельных значений эксплуатации;
- широкополосная случайная вибрация (ШСВ) с равномерным спектром для определения предела разрушения;
- комплексное воздействие циклического изменения температуры и ШСВ (табл. 1).

Основным недостатком использования высокофорсированных испытаний HALT является малое количество методик оценки и высокая стоимость оборудования.

Таблица 1

Уровни внешних воздействующих факторов при процедурах HALT

Тип применения	Температура, °С				ШСВ, Grms	
	T _{Раб} (–)	T _{Разр} (–)	T _{Раб} (+)	T _{Разр} (+)	T _{Раб} (Grms)	T _{Разр} (Grms)
Бытовая	–62	–80	92	118	46	52
Транспортная	–69	–78	116	123	121	124
Военная	–66	–81	106	124	66	69
Авиационная	–60	–90	110	128	18	29

На данный момент интерпретация результатов HALT предполагает использование нейронных сетей, а также законов, полученных во время исследования процессов деградации. Методики перевода результатов не всегда возможно использовать в новых

разработках бортового электронного оборудования в связи с отсутствием экспериментальной и статистической базы для получения верной оценки выработки на отказ.

Результаты процедур по методике HALT показывают, что около 60 % несоответствий связаны с некачественной пайкой соединения и отказом электро-радио изделий (ЭРИ), деградация элементов происходит лишь в 2 % случаев (табл. 2), в связи с этим можно сделать вывод о нецелесообразности применения эмпирических законов старения относительно бортовой электроники.

Таблица 2

Результаты испытаний с использованием процедур ESS (HALT)

Отказ изделия и его компонентов	N	Температура			ШСВ	ШВС и температура
		–	+	термоцикл		
Пайка	62	–	–	–	48	14
Отказ ЭРИ	28	9	11	1	3	4
Разрушение механического крепления	9	–	–	–	9	–
Ошибки разработки	8	3	4	–	–	1
Отказ соединителей блока	12	–	–	1	12	–
Деформация печатной платы	4	–	–	–	4	–
Выход за допустимое отклонение параметров	4	–	–	–	4	–
Плавающий отказ ЭРИ	3	1	–	1	1	–
Различные предельные значения	3	3	–	–	–	–
Отказ соединителя на плате	2	–	–	1	1	–
Деградация ЭРИ	2	–	2	–	–	–
Короткое замыкание ЭРИ	3	–	–	–	2	1
Разрыв в печатном проводнике	1	–	–	–	–	1
Прочее	8	–	–	–	5	2
Итого	149	16	18	4	89	23
%	100	11	12	3	60	14

Основываясь на полученных данных, возникает потребность в разработке нового метода эквивалентно-циклических испытаний с количественной оценкой показателя наработки на отказ бортовой электроники. Разработка предполагает [6]:

Сокращение времени проведения испытаний за счет следующих методов:

– интенсификация уровней воздействующих режимов внешних воздействующих факторов (ВВФ);

– комплексное воздействие ВВФ: циклическое изменение температуры и ШСВ.

Создание модели эквивалентных режимов ВВФ базовому году эксплуатации воздушного судна.

Выявление конструктивных и электронных элементов, ограничивающих надежность и долговечность объекта.

Определение возможности установления требуемого ресурса и оценка перспективы его увеличения.

Программа испытаний основывается на классическом подходе, состоящем из трёх этапов:

Первый. Предварительные исследования.

Второй. Разработка и обоснование модели испытаний.

Третий. Оценка результатов испытаний и их достоверность.

Для удовлетворения необходимых условий, предполагается модель испытаний, включающая в себя следующие параметры воздействия внешних факторов, исходя из базового цикла эксплуатации воздушного судна за 1 год:

– термоциклирование, превышающие уровни, заданные в технических требованиях, от -100 до $+100$ °С, при скорости изменения температуры $60-70$ °С в минуту;

– ШСВ с уровнем 50–70 Grms.

При реализации необходимых процессов увеличится качество оценки бортовых электронных систем.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что во время серийного выпуска продукции, оптимальным направлением будет использование методов испытаний HALT для процедур технологической приработки и тренировки в целях снижения потока отказов, а также обнаружения скрытых дефектов при производстве. Вместе с этим, появляется возможность проведение входного контроля импортной электронной компонентной базы, используемой в бортовой электронике.

Библиографические ссылки

1. Руководство 4754А по процессам сертификации высоко интегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации. 2010.
2. Руководство 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. М. : ОАО «Авиаиздат», 2010. С. 256–264.
3. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний : квалификационные требования KT-160D (KT-160G).
4. McLean H. W., HATL, HASS and HASA Explained: Accelerated Reliability Techniques, revised edition, ASQ Quality Press, 2009. P. 208.
5. Hobbs G. K. Accelerated Reliability Engineering: HALT and HASS, Hobbs Engineering. 2005. P. 228–229.
6. Основные методы оценки надежности бортового радиоэлектронного оборудования современных гражданских судов перед этапом серийного производства / А. В. Комисаров, Шишкин В. В., Зайцев С. А. и др. // Известия Самар. науч. центра. 2018. С. 323–324.

© Гончаренко Г. Д., 2021

ПРИМЕНЕНИЕ SIMINTESCH ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

А. А. Петрова, Р. В. Менчиков

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

Освещены тенденции развития систем электронно-лучевой сварки. Описаны сложности, связанные с развитием процессов электронно-лучевой сварки. Обозначена необходимость автоматизации. Представлен проект модели автоматической системы электронно-лучевой сварки.

Ключевые слова: системы электронно-лучевой сварки, автоматизация, проект модели системы управления.

С общим нарастанием сложности технологического процесса, увеличением требований к выполнению операций, ростом потребности в увеличении уровня надежности систем электронно-лучевой сварки необходимость постепенной автоматизации этих систем и процессов становится все более актуальной.

Автоматизация технологического процесса электронно-лучевой сварки, охватывающей большой комплекс физических и химических процессов, на базе компьютерной технологии открывает новые возможности управления [1]. С развитием микропроцессорных устройств и локальных вычислительных сетей появилась возможность создания целостных технологических систем обработки данных технологического процесса электронно-лучевой сварки, базирующихся на принципах комплексной автоматизации основных и вспомогательных технологических операций, лёгком и удобном интерфейсе оператора-сварщика к информационным и вычислительным ресурсам. На рис. 1 представлена схема, раскрывающая направления автоматизации систем комплексного управления технологическим процессом сварки электронно-лучевых установках.

По структуре системы управления процессом электронно-лучевой сварки подразделяются на замкнутые и разомкнутые. Системы более низкого уровня (локальные регуляторы) строятся по замкнутым схемам. Например, стабилизаторы ускоряющего напряжения, тока накала катода, тока пучка, тока фокусировки, стабилизаторы скорости перемещения изделия, или сервоприводы представляют собой замкнутые локальные регуляторы[2]. И, наоборот, системы более высокого уровня, управляющие процессом сварки и параметрами электронного пучка, в серийных образцах установок строятся по разомкнутой схеме. Это обусловлено высокой технической сложностью контроля параметров пучка и шва в процессе сварки, а также узкой специализированностью существующих методов управления.

При сварке необходимо применение некоторых методов контроля параметров процесса. Так, совмещение пучка со стыком свариваемых деталей на сегодняшний день осуществляется с использованием оптических систем с увеличением, оборудованными видеокамерами со светофильтрами и системой прицеливания [3]. Широко применяются и методы сканирования стыка с использованием сигнала обратнорассеянных электронов.

Автоматическая система управления представляет собой совокупность управляющих устройств и объектов управления, взаимодействующих без участия человека. Применение систем автоматизированного и автоматического управления позволяет добиться существенного повышения качества сварных соединений, расширить технологические возможности установок, обеспечить высокую воспроизводимость процесса, повысить производительность труда и надежность функционирования установки. Общая схема модели системы представлена на рис. 2.



Рис. 1. Пути автоматизации процессов электронно-лучевой сварки и обработки



Рис. 2. Схема модели системы

При разработке модели системы целесообразно использование специального программного обеспечения, которое позволяет упростить и автоматизировать разработку модели.

Среди множества прикладного программного обеспечения можно остановиться на SimInTech.

Данная среда обладает всем инструментарием, необходимым для построения требуемой модели. Если отталкиваться от схемы модели системы, то динамическая модель (рис. 3) должна содержать хранилище данных о программе работы системы, из которой поступают данные, определяющие параметры технологического режима. Эти данные поступают на блок управления сварочной установкой. Далее управляющие сигналы поступают в механический блок установки и выполняется программа сварки. Три датчика через демультипликатор снимают параметры сварочного шва. Полученные параметры используются для создания трехмерной модели шва.

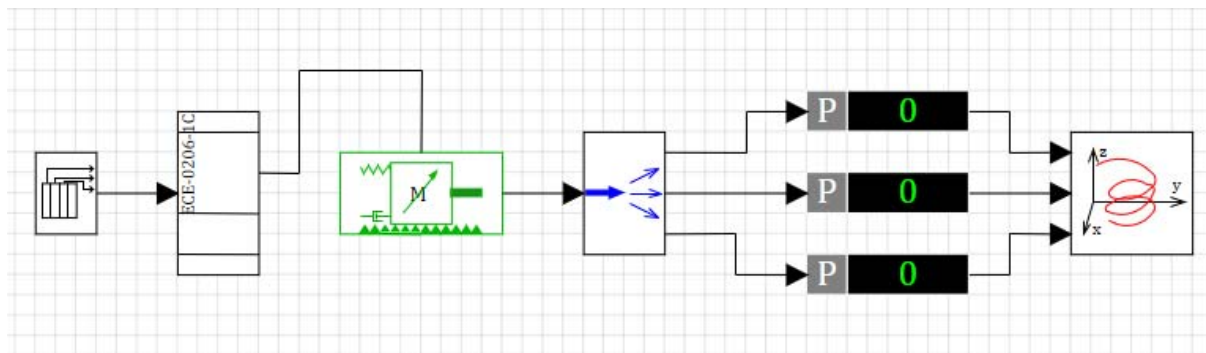


Рис. 3. Проект модели автоматической системы электронно-лучевой сварки

Полученный проект динамической модели позволяет достаточно точно описывать технологический процесс сварки.

Таким образом, в связи с потребностью автоматизации постоянно усложняющихся технологических процессов все актуальнее становится использование прикладного программного обеспечения. Среда проектирования SimInTech обеспечивает приемлемое построение модели процесса с необходимыми параметрами.

Библиографические ссылки

1. Башенко В. В., Вихман В. Б., Козлов А. Н. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки // Тез. докл. междунар. конф. (19–22 май 2008 г.). СПб. : Изд-во «ВиТ-Принт», 2008. С. 5–14.
2. Лаптенко В. Д., Мурыгин А. В., Серегин Ю. Н., Браверманн В. Я. Управление электроннолучевой сваркой / Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 2000. С. 234.
3. Гладков Э. А. Управление процессами и оборудованием при сварке. М. : Академия, 2006. 432 с.

© Петрова А. А., Менчиков Р. В., 2021

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ЗАДАНИЯ ПЛЕЧ РЫЧАГОВ НА ТОЧНОСТЬ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ РЫЧАЖНОЙ СИСТЕМЫ

А. М. Бегишев, В. Ю. Журавлев, А. С. Торгашин

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: alex-beg95@mail.ru

Авторы производят расчет передаточного отношения рычажной системы пространенной в качестве градуировочной системы в силоизмерительных устройствах (СИУ) стендов испытания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Расчет проводится в условиях пошагового нагружения системы набором гирь с учётом различных вариаций задания плеч рычагов. Для каждого варианта определяется погрешность вычисления, проводится анализ полученных результатов.

Ключевые слова: рычажно-градуировочное устройство, точность передаточного отношения, тяга.

Для прямого измерения тяги испытательные стенды ЖРД оборудуются специальными СИУ, состоящими из станка, измерительной и градуировочной системы. Градуировочная система предназначена для градуировки датчиков путем подачи на станок усилий строго определенной величины и является по отношению к измерительной системе образцовой. Выбор типа градуировочной системы, а также варианта исполнения будет зависеть от конструкции применяемого в СИУ станка. Существует несколько отработанных градуировочных систем применяемых на стендах испытания мощных ЖРД: гидравлическая градуировочная система, рычажно-градуировочное устройство (РГУ). В случае РГУ система связана рычагами с подвижной рамой, через которые к последней может быть приложена известная сила, соответствующая по направлению тяге двигателя. Все соединения рычагов с остальными частями градуировочной системы осуществляются с помощью призмных опор. Основными элементами опоры являются подушка и призма, которые изготавливаются из высококачественных сталей. Погрешность градуировочной системы рычажного типа зависит от точности передаточных отношений рычагов, а также от состояний поверхностей призмных опор, так как те обладают повышенным износом при вибрационных нагрузках. Первостепенное значение для точности работы имеет жесткость рычагов, т. е. малая величина деформаций под нагрузкой [3].

Рассмотрим рычажную систему, которая нашла широкое распространение в качестве градуировочной системы СИУ стендов испытания ЖРД. Система состоит из двух рычагов: рычаг первого рода ab и рычаг второго рода cd , соединенные между собой промежуточным звеном. Схема системы представлена на рис. 1.

При проведении расчета условимся, что рычаги являются абсолютно жесткими, отсутствуют воздействия в местах опор. Пусть на рычаг ab действует сила P_1 , соответствующая суммарной массе набора гирь $m_1...m_n$. Для определения конечной силы P_3 необходимо обладать известными геометрическими данными обоих рычагов, а также характеристиками набора гирь. Пусть заданы размеры плеч a, b, c, d рычагов с точностью соответствующему 9-му качеству (в соответствии с источником [1]), а процесс нагружения рычага ab производится пошагово, одинаковыми гирями номинальной

способа задания геометрии определим общую длину обоих рычагов. Для корректных дальнейших вычислений предельные допускаемые погрешности длины первого рычага найдем как

$$\Delta ab = \sqrt{\left(\frac{\partial(a+b)}{\partial a} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial(a+b)}{\partial b} \cdot \Delta b\right)^2};$$

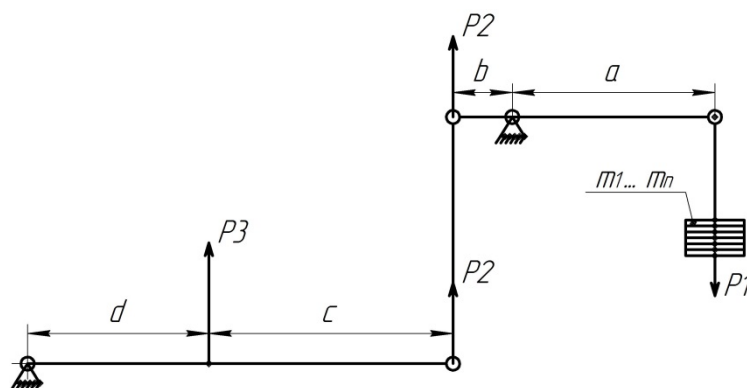


Рис. 1. Расчётная схема системы рычагов

Аналогично определяем предельные допускаемые погрешности длины второго рычага. Входные данные занесем в табл 1.

Таблица 1

	Параметр	Значение	Предельные допускаемые погрешности
Рычаг ab	плечо a	2250 мм	$\pm 0,44$ мм
	плечо b	150 мм	$\pm 0,1$ мм
	длина ab	2100 мм	$\pm 0,451$ мм
Рычаг cd	плечо c	1100 мм	$\pm 0,26$ мм
	плечо d	500 мм	$\pm 0,175$ мм
	длина cd	1600 мм	$\pm 0,313$ мм
Градуйровочная гиря	масса m	50 кг	$\pm 0,0025$ кг

Определим силу P_1 приходящуюся на рычаг ab , а также абсолютную погрешность ΔP_1 :

$$P_i = \sum_{i=1}^n m_i \cdot g; \quad (2)$$

$$\Delta P_i = \Delta m \cdot \sqrt{n} \cdot g. \quad (3)$$

В зависимости от способа задания плеч рычага ab , силу P_2 можно найти по одному из трех вариантов:

$$P_{2.1} = \frac{P_1 \cdot a}{b}; \quad P_{2.2} = \frac{P_1 \cdot (ab - b)}{b}; \quad P_{2.3} = \frac{P_1 \cdot a}{(ab - a)}. \quad (4)$$

При пошаговом нагружении рычага, найденные величины можно представить в табл. 2.

Таблица 2

Кол-во гирь n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sum m_n$, кг	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
P_1 , кН	0,490	0,980	1,471	1,961	2,451	2,942	3,432	3,922	4,413	4,903
ΔP_1 , Н	0,025	0,035	0,042	0,049	0,055	0,06	0,065	0,069	0,074	0,078
P_2 , кН	7,355	14,711	22,066	29,421	36,776	44,132	51,487	58,842	66,197	73,553

В соответствии с каждым предложенным способом задания плеч рычага, предельные погрешности силы P_2 будут иметь разные значения, которые можно найти по приведенным формулам:

$$\Delta P_{2,1} \sqrt{\left(\frac{\partial P_{2,1}}{\partial a} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{2,1}}{\partial b} \cdot \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{2,1}}{\partial P_1} \cdot \Delta P_1\right)^2}; \quad (5)$$

$$\Delta P_{2,2} \sqrt{\left(\frac{\partial P_{2,2}}{\partial ab} \cdot \Delta ab\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{2,2}}{\partial b} \cdot \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{2,2}}{\partial P_1} \cdot \Delta P_1\right)^2}; \quad (6)$$

$$\Delta P_{2,3} \sqrt{\left(\frac{\partial P_{2,3}}{\partial a} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{2,3}}{\partial ab} \cdot \Delta ab\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{2,3}}{\partial P_1} \cdot \Delta P_1\right)^2}. \quad (7)$$

Результаты вычисления представим в табл. 3:

Таблица 3

Кол-во гирь n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta P_{2,1}$, Н	5,123	10,233	15,344	20,454	25,564	30,674	35,784	40,894	46,004	51,114
$\Delta P_{2,2}$, Н	5,447	10,881	16,316	21,75	27,184	32,619	38,053	43,488	48,922	54,357
$\Delta P_{2,3}$, Н	31,927	63,851	95,776	127,7	159,625	191,549	223,474	255,398	287,323	319,247

Опираясь на предложенные варианты задания геометрии рычагов, аналогичным образом определим силу P_3 :

$$P_3 = \frac{P_2(c+d)}{d}; \quad P_3 = \frac{P_2 \cdot cd}{d}; \quad P_3 = \frac{P_2 \cdot cd}{(cd-c)}. \quad (8)$$

При определении абсолютной погрешности силы P_3 расширим анализ влияния способов задания плеч, путем перекрещивания вариантов вычисления первого и второго рычагов. Произведем расчет погрешностей в соответствии с приведенными выше формулами и учетом следующих зависимостей:

$$\Delta P_{3,1} = f(P_{2,1}, c, d); \quad \Delta P_{3,2} = f(P_{2,2}, c, d); \quad \Delta P_{3,3} = f(P_{2,3}, c, d). \quad (9)$$

Результаты вычисления представим в табл. 4 и рис. 2.

Таблица 4

Кол-во гирь n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_3 , кН	23,537	47,074	70,61	94,147	117,684	141,221	164,758	188,294	211,831	235,368
$\Delta P_{3,1}$, Н	17,762	35,485	53,208	70,931	88,654	106,377	124,1	141,823	159,546	177,269
$\Delta P_{3,2}$, Н	18,722	37,407	56,091	74,776	93,461	112,146	130,83	149,515	168,2	186,885
$\Delta P_{3,3}$, Н	102,394	204,78	307,167	409,554	511,941	614,328	716,714	819,101	921,488	1023,875
$\Delta P_{3,4}$, Н	18,918	37,8	56,682	75,563	94,445	113,327	132,208	151,09	169,972	188,853
$\Delta P_{3,5}$, Н	19,822	39,609	59,397	79,184	98,971	118,758	138,546	158,333	178,12	197,907
$\Delta P_{3,6}$, Н	102,6	205,194	307,788	410,382	512,975	615,569	718,163	820,757	923,35	1025,944
$\Delta P_{3,7}$, Н	11,271	22,514	33,756	44,998	56,24	67,483	78,725	89,967	101,209	112,451
$\Delta P_{3,8}$, Н	11,983	23,939	35,894	47,85	59,806	71,762	83,717	95,673	107,629	119,584
$\Delta P_{3,9}$, Н	70,239	140,473	210,707	280,94	351,174	421,408	491,642	561,876	632,11	702,344

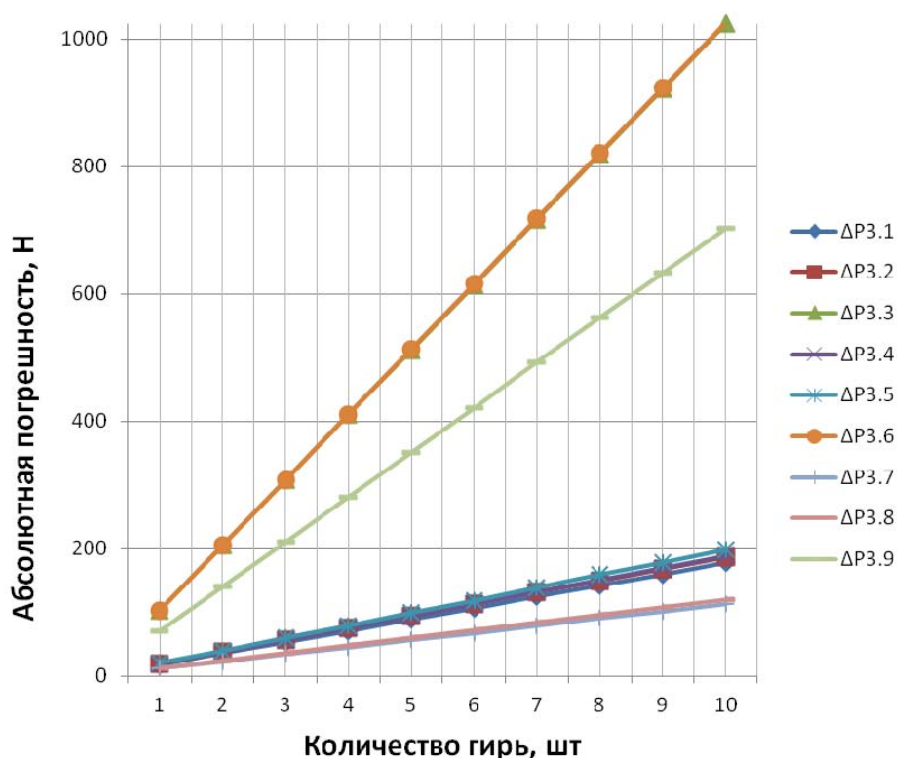


Рис. 2. График зависимостей абсолютных погрешностей ΔP_3 в зависимости от степени нагружения, для разных вариантов задания плеч рычажной системы

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. При вычислении погрешности силы на первом рычаге (рычаге первого рода) наименьшее значение погрешности, получено используя в качестве входных данных длины плеча рычага с отсчетом от шарнирно-неподвижной опоры.
2. В случае второго рычага (рычага второго рода) наилучший результат показал способ задания плеч в виде: общей длины рычага (от шарнирно-неподвижной опоры до точки приложенной силы) и длины большего плеча (между действующими на рычаг силами).
3. Наихудший способ задания плеч показал себя вариант, при котором рычаг первого рода задан общей длиной рычага и большим плечом, а рычаг второго рода общей длиной и коротким плечом.
4. Из-за большого предела разброса погрешностей требуемая точность передаточного отношений рычагов может быть достигнута лишь весовым способом. При этом

проверяемый рычаг вывешивается в горизонтальном положении и тарируется уравнивающими друг друга грузами, по результатам которых подсчитывается передаточное отношение [3].

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 25346–2013 (ISO 286-1:2010) Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки: дата введения 2013-11-14 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200108840> (дата обращения: 16.02.2021).

2. ГОСТ OIML R 111-1–2009 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Гири классов E(1), E(2), F(1), F(2), M(1), M(1-2), M(2), M(2-3) и M(3). Часть 1. Метрологические и технические требования: дата введения 2009-06-11 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200086911> (дата обращения: 16.02.2021).

3. Испытание жидкостных ракетных двигателей / А. Е. Жуковский, В. С. Кондрусев, В. Я. Левин и др. М. : Машиностроение, 1981. 199 с

© Бегишев А. М., Журавлев В. Ю., Торгашин А. С., 2021

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SIMINTESCH ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЛОКОВ СТЕНДА ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Е. Е. Едимичева^{*}, 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: edimicheva98@mail.ru

Рассмотрено значение проведения технического контроля и испытаний для обеспечения качества продукции. Показаны роль и задачи автоматизации испытаний. Приведены результаты математического моделирования в российском программном комплексе SimInTech отдельных блоков проектируемого автоматизируемого стенда вибрационных испытаний.

Ключевые слова: математическая модель, среда программирования SimInTech, испытательный стенд, контроль датчиков вибрации.

Введение

В настоящее время особую значимость приобрела проблема оптимизация производства на промышленных предприятиях. Оптимизация производства преследует две основные цели: повышение качества готовой продукции и снижение общих затрат на ее изготовление.

Основной инструмент повышения качества продукции – внедрение и последующее совершенствование системы управления качеством в соответствии с требованиями государственных и международных стандартов системы управления качеством.

«Управление качеством продукции – установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества продукции при ее разработке, производстве и эксплуатации или потреблении, осуществляемое путем систематического контроля качества и целенаправленного воздействия на условия и факторы, влияющие на качество продукции» [1].

В цитируемом документе отражена первостепенная необходимость проведения технического контроля качества продукции с целью получения данных о свойствах изготавливаемой продукции. Эти свойства формируются в процессе всей производственной деятельности предприятия, на всех ее этапах и во всех звеньях.

Таким образом, технический контроль является составной частью процесса управления качеством продукции и осуществляется на всех стадиях ее жизненного цикла: разработки, изготовления, эксплуатации или потребления продукции.

Разновидностью технического контроля являются испытания продукции. Если цель контроля заключается в установлении факта нахождения величины (параметра) в заданном допуске при заданных режимах испытания и воздействующих факторах, то цель испытаний – определение значения величины (параметра) при заданных режимах испытания и воздействующих факторах.

В систему испытаний входят следующие основные элементы: объект (изделие, продукция) и средства для проведения испытаний. В состав средств испытаний входят средства воспроизведения испытательных воздействий, средства измерений, средства для регистрации и обработки полученных данных, приспособления, материалы и вещества, т. е. все, без чего невозможно провести испытание.

В совокупности средства воспроизведения испытательных воздействий, средства измерений, средства для регистрации и обработки полученных данных образуют испытательный стенд – лабораторное оборудование, предназначенное для специальных, контрольных и приёмочных испытаний разнообразных объектов.

Задачи автоматизации испытаний

С целью оптимизации процесса проведения испытаний выполняется их автоматизация, представляющая собой процедуру, в рамках которой функции контроля и управления испытаниями, выполнявшиеся человеком, передаются приборам и устройствам.

Автоматизация испытаний готовых изделий осуществляется для уменьшения трудоемкости и стоимости испытаний, увеличения точности и достоверности их результатов, улучшения условий труда, обеспечения возможности дистанционного проведения испытаний, быстрого изменения их программы, уменьшения времени получения результатов и др.

С технической точки зрения процесс автоматизации испытаний готовых изделий включает:

- автоматическое перемещение, установку, подключение и отключение изделия;
- автоматическую установку режимов испытаний в соответствии с выбранной (заданной) программой;
- автоматический сбор, передачу и хранение полученной в процессе испытаний информации;
- автоматическую обработку (вычисление) измеренных величин;
- представление результатов испытаний (протокола) в требуемом виде.

Процесс автоматизации испытаний реализуется только с помощью цифровой техники, включая цифровое представление измеряемых величин, каналы передачи, хранения и обработки информации и исполнительные устройства [2].

Авторами статьи была разработана концепция автоматизации вибрационных испытаний и спроектирован автоматизированный испытательный стенд для входного контроля датчиков вибрации, описание которого приведено в работе [3], а структурная схема показана на рис. 1.

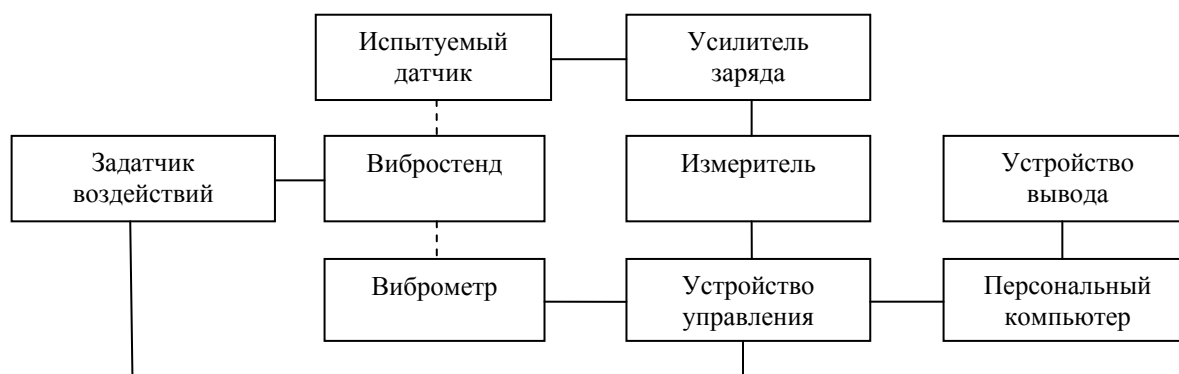


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного испытательного стенда

С целью последующей практической реализации спроектированного стенда выполнен предварительный подбор средств технического оснащения стенда. К этим средствам в первую очередь относятся серийно выпускаемые технические средства: электрическое оборудование, радиоизмерительные приборы, средство испытаний, ЭВМ, АЦП и ЦАП, накопители информации, устройства ввода-вывода и документирования, устройства оперативного взаимодействия, коммутирующие устройства, интерфейсы.

При создании любого технического устройства неизбежно приходится сталкиваться с проведением его экспериментальной отработки. Для этого можно построить тестовую модель, но если устройство является достаточно сложным и может понадобиться построить сразу несколько моделей, сэкономить трудовые и материальные ресурсы может помочь математическое моделирование [4].

Описание моделирования блоков стенда вибрационных испытаний

В последнее время для математического моделирования стала широко применяться российская система модельно-ориентированного проектирования систем автоматического управления SimInTech (Simulation In Technic). Эта система предназначена для создания математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для программируемых контроллеров графических дисплеев.

При помощи базы данных сигналов, блоков протоколов обмена (таких, например, как UDP, Modbus, TCP) и устройств ЦАП/АЦП также можно обеспечить подключение к математической модели реальных аппаратов управления для последующего тестирования и отладки [5].

Кроме сказанного, данная среда моделирования позволяет создавать панели управления на основе окон анимации – графических окон, в которых располагаются индикаторы и средства управления. С помощью этих индикаторов и средств управления можно наглядно получать информацию о поведении интересующих величин и удобно управлять какими-либо значениями. Использование этого функционала позволяет создавать различного вида тренажёры.

SimInTech осуществляет моделирование технологических процессов, протекающих в различных объектах, с одновременным моделированием системы управления, и позволяет повысить качество проектирования систем управления за счет проверки принимаемых решений на любой стадии проекта [6].

Модельно-ориентированное проектирование основано на построении системной модели разрабатываемого устройства, в которой объединены различные компоненты и подсистемы устройства. На такой модели удобно проводить любые виртуальные испытания подсистем по отдельности и в комплексе, проверять их взаимное влияние друг на друга. Встроенные методы математической оптимизации и калибровки позволяют выбрать наилучшие параметры для достижения целевых показателей поведения системы.

В рамках данной статьи описана реализация в среде SimInTech с помощью подходов модельно-ориентированного проектирования следующих моделей блоков испытательного стенда (см. рис. 1): задатчика воздействий (далее в описании – режим), вибростенда (далее в описании – вибропривод) и испытуемого датчика (далее в описании – объект).

На рис. 2 показана разработанная модель задатчика воздействий, которые могут иметь синусоидальную или прямоугольную форму.

Задатчика воздействий представляет собой устройство управления, которое задает вид воздействия: синусоидальные и прямоугольные. Выбор воздействия осуществляется блоком программирования, описание работы которого представлено на рис. 3.

Выходной сигнал блока программирования управляет ключами, установленными на входе коммутатора сигналов. Коммутатор – это устройство, предназначенное для коммутации (включения, отключения и переключения) его выхода с входами, подключенных к нему блоков.

На рисунке 4 показана разработанная модель вибропривода.

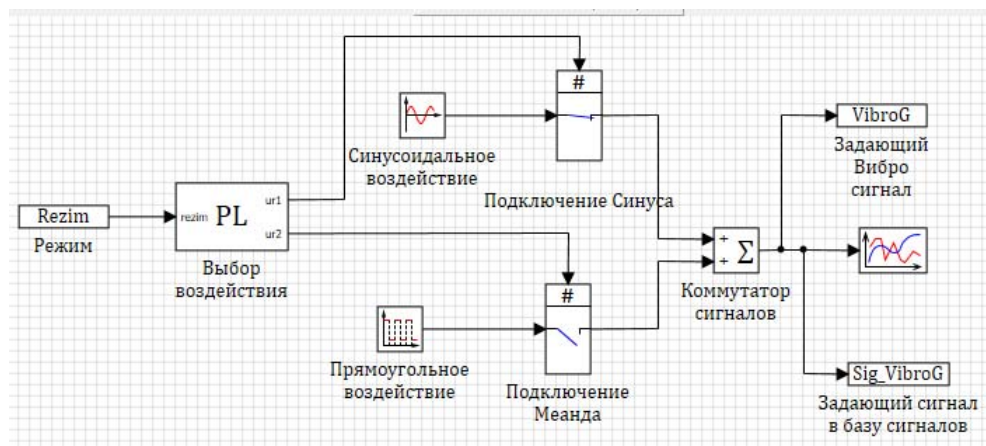


Рис. 2. Структурная схема задатчика воздействий

```

1  input Rezim;

-
-
-
-   if Rezim=0 then
-   // Выбор номера источника формы сигнала колебаний
-   begin
-   Ur1=0;
-   Ur2=0;
-   end
10  if Rezim=1 then
-   begin
-   Ur1=1;
-   Ur2=0;
-   end
-   if Rezim=2 then
-   begin
-   Ur1=0;
-   Ur2=1;
-   end
20
-   output Ur1,Ur2;

```

Рис. 3. Описание работы блока программирования

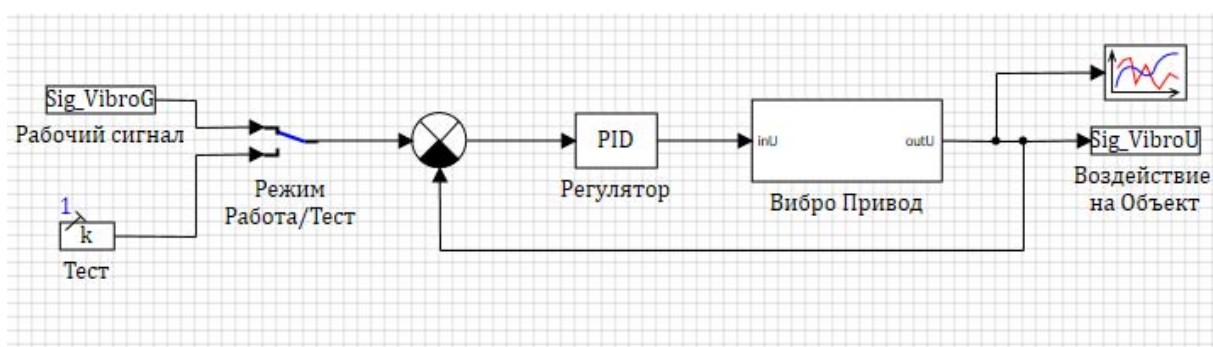


Рис. 4. Структурная схема вибропривода

Входным сигналом для вибропривода является выходной сигнал датчика воздействий. Входной сигнал поддается на PID регулятор, который управляет работой блока «Вибро Привод». PID регулятор с помощью обратной связи поддерживает в заданном интервале параметры управляет работой блока «Вибро Привод» сигнала: учитывает фактическую величину, заданное значение, разность значений.

Макроблок «Вибро Привод» состоит из двигателя, редуктора и механической передачи (рис. 5).

Разработанная модель объекта показана на рис. 6.

Разработанная модель объекта состоит из двух макроблоков: «Объект испытаний» и «Датчик». Модель макроблока «Объект испытаний» представлена на рис. 7, а модель макроблока «Датчик» – на рис. 8.

Выходной сигнал «Объекта испытаний» измеряется макроблоком «Датчик», записывается в базу данных результатов испытаний и может быть выведен в виде графика, как показано на рис. 9.

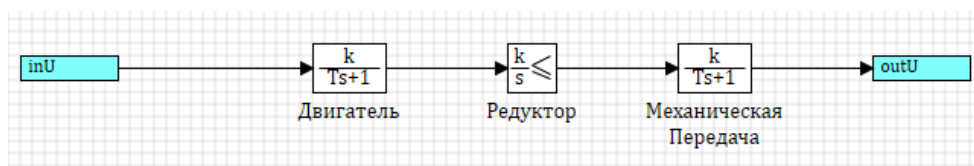


Рис. 5. Макроблок «Вибро Привод»

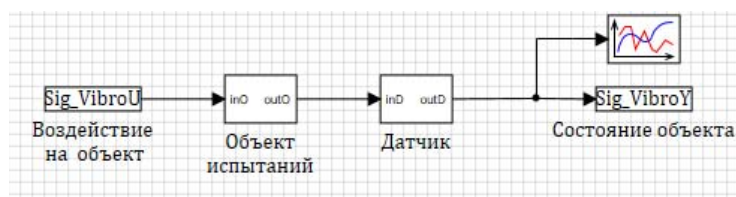


Рис. 6. Объект

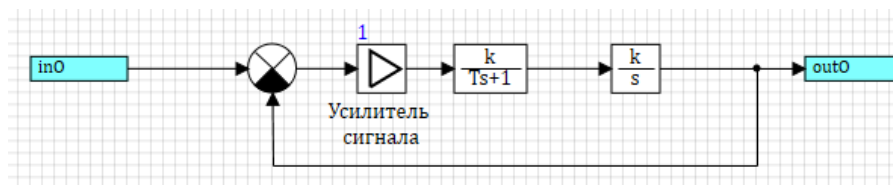


Рис. 7. Макроблок «Объект испытаний»

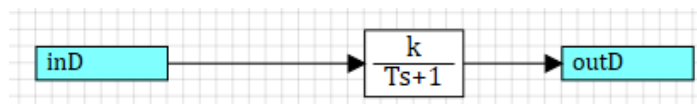


Рис. 8. Макроблок «Датчик»

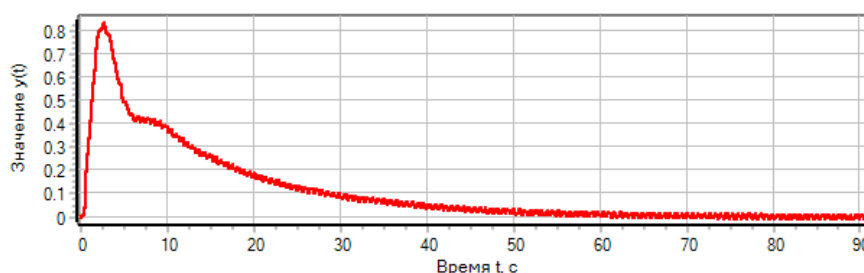


Рис. 9. Выходная характеристика датчика

Заключение

В программном комплексе SimInTech, который обладает необходимым и достаточным функционалом для целей создания и исследования моделей отдельных блоков какой-либо системы, были разработаны модели следующих блоков создаваемого стенда вибрационных испытаний датчиков вибрации: задатчика воздействий, вибропривода, объекта испытаний, контрольного датчика. Эти модели в комплексе с реальными устройствами будут использованы для экспериментальной отработки создаваемого стенда.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2009. 21 с.
2. Шалыгин М. Г., Вавилин Я. А. Автоматизация измерений, контроля и испытаний [Электронный ресурс] : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2019. 172 с. ISBN 978-5-8114-3531-9 // Электронно-библиотечная система «Лань». URL: <https://e.lanbook.com/book/115498> (дата обращения: 27.01.2021).
3. Едимичева Е. Е. Разработка автоматизированного испытательного стенда для входного контроля датчиков вибраций [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : 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. 934–937.
4. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов, Е. А. Шабаетов, О. С. Козлов и др. М. : ДМК Пресс, 2017. 424 с.
5. Введение в работу с программным обеспечением «Среда динамического моделирования технических систем «SimInTech». Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://help.simintech.ru/> (дата обращения: 24.02.2021).
6. Simintech [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Simintech> (дата обращения: 17.02.2021).

© Едимичева Е. Е., Гринберг Г. М., 2021

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ SIMINTECH ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ

В. В. Султанова, Р. В. Менчиков

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: vika.sultanova.1998@mail.ru

Обозначена актуальность применения метода электронно-лучевой сварки деталей из разнородных сплавов. Описаны преимущества и недостатки данного метода. Представлен программно-аппаратный комплекс системы и проект модели указанного комплекса в среде SIMINTECH.

Ключевые слова: сварка деталей из разнородных сплавов, электроннолучевая сварка, моделирование, SIMINTECH.

За последние годы номенклатура сочетания разнородных металлов, используемых в сварных конструкциях, резко возросла и продолжает расширяться. Соединения из различных классов сталей с медью и ее сплавами достаточно широко используются во многих отраслях. Для изготовления ответственных изделий, узлов и конструкций, работающих в агрессивных средах при повышенных или пониженных температурах, чаще всего используют высокохромистые стали (аустенитные, аустенитоферритные, мартенситные) и хромистые бронзы. К таким соединениям предъявляются весьма высокие требования в отношении работоспособности, хотя, как правило, они обладают химической, структурной и механической неоднородностями, которые могут возникать в различных зонах сварного соединения. Свариваемые материалы обладают различными физико-химическими свойствами, механические и эксплуатационные характеристики сварного шва будут определяться свойствами «нового материала», образовавшегося в результате прошедших при сварке процессов, и основная цель при сварке разнородных материалов заключается в направленном регулировании этих процессов [1].

Рассматривая процессы, происходящие при сварке разнородных металлов и сплавов (плавление, образование сварочной ванны и ее кристаллизация), необходимо учитывать следующие различия в физико-химических свойствах:

- разные температуры плавления – при большом их различии в момент достижения одним из металлов жидкого состояния другой будет находиться еще в твердом;
- различия в коэффициентах линейного расширения, что обуславливает возникновение значительных термических напряжений. Для уменьшения напряжений требуется предварительный подогрев материала с меньшим коэффициентом линейного расширения;
- различие теплопроводности и теплоемкости соединяемых металлов приводит к асимметрии температурных полей и изменению условий кристаллизации металла шва, обуславливает характер смачиваемости более тугоплавкого металла. Для компенсации тепловых потерь необходимо подогревать материал с большей теплопроводностью;
- резкое различие в электромагнитных свойствах соединяемых металлов может привести к неудовлетворительному формированию шва;

У меди и железа наблюдается некоторая близость кристаллофизических свойств: тип кристаллической решетки при повышенных температурах, параметры, атомные радиусы, количество электронов в наружном слое атома (таблица), поэтому медь с железом образует твердые растворы с ограниченной растворимостью.

Применение электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для получения сварных соединений сталей с медными сплавами позволяет решить многие проблемы, например, уменьшения пористости меди, подавления образования в ней эвтектики $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$. Это обусловлено тем, что сварка происходит в высоком вакууме. В том числе благодаря высококонцентрированному вводу тепловой мощности и возможности точного позиционирования электронного пучка, сварные швы получаются с высокими значениями отношения глубины к его ширине, обеспечиваются минимальные размеры зоны термического влияния и высокие механические характеристики сварных соединений.

ЭЛП

Вакуумная камера

ОС

ДВЭ

Управление разверткой

Синхронизация

Блок управления и разверток

Видеосигнал

ВУ

ВЛСА

Компьютер

В установке используется концепция высокоуровневого программного управления, при которой взаимодействие пользователя с оборудованием осуществляется исключительно через Windows-ориентированный графический интерфейс. Работа с интерфейсом осуществляется с помощью стандартных средств: клавиатуры и манипулятора типа мышки. Интерфейс интуитивно понятен и не требует специальной квалификации, как при «низкоуровневом» машинном программировании. Каждую из подсистем установки обслуживает соответствующий оконный графический инструментальный с проверками вводимых данных и блокировками для обеспечения безопасности пользователя и оборудования.

26

телем, включая графический интерфейс, средства составления и хранения программ сварки, сбора и хранения диагностических данных, администрирования и т.д. Нижний уровень занимается непосредственным исполнением всех процедур по командам с верхнего уровня.

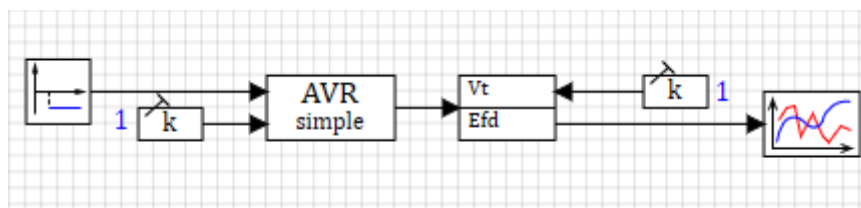


Рис. 2. Проект системы на базе SIMINTECH

Функциональная схема системы представлена на рис. 2. Система состоит из генератора сканирования стыка электронным. Со стыка в спектре сигнала датчика появляется составляющая, частота которой равна частоте сканирования. Амплитуда этой составляющей пропорциональна смещению луча, а фаза определяет направление смещения. Когда луч находится в стыке, на выходе датчика присутствуют только составляющие с четными гармониками частоты сканирования.

Избирательный усилитель, резонансная частота которого равна частоте сканирования, включен с целью снижения коэффициента усиления устройства на частотах, отличных от частоты сканирования. При совмещении луча со стыком на выходе избирательного усилителя сигнал отсутствует. Выходы избирательных усилителей соединены с входами демодуляторов, которые выделяют постоянную составляющую из гармоник. Буферный регистр предназначен для подключения входа цифроаналогового преобразователя к информационному входу, соответствующему текущему режиму работы системы (запись или воспроизведение). Выход усилителя постоянного тока соединен с отклоняющей системой электронно-лучевой установки. В катушках отклоняющей системы создается ток, магнитное поле которого отклоняет электронный луч, совмещая его со стыком.

Результатом настоящей работы является проект программно-аппаратного комплекса на базе SIMINTECH для электронно-лучевой сварки деталей из разнородных сплавов. Среда SIMINTECH обеспечивает полное моделирование необходимых систем и процессов. Для полученного проекта в перспективе предусмотрена доработка до внедрения в технологический процесс типовых предприятий.

Библиографические ссылки

1. Лаптенков В. Д., Мурыгин А. В., Серегин В. Я. Управление электронно-лучевой сваркой. М. : Красноярск, 2010. С. 21.
2. Гладков Э. А. Управление процессами и оборудованием при сварке. М. : Академия, 2006. 432 с.
3. Рыкалин Н. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник. М. : Машиностроение, 1985. 496 с.

© Султанова В. В., Менчиков Р. В., 2021

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТОЧНОЙ ГРАДУИРОВКИ ТЕРМИСТОРОВ ПЛАТИНОВЫМ ТЕРМОМЕТРОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ВЫСОКОИНЕРТНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ БАЗЕ

А. А. Кишкин, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко, О. В. Шилкин, П. А. Павленко

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: spsp99@mail.ru

Рассмотрено методика проведения тарировки (градуировки) типовых термисторов B57861-S 103-F40 в составе измерительного стенда для одновременной градуировки 4...8 датчиков температуры на основе термисторов по показаниям образцового платинового термометра сопротивления. Регистрация показания термисторов выводится одновременно на панель вольтметров. Показания образцовой температуры берутся из характеристики термометра сопротивления (паспортные данные). Компенсация термической инерционности чувствительных элементов термисторов и термометра сопротивлений производится за счет компактного механического контакта на объеме инерционного металла (медный куб ребром 60 мм) и конвективной выдержкой при охлаждении с градиентом 13 °С в час. Область размещения и крепления датчиков тепло изолируется от конвективного теплообмена. Подобная технология позволяет снять гистерезис (запаздывания) образцового и тарируемого датчика и достигнуть точности градуировки 0,001 °С. Что необходимо для обеспечения точности измерений при испытаниях мало перепадных тихоходных микротурбин. Градуировочные кривые формируются в виде участков полинома степенью не выше 2.

Ключевые слова: микротурбина, градуировка, термистор, термометр сопротивления, точность градуировки, гистерезис.

Для формирования стенда энергетических испытания микротурбин мощностью до 100 Вт, с последующей обработкой результатов измерений полей давлений и температур в виде распределенных полей скоростей необходимо сформировать стенд для градуировки термисторов рис. 1.



Рис. 1. Общий вид стенда для градуировки термисторов по образцовому термометру сопротивления:

- 1 – Панель измерительных вольтметров для термисторов 10 кОм;
- 2 – блок индикации «Теркон» для показаний термометра сопротивлений ТП-198;
- 3 – сборка градуировочного стенда с теплоизоляционной защитой

Стенд включает в себя (рис. 1) блок панелей измерительных вольтметров позиция 1, подключается к градуировочным термисторам на медном кубе позиция 3 с образцовым термометром сопротивления позиция 3. Точность показания измерения температуры образцовым термометром выводится на блок индикации «Теркон» позиция 2. Предварительно образцовый термометр сопротивления градуируется по паспортным данным табл. 1, визуализированный графиком и представленный на рис. 2.

Таблица 1

Протокол градуировки «образцового» термометра сопротивления ТП-198 по паспортным данным изготовителя, полиномом 1(Y (x)) и 2 (Y (x,x2)) порядка

t, C	R, Ohm	R2	Y (x)	Y (x, x2)	Относит. ошибка %		Абс. ошибка	
-50	80,11	6417,612	-51,5195	-49,9915	0,759746	0,004252	1,519493	-0,0085
-40	84,15	7081,223	-41,1254	-39,9748	0,562687	0,012616	1,125375	-0,02523
-30	88,16	7772,186	-30,8084	-30,0002	0,40422	8,96E-05	0,808441	0,000179
-20	92,17	8495,309	-20,4915	-19,9935	0,245753	0,003266	0,491507	-0,00653
-10	96,16	9246,746	-10,226	-10,0048	0,113014	0,002391	0,226029	0,004783
0	100,14	10028,02	0,013721	-0,00945	0,006861	0,004724	-0,01372	0,009449
10	104,11	10838,89	10,22774	9,992296	0,113872	0,003852	-0,22774	0,007704
20	108,06	11676,96	20,39031	19,9749	0,195155	0,01255	-0,39031	0,025099
30	112,01	12546,24	30,55288	29,98867	0,276438	0,005663	-0,55288	0,011326
40	115,94	13442,08	40,66398	39,98268	0,331992	0,008662	-0,66398	0,017323
50	119,87	14368,82	50,77509	50,00753	0,387547	0,003767	-0,77509	-0,00753
60	123,77	15319,01	60,80902	59,98636	0,40451	0,006818	-0,80902	0,013635
70	127,67	16299,63	70,84295	69,99558	0,421473	0,00221	-0,84295	0,004419
80	131,55	17305,4	80,82542	79,98362	0,412708	0,008191	-0,82542	0,016382
90	135,43	18341,28	90,80789	90,00173	0,403943	0,000865	-0,80789	-0,00173
100	139,29	19401,7	100,7389	99,99804	0,36945	0,000979	-0,7389	0,001958
110	143,15	20491,92	110,6699	110,0241	0,334957	0,012059	-0,66991	-0,02412
120	146,99	21606,06	120,5495	120,0278	0,274736	0,01389	-0,54947	-0,02778
130	150,81	22743,66	130,3776	130,0086	0,188787	0,004283	-0,37757	-0,00857
140	154,63	23910,44	140,2057	140,0185	0,102837	0,009251	-0,20567	-0,0185
150	158,43	25100,06	149,9823	150,005	0,00884	0,002476	0,017679	-0,00495
160	162,23	26318,57	159,759	160,0202	0,120517	0,010124	0,241034	-0,02025
170	166,01	27559,32	169,4842	170,0115	0,257922	0,005726	0,515844	-0,01145
180	169,78	28825,25	179,1836	180,0047	0,408191	0,002326	0,816382	-0,00465
190	173,53	30112,66	188,8316	189,973	0,584188	0,013497	1,168377	0,026994
200	177,28	31428,2	198,4796	199,9695	0,760186	0,015274	1,520371	0,030548
					0,32502	0,006531		

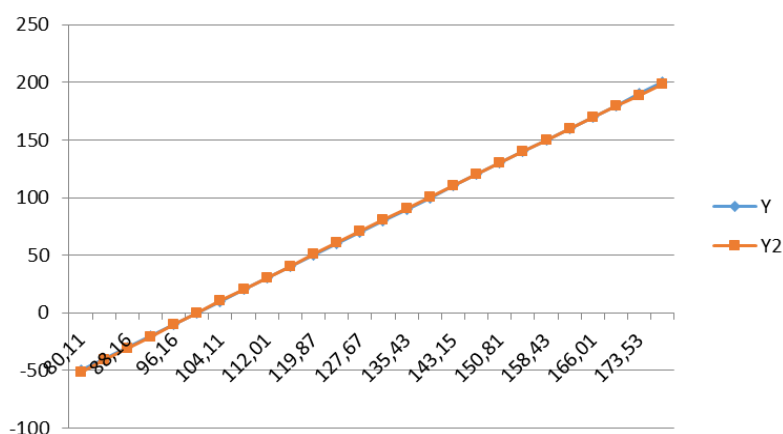


Рис. 2. Градуировочная кривая «образцового» термометра сопротивления ТП-198

Кривая, интерполированная полиномом второго порядка, позволяющая определять промежуточные значения температур с точностью до 0,001 °С (1). Градуировка датчиков производится на сборке рис. 3, а, б, включающий медный куб рис. 3, а позиция 1, образцовый платиновый термометр сопротивления ТП198 рис. 3, а позиция 2 градуируемыми термисторами в количестве 5 шт.

Полином 2 порядка для «образцового» термометра сопротивления ТП-198:

$$t [^{\circ}\text{C}] = -241,882 + 2,31532 \cdot R + 0,009 \cdot R^2 [\text{Ом}]. \quad (1)$$



Рис. 3. Общий вид сборки без теплоизолирующего покрытия (а):
 1 – термостатирующий медный куб (ребро 60 мм);
 2 – образцовый платиновый термометр сопротивления ТП 198;
 3 – прижимные планки с термисторами; 4 – внутренние прижимные планки с термометром сопротивления; 5 – функциональная плата термисторов.
 Вид сборки в составе элементов (б)

Градуировка производится в режиме охлаждения в течении длительного времени табл. 2. Результат визуализации градуировки показан на рис. 4 из которого видно, что кривые градуировки существенно отличаются от прямой линии в области реальных измерительных температур 20–50 °С, что требует достаточно аппроксимации показаний термисторов полиномом второго порядка (2)...(6) [3].

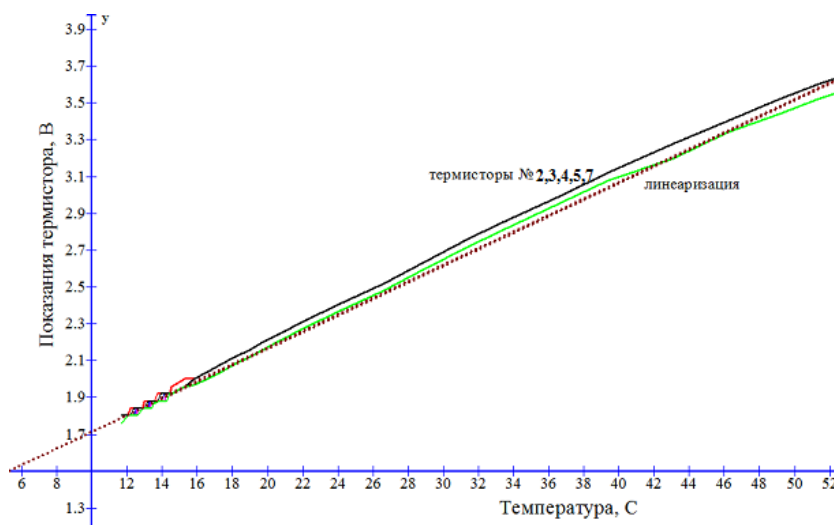


Рис. 4. Визуализация градуировки

Гради ровочная таблица термисторов сопротивлений при охлаждении

Время	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 7	ТП-198 № 14
20 °С 9:35	2,16	2,16	2,16	2,16	2,12	107,9642
Нагр.1 9:40	4,16	4,16	4,16	4,16	4,08	122,5497
Нагр.2 9:56	4,1	4,12	4,12	4,12	4,04	125,6243
Охл. 10:00	4	4,02	4,04	4,04	3,95	124,7574
10:05	3,92	3,92	3,96	3,96	3,87	123,988
10:10	3,84	3,88	3,88	3,88	3,8	123,2547
10:15	3,8	3,8	3,8	3,8	3,72	122,5169
10:20	3,72	3,72	3,72	3,72	3,64	121,6975
10:25	3,64	3,64	3,64	3,64	3,56	120,8548
10:30	3,6	3,6	3,6	3,6	3,52	120,3814
10:35	3,52	3,52	3,52	3,52	3,44	119,5224
10:45	3,4	3,4	3,4	3,4	3,34	118,3699
11:00	3,28	3,28	3,28	3,28	3,2	117,1588
11:15	3,12	3,12	3,12	3,12	3,08	115,7113
11:28	3	3	3	3	2,96	114,6688
11:47	2,84	2,84	2,84	2,84	2,8	113,2649
12:00	2,76	2,76	2,76	2,76	2,72	112,5687
12:17	2,64	2,64	2,64	2,64	2,6	111,6132
12:35	2,52	2,52	2,52	2,52	2,48	110,6838
12:48	2,4	2,4	2,4	2,4	2,36	109,6124
12:58	2,32	2,32	2,32	2,32	2,28	108,9314
13:08	2,24	2,24	2,24	2,24	2,2	108,2717
13:15	2,2	2,2	2,2	2,2	2,16	107,9616
13:20	2,16	2,16	2,16	2,16	2,12	107,6613
13:30	2,12	2,12	2,12	2,12	2,08	107,3336
13:40	2,08	2,08	2,08	2,08	2,04	107,0347
13:46	2,04	2,04	2,04	2,04	2	106,7121
13:55	2	2	2	2	1,97	106,425
14:03	1,96	1,96	2	1,96	1,96	106,1972
14:15	1,92	1,92	1,96	1,92	1,92	105,9006
14:17	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	105,8745
14:20	1,92	1,92	1,92	1,92	1,88	105,7923
14:22	1,92	1,88	1,92	1,92	1,88	105,7443
14:25	1,88	1,88	1,92	1,92	1,88	105,6771
14:30	1,88	1,88	1,92	1,88	1,88	105,5981
14:33	1,88	1,88	1,88	1,88	1,87	105,5138
14:37	1,88	1,88	1,88	1,88	1,84	105,4504
14:39	1,88	1,84	1,88	1,88	1,84	105,4165
14:42	1,84	1,84	1,88	1,88	1,84	105,3666
14:46	1,84	1,84	1,88	1,84	1,84	105,2948
14:49	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	105,2471
14:56	1,84	1,84	1,84	1,84	1,8	105,1437
14:59	1,84	1,8	1,84	1,84	1,8	105,1086
15:02	1,8	1,8	1,84	1,84	1,8	105,0588
15:09	1,8	1,8	1,84	1,8	1,8	104,9738
15:13	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	104,9252
15:32	1,8	1,76	1,8	1,8	1,76	104,7907

Полином 2 порядка для термистора № 2:

$$t_2 [^{\circ}\text{C}] = -12,94880 + 9,98292 \cdot V + 2,20210 \cdot V^2 \text{ [Вольт]}. \quad (2)$$

Полином 2 порядка для термистора № 3:

$$t_3 [^{\circ}\text{C}] = -12,72971 + 9,99107 \cdot V + 2,17056 \cdot V^2 \text{ [Вольт]}. \quad (3)$$

Полином 2 порядка для термистора № 4:

$$t_4 [^\circ \text{C}] = -15,98171 + 12,18044 \cdot V + 1,81436 \cdot V^2 \text{ [Вольт]}. \quad (4)$$

Полином 2 порядка для термистора № 5:

$$t_5 [^\circ \text{C}] = -14,8430 + 11,44056 \cdot V + 1,93149 \cdot V^2 \text{ [Вольт]}. \quad (5)$$

Полином 2 порядка для термистора № 7:

$$t_7 [^\circ \text{C}] = -14,32892 + 10,94965 \cdot V + 2,17968 \cdot V^2 \text{ [Вольт]}. \quad (6)$$

Полиномы термистора 2...5 сформированы в базу данных рис. 5 позиция 1, позволяющей произвольно выбирать требуемый термистор при формировании исходных данных рис. 4 позиция 3.

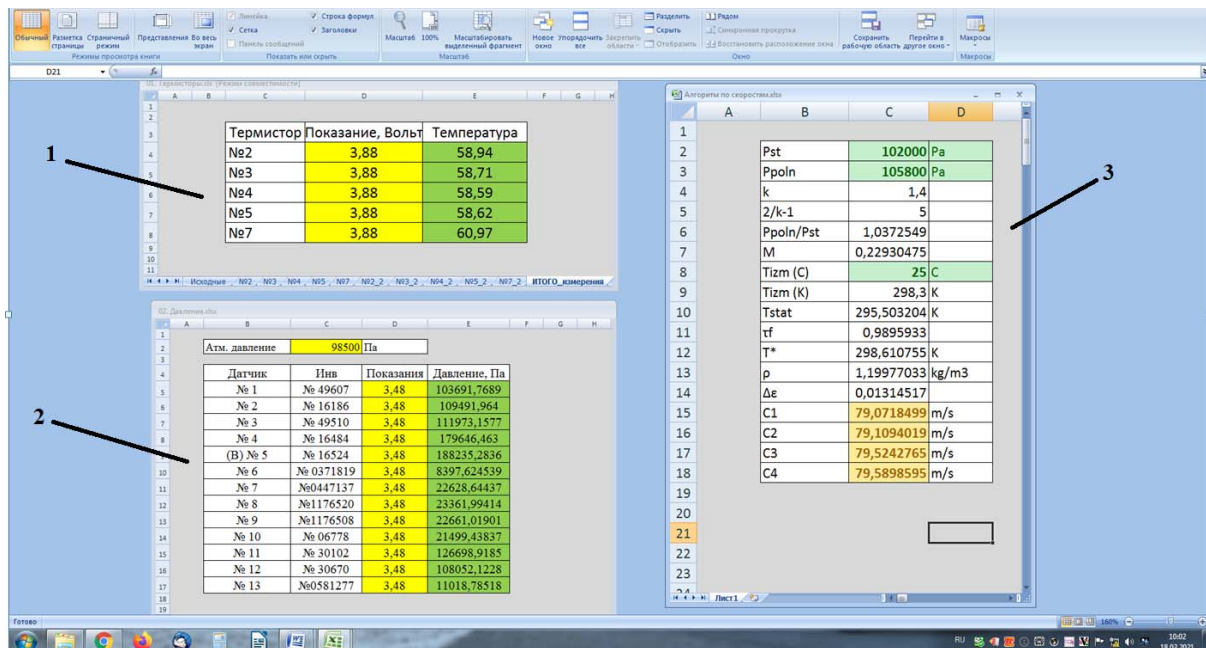


Рис. 5. Блок программ и обработки результатов измерений полей скоростей и давлений в проточной части микротурбин:

1 – панель управления базами данных термисторов; 2 – панель управления базами данных датчиками давлений; 3 – панель управления обработки данных измерений полей скоростей и давлений.

Позиция 2 рис. 5 представляет аналогичную базу данных для датчиков давлений ИКД 6 (как абсолютного давления, так и избыточного (дифференциального)).

Технология обработки данных заключается в следующей последовательности:

- в окне 1 рис. 5 выбирается требуемый (установленный) термистор, вбивается его показания, определяется температура и транслируется в окно 3 рис. 5 ячейку С8;
- выбирается датчик давления из базы данных окна 2 рис. 5, совмещенный с приемником статического давления, вбивается показание вольтметра, определяется давление в Па, далее транслируется в ячейку С2 окна 3 рис. 5;
- аналогично проводится манипуляция для приемника полного давления окно 2 рис. 5 в ячейку С3 окна 3 рис. 5.

Результаты служебных и окончательных расчетов позиционируются в ячейки С4-С18 окна 3 рис. 5. В ячейках С15-С18 окна 3 рис. 5 выводятся результаты скоростей рассчитанных по различным методикам [2].

Вывод: проведенные градуировки на базе индикации данных термисторов сопротивлений, с точность до 0,001 °С, позволили сформировать, совместно с базой данных датчиков давлений, измерительно расчетный алгоритм, позволяющий оперативно формировать лабораторную или исследовательскую систему измерений параметров потока в проточной части микротурбин, с учетом приемников давления $d = 0,8$ мм и измерительных термисторов $d = 1,5$ мм [1].

Библиографические ссылки

1. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М. : Энергоатомиздат, 1990. 423 с.
2. Сравнительный анализ методик обработки результатов измерений в контрольном сечении турбулентно-газового потока / А. А. Кишкин, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко, О. В. Шилкин, Е. Н. Луговой // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. С. 6–13.
3. Кишкин А. А., Назаров В. П., Жуйков Д. А., Черненко Д. В. Теория пространственного пограничного слоя в гидродинамике турбомашин : монография. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. 2013. 250 с.

© Кишкин А. А., Делков А. В., Шевченко Ю. Н.,
Шилкин О. В., Павленко П. А., 2021

УДК 621.923.01

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ
ПОТОКОМ РАБОЧЕЙ СРЕДОЙ ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТИ**

В. А. Левко, 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

Рассмотрен современный уровень моделирования процесса обработки абразивным потоком. Описаны недостатки моделей, используемых для теоретического описания процесса обработки абразивным потоком. Особое внимание уделено особенностям процесса обработки абразивным потоком рабочей средой высокой вязкости. Предложен подход, позволяющий повысить надежность результатов моделирования данного процесса.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, моделирование, рабочая среда высокой вязкости.

1. Введение

В мировой практике машиностроительного производства все большее применение находит метод обработки абразивным потоком рабочими средами, способными к вязкоупругим деформациям.

Этот способ применяется для финишной обработки труднообрабатываемых внутренних деталей из различных материалов, таких как сплавы цветных металлов (алюминий, медь), суперсплавы, керамика, тугоплавкие материалы, карбиды, полупроводники, кварцы, композиты и т. д. [1].

Основной характеристикой рабочей среды является вязкость, которая определяет ее реологические свойства. Величина вязкости обусловлена свойствами основы (полимерного носителя), процентным соотношением весового содержания абразивных зерен по отношению к полимерному носителю, типом и зернистостью абразива, а также наличием различных добавок.

Для теоретического описания и моделирования отдельных составляющих данной технологии применяются положения гидравлики, реологии полимеров, трибологии, технологии машиностроения. Однако при моделировании обработки абразивным потоком рабочими средами высокой вязкости не учтен ряд особенностей. Моделирование процесса обработки на основе уравнений течения неньютоновских сред в каналах с поперечным сечением, постоянным по длине, для рабочих сред высокой вязкости дает большое расхождение между теоретическими и экспериментальными величинами значений скорости и давления потока среды. Для каналов с переменным поперечным сечением это расхождение становится еще большим.

2. Модели, используемые для теоретического описания процесса обработки абразивным потоком

Моделированию процесса обработки абразивным потоком посвящено множество работ. Проведенный анализ установил основные направления моделирования.

Первоначальные исследования были направлены на установление эмпирических зависимостей шероховатости обработанной поверхности и величины снимаемого слоя от таких выходных факторов – давление сдвига, вязкость рабочей среды, зернистости и вида абразивного наполнителя.

В дальнейшем, направления исследований были конкретизированы, как по типу обрабатываемых деталей, так и по материалам, из которых они изготовлены.

Описаны эмпирические зависимости обработки абразивным потоком таких материалов, как различные виды сталей (конструкционные, углеродистые, легированные и высоколегированные), сплавы алюминия, сплавы меди, сплавы титана. Ряд работ был посвящен обработке абразивным потоком углерод-углеродных композитов, специальных сплавов типа *Inconel 600*, чугуновых сплавов с шаровидным графитом.

Были получены эмпирические зависимости обработки деталей типа зубчатых колес, твердосплавных пластин, режущего инструмента, крыльчаток насосов, пресс-форм, различных матриц и сопел, а также внутренних поверхностей труб, волноводов и отверстий малых диаметров.

Многокритериальная оптимизация процессов обработки абразивным потоком была проведена с использованием полиномиальных нейронных сетей, корреляционных нейронных сетей, а также генетических алгоритмов.

Особое внимание было уделено моделированию структуре обработанной поверхности, процессам износа и механизма удаления материала. Ряд работ рассматривал тепловые процессы, возникающие при контакте абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью с точки зрения тепловыделения и теплопереноса. Исследованы явления акустической эмиссии, сопровождающей процесс обработки абразивным потоком.

Еще одним направлением теоретического обоснования процесса обработки абразивным потоком является моделирование сил, возникающих при обработке, а также условий контакта абразивных зерен с неровностями обрабатываемой поверхности.

Рассмотренные модели удаления материала единичным абразивным зерном обладают существенным недостатком. В них единичное абразивное зерно в контакте имеет только одну режущую кромку. В действительности, абразивное зерно представляет собой многолезвийный инструмент, воздействующий на обрабатываемую поверхность, как по фактической площади контакта (режущими кромками), так и по контурной площади контакта (зерно в целом).

Рассмотрение публикаций, посвященных моделированию составов рабочих сред и их вязкости, процессов течения абразивного потока выявил ряд проблем. Так, при использовании обобщенной модели Максвелла моделирование потока среды при обработке абразивным потоком решено с применением стационарных неупругих уравнений Навье-Стокса [2]. В результате выявлены существенные расхождения расчетных и экспериментальных скоростей и давлений потока рабочей среды.

Применение уравнений Навье-Стокса для неньютоновских сред дает удовлетворительные результаты исключительно при теоретическом описании обработки рабочими средами низкой вязкости [3; 4]. Модель течения в этом случае основана на перепаде давления в обрабатываемой детали.

Анализ ряда работ [5; 6], направленных на разработку теоретических моделей расчета нормального давления на внутренней поверхности круглой трубы и скорости скольжения стенки при обработке абразивным потоком, в случае применения высоковязких рабочих сред, дают серьезные расхождения с экспериментальными наблюдениями.

Для описания обработки средами высокой вязкости необходимо дать оценку реологических свойств среды – температурную зависимость вязкости, аномалию вязкости при установившемся течении, зависимость вязкости от молекулярной массы среды, влияние релаксационных свойств текучей рабочей среды и нормальные напряжения, возникающие при сдвиге рабочей среды.

Особенности процесса обработки абразивным потоком рабочими средами высокой вязкости требуют особого подхода к моделированию данного процесса.

Этот подход должен быть основан на моделировании процесса на трех уровнях. На первом уровне моделируется процесс течения наполненной рабочей среды как абразивного инструмента в осесимметричном канале. При этом в качестве условия принимается возникновение в потоке абразивной среды линий тока. В каждой линии тока формируется силовая абразивная цепочка. В результате моделирования получается распределение напряженно-деформированного состояния потока в обрабатываемом канале (нормальные и касательные напряжения потока).

На втором уровне моделируется движение единичного зерна в силовой абразивной цепочке. Оно позволяет теоретически рассчитать силы резания, возникающие в результате контакта единичного абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью.

На третьем уровне рассматривается контакт микровыступа абразивного зерна с микровыступом обрабатываемой поверхности. Для моделирования на этом уровне возможно применение подобных моделей, которые были предложены разными исследователями.

Разработка теоретических основ процесса обработки абразивным потоком на трех предложенных уровнях, позволит существенно увеличить точность результатов моделирования данной технологии.

Заключение.

Рассмотрен современный уровень моделирования процесса обработки абразивным потоком с точки зрения повышения ее надежности и производительности. Предложенный подход, учитывает особенности процесса и осуществляет моделирование на трех уровнях представления, тем самым повышает надежность и точность результатов расчета.

Библиографические ссылки

1. Kumar S. S., Hiremath S. S. A Review on Abrasive Flow Machining (AFM) // *Procedia Technology* Vol. 25, 2016, P. 1297–1304 .
2. Uhlmann E., Schmiedel C., Wendler J. CFD Simulation of the Abrasive Flow Machining Process // 15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (15th CMMO): *Procedia CIRP*. 2015, Vol. 31, P. 209–214. DOI: doi:10.1016/j.procir.2015.03.091.
3. Wang T., Chen D., Zhang W., An L. Study on key parameters of a new abrasive flow machining (AFM) process for surface finishing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, Vol. 101, Issue 1–4, P. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2914-9>.
4. Zhu L. F., Wang K., Wu H., Xiu D., Sun L. Z., Research on the Methods for Common-Rail Pipe Holes Abrasive Flow Machining // *Applied Mechanics and Materials*. 2015, Vol. 721, P. 122–126. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.721.122>.
5. Wu M. Y., Gao H. The Research of Extruded Pressure Auto-Adjustment Method in Abrasive Flow Polishing // *Advanced Materials Research*. 2014, Vol. 1027, P. 203–207. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1027.203>.
6. Dash R., Maity K. Simulation of abrasive flow machining process for 2D and 3D mixture models // *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 10. Issue 4. P. 424–432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0366-6>.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КОЛЕС НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Е. К. Васильева, Е. А. Жирнова, И. В. Трифанов

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

Проанализирован опыт и перспективы совершенствования инструментального контроля колес на основе анализа измерительных систем. Исследовано влияние несоответствующих средств измерений и порядок управления ими.

Ключевые слова: надежность, измерительная система, инструментальный контроль, колесо.

В настоящее время чаще, чем когда-либо раньше, используются измерения. Они являются необходимостью при принятии решения о необходимости регулировки производственных процессов. Статистика данных сравнивается со статистическими контрольными пределами для выявления статистической управляемости или неуправляемости процесса. Измерения имеют место быть во всех сферах жизни: в медицине, производстве, товарообороте, промышленности. В Российской Федерации степень достоверности измерительных материалов обеспечивается федеральным законом «Об обеспечении единства измерений» [1], нормативно-технической и законодательной базой метрологической инфраструктуры.

Инструментальный контроль сложных технических изделий является процедура включающая применение различных средств измерений, контроля технических характеристик согласно нормативно-технической документации. Важной проблемой получения достоверной информации является обеспечение качества измерений. В международной практике для доказательства достоверности измерительной информации широкую сферу применения имеет Measurement System Analysis (далее – MSA) – анализ измерительных систем. MSA способен минимизировать риск того, что несоответствия в элементах измерительной системы способны привести к ухудшению качества и безопасности продукции. Анализ измерительной системы рецензирует ее способность обеспечивать адекватность информации для конкретного процесса и обычно проводится до начала измерений.

Использование метода анализа измерительных систем является обязанностью для технических объектов автомобилестроения [2]. Для предприятий, осуществляющих свою деятельность в других отраслях, этот метод может быть возможностью улучшения всех процессов системы менеджмента качества, а также способом осуществления принципа менеджмента качества – подход, основанный на свидетельствах [3; 4].

Целью данной работы является исследования методов повышения надежности инструментального контроля на основе анализа измерительных систем на примере применяемых в автомобилестроении литых колес.

Для достижения данной цели необходимо:

- рассмотреть понятие измерительной системы, ее роль в обеспечении надежности технологических процессов;
- проанализировать требования к стабильности, сходимости, воспроизводимости, смещению и линейности измерительной системы;

- рассмотреть линейно-угловые параметры инструментального контроля колес;
- разработать план контроля и алгоритм анализа измерительных систем;
- исследовать влияние несоответствующих средств измерений и разработать порядок управления ими.

Измерительная система в своем составе содержит : средство измерения СИ, персонал, методику измерений, измеряемый объект, программное обеспечение, выполняемые операции, окружающую среду, часто влияющая на колебания измеряемого параметра [2]. Анализ измерительной системы дает оценку ее способности обеспечивать конгруэнтность данных для конкретного процесса и должен быть проведен до начала измерений.

Если изменчивость измерительной системы много больше по сравнению с изменчивостью от деталей к деталям, измерения не могут дать полезной информации. Измерительная система должна адекватно различать детали для эффективного мониторинга процесса.

В рамках анализа принято рассматривать такие характеристики измерительной системы, как: стабильность, воспроизводимость, смещение, сходимость, линейность (рис. 1) [5].

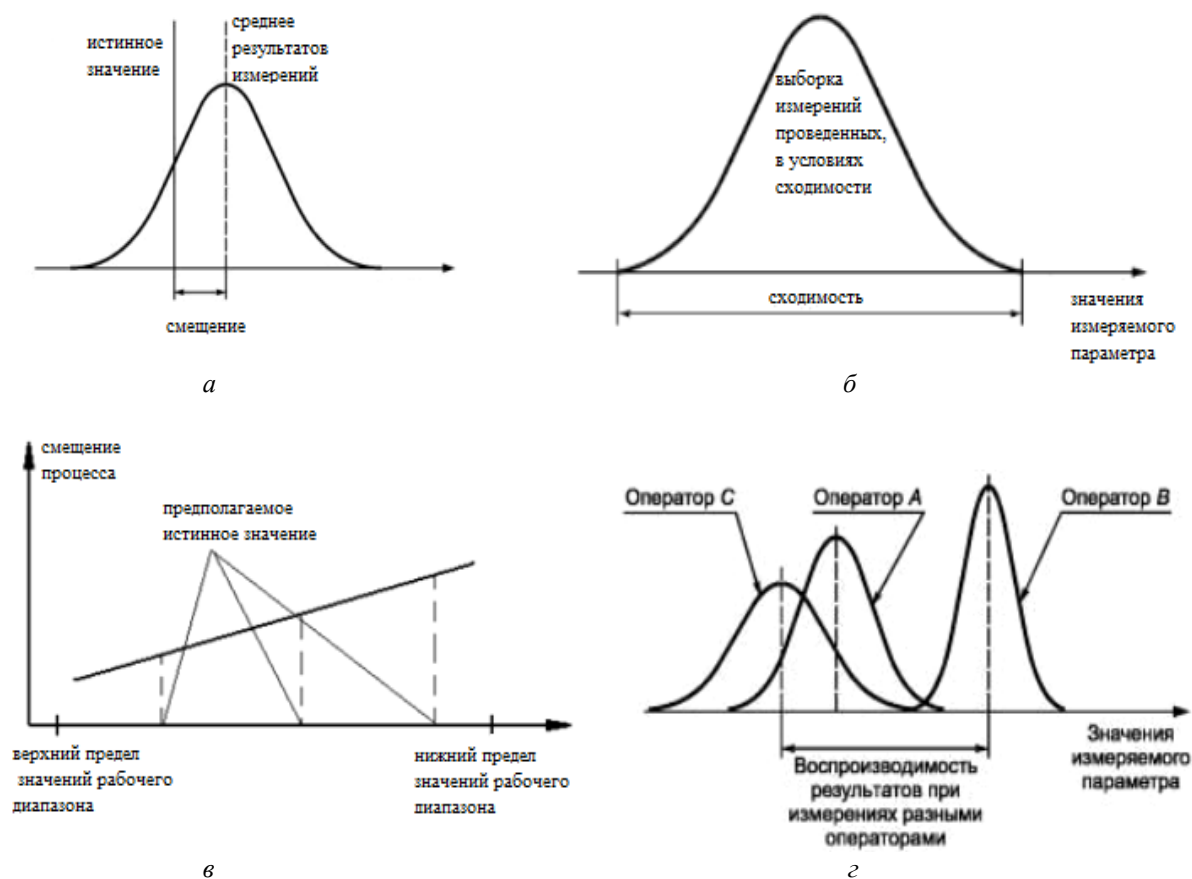


Рис. 1. Характеристики измерительной системы:
а – смещение; б – сходимость; в – линейность; г – воспроизводимость

В рамках данной работы рассматриваются инструментальный контроль колес литых и их линейно-угловых размеров, который проводится согласно эскизу (рис. 2, 3).

В соответствии с чертежом разрабатываем план управления (таблица 1), где устанавливаем оборудование, характеристики изделия, требования, методы оценки измерения, методы контроля, план реагирования.

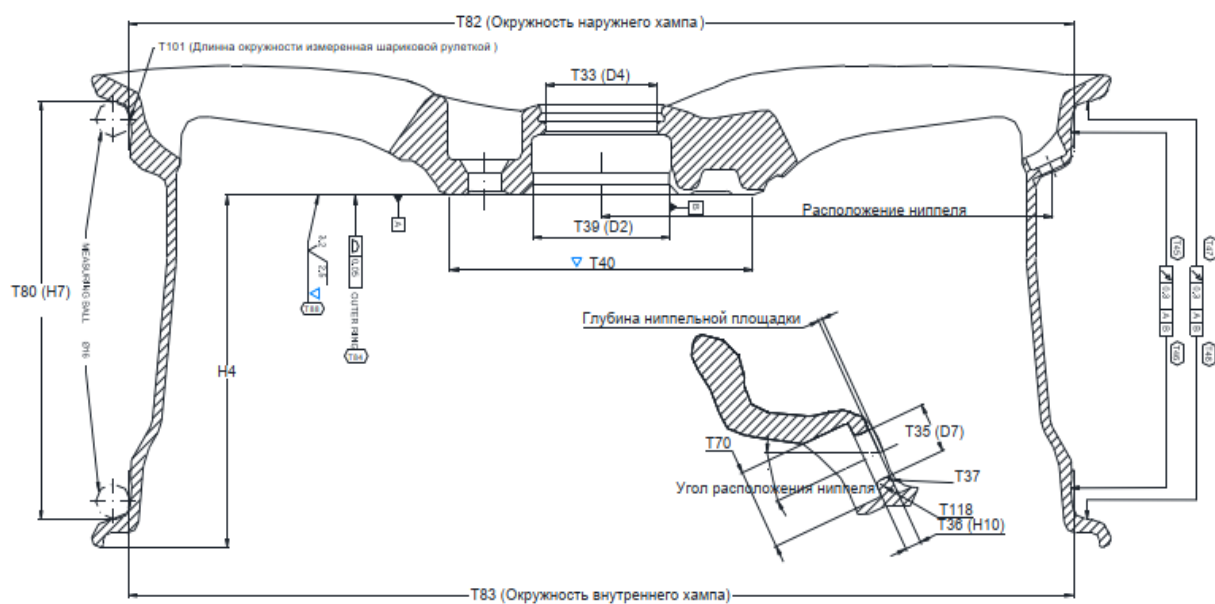


Рис. 2. Эскиз контроля размеров колеса

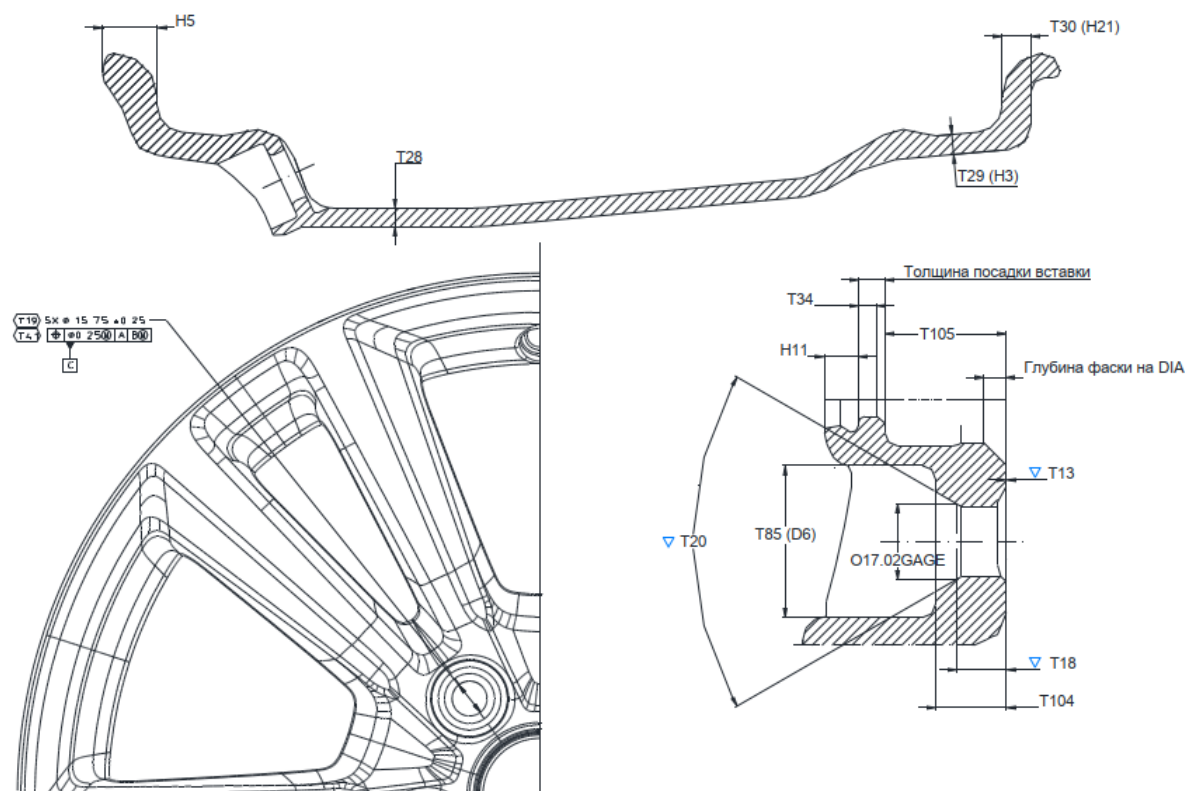


Рис. 3. Эскиз контроля размеров колеса

План управления

Название процесса	Оборудование	Характеристики изделия	Допуск на изделие	Метод оценки измерения	Выборка		Метод контроля	План реагирования
					Размер	Частота		
Инструментальный контроль колес	Участок инструментального контроля	Внешний вид	По эталонам	Визуальный	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Диаметр D2	$\varnothing 63,34 \pm 0,03$ мм	Визуальный	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Диаметр D4	$\varnothing 51,5 \pm 0,03$ мм	Визуальный	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Диаметр D5-1, D5-2, D5-3, D5-4, D5-5	$5 \times \varnothing 15,75 \pm 0,25$ мм	Нутромер индикаторный НИ50-100	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Диаметр D7	$\varnothing 11,5 \pm 0,2$ мм	Калибр пробка LK V 15 10 8	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Диаметр D6	$\varnothing 34,3 \pm 0,4$ мм	LK V 15 10 8	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Размер Н4	$161,25 \pm 1,0$ мм	LK V 15 10 8	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Размер Н5	$13,3 \pm 0,3$ мм	LK V 15 10 8	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Размер Н7	$190,5 \pm 1,5$ мм	Штангенциркуль ЩЦ-II-250-0.1	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Размер Н10	$3,7 \pm 0,25$ мм	Штангенциркуль ЩЦЦ-150-0.01	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Размер Н11	$8,2 \pm 0,3$ мм	Штангенглубиномер ШГЦ-300-0.0	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка
		Диаметр ступицы	$\varnothing 140 \pm 0,3$ мм	LK V 15 10 8	2 колеса	Каждая партия	Маршрутная карта	Изолировать, 100 % разбраковка

Проводим анализ измерительных систем в соответствии с алгоритмом приведенным на рис. 3.

Если при анализе измерительных систем выявляется несоответствующее средство измерения, применяют порядок действий, представленный на рис. 4.

Применение анализа измерительных систем способствует повышению надежности инструментального контроля колес. Анализ измерительных систем обеспечивает достоверность и способствует повышению надежности готовой продукции, способен воплотить в жизнь минимизацию риска того, что полученные решения при контроле продукции будут ложными, предотвращает риск возникновения бракованной продукции и получения недостоверной измерительной информации

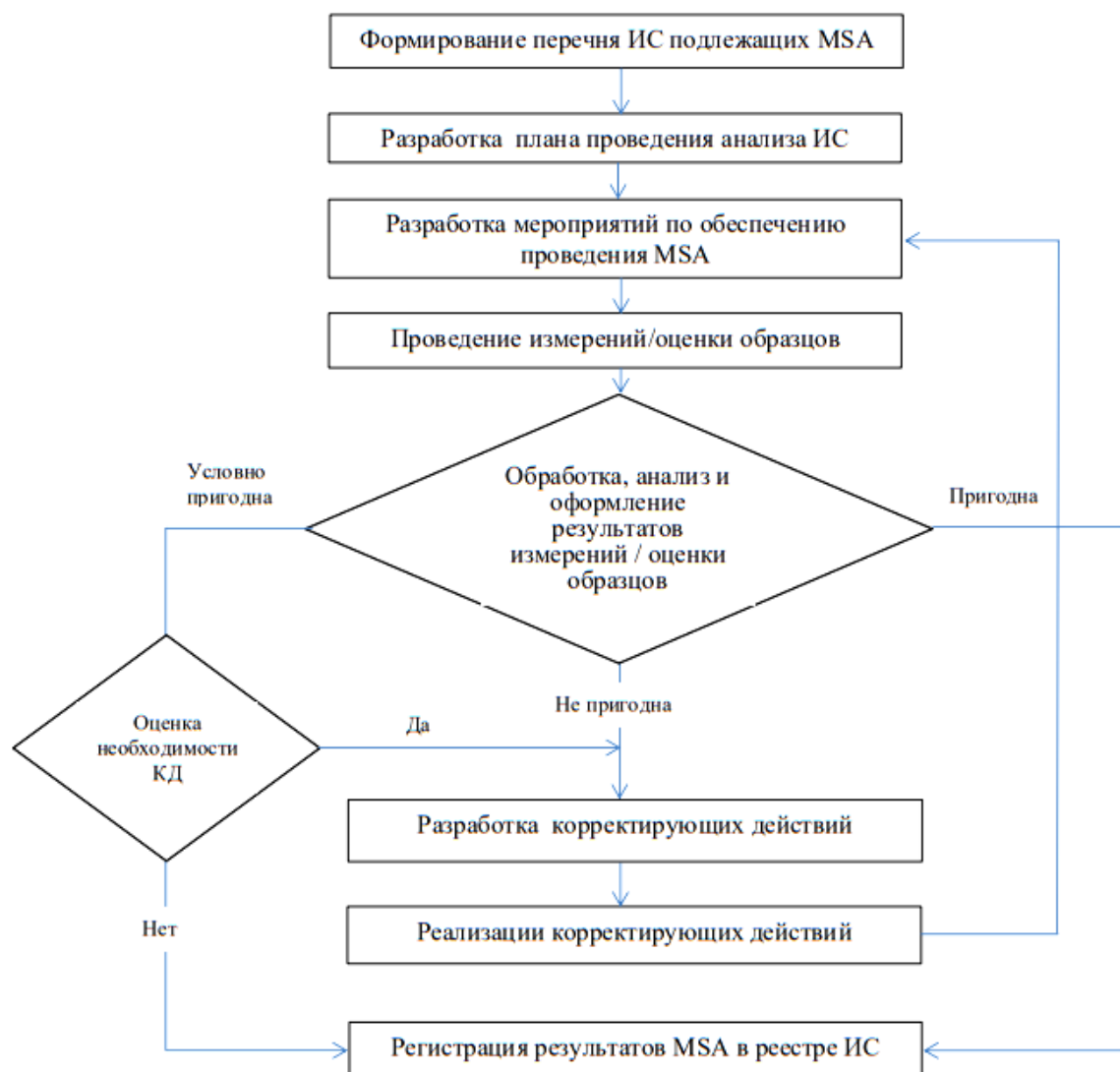


Рис. 3. Алгоритм анализа измерительных систем

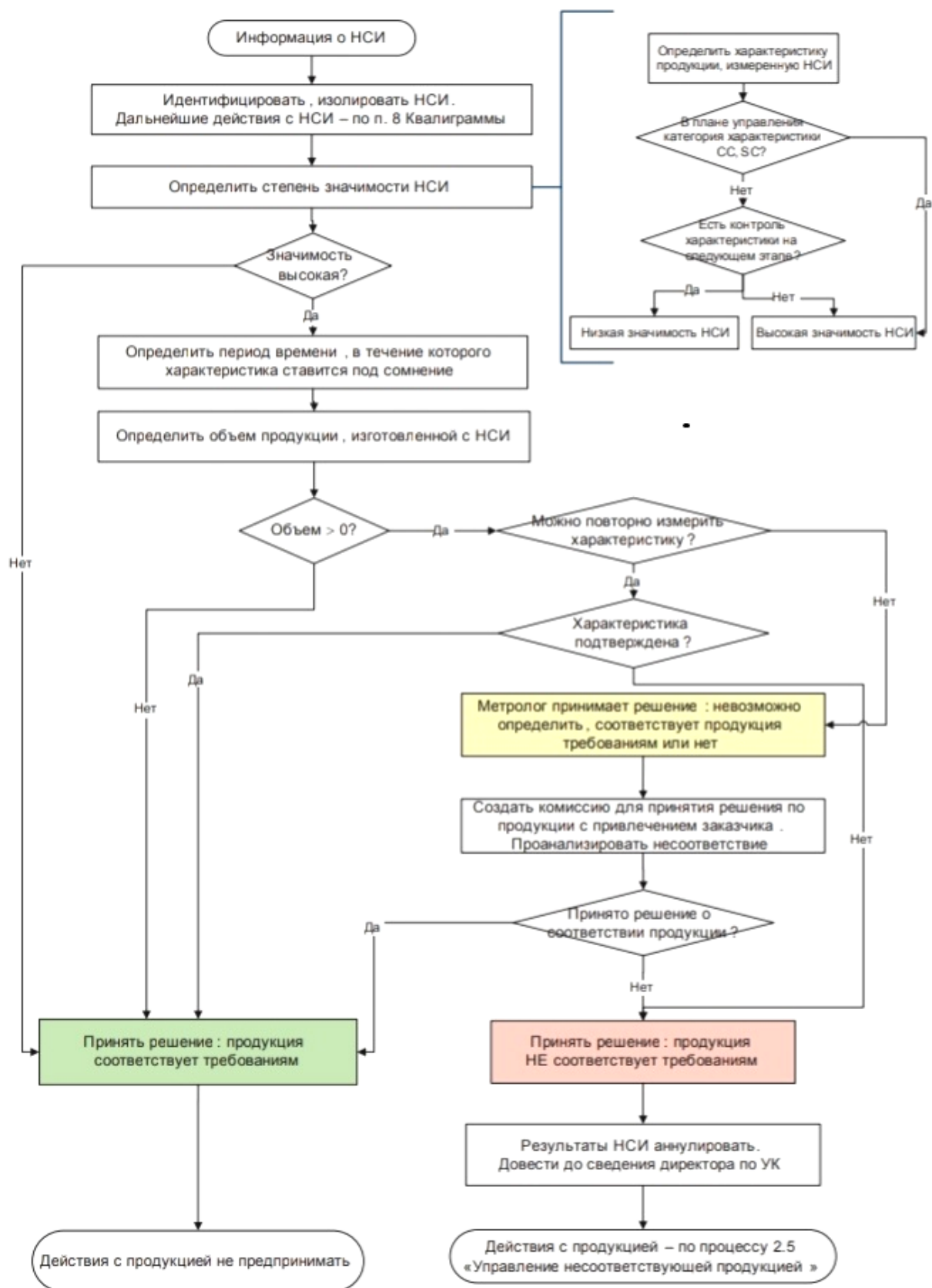


Рис. 4. Порядок действий при выявлении несоответствующих средств измерений

Библиографические ссылки

1. Об обеспечении единства измерений : федер. закон № 102. М., 2008.
2. ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. М. : Изд-во стандартов, 2006.
3. ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М. : Изд-во стандартов, 2015.
4. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. М. : Изд-во стандартов, 2015.
5. Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики [Электронный ресурс] : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина ; ред. коллегия: Н. К. Казанцева (гл. ред.) [и др.]. Екатеринбург, 2020. Ежегодно. URL: <https://youthscience.urfu.ru/ru/konferencii/materialy-konferencii/cbornik-ii/> (дата обращения: 22.02.2021).

© Васильева Е. К., Жирнова Е. А., Трифанов И. В., 2021

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

М. С. Руденко, А. В. Гирн, 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

Антифрикционные покрытия из меди и латуни успешно нанесены методом магнетронного распыления. Испытания на машине торцевого трения определили коэффициенты трения образцов без покрытия и с тонким антифрикционным покрытием.

Ключевые слова: магнетронное распыление, антифрикционные покрытия, трибология.

Космическая трибология – одно из современных направлений в области исследований процессов трения, смазки и износа, протекающих в условиях открытого космического пространства [1]. Его появление и развитие обусловлено целым рядом практических задач по обеспечению требуемого ресурса и надежности работы космических аппаратов.

Многие узлы трения орбитальной техники – подшипники, зубчатые и фрикционные передачи, резьбовые соединения, направляющие скольжения и контактные уплотнения – работают вне герметизированных отсеков [2]. Трение в этих узлах происходит в вакууме, невесомости (микрогравитации), при значительных перепадах температуры (170...420 К), воздействии ионизирующего и ультрафиолетового излучения, бомбардировке заряженными и нейтральными частицами и т. п. [3]. В таких условиях механизмы трения и изнашивания существенно отличаются от наземных, что не позволяет использовать традиционные инженерные решения для обеспечения необходимых характеристик и параметров надежности узлов трения.

Тем не менее, смазочные и антифрикционные материалы совершенно необходимы для обеспечения работоспособности механизмов любого космического аппарата, имеющего на борту узлы трения. Условия работы пар трения данного корабля характеризовались широкими диапазонами рабочих температур (от –130 до +500 °С) и удельных нагрузок (до 200 МПа). Давление воздуха изменялось в пределах от 0,1 МПа до глубокого космического вакуума. Эти экстремальные условия создают значительные трудности при выборе вида смазки для трущихся пар. Решением данной проблемы могут быть тонкопленочные антифрикционные металлические покрытия. Тонкие пленки нанесенные методом магнетронного распыления могут увеличить время износа изделия в несколько раз [4]. Методом магнетронного распыления можно обеспечить тонкие пленки высокого качества без капельной фракции.

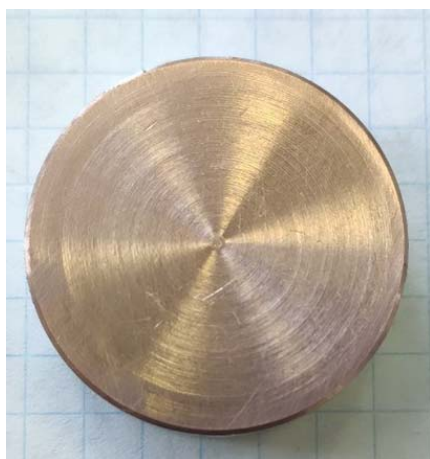
В качестве материала подложки был выбран алюминиевый сплав (АМг-6) и титановый сплав (ВТ-1), так как они являются основными конструкционными материалами. В качестве антифрикционного покрытия были выбраны материалы из меди и латуни.

Тонкопленочное антифрикционное покрытие наносилось PVD-методом в вакуумной камере УВМ-1200D, мишень с материалом покрытия распылялась магнетронной системой APEL-MR 95-125.

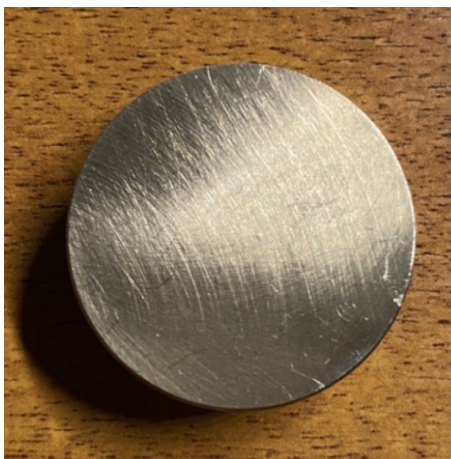
Режимы нанесения покрытия приведены в табл. 1. Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления $2 \cdot 10^{-2}$ Па. Перед напылением подложка подвергалась ионно-плазменной очистке в течение 5 мин.

Режимы магнетронного распыления антифрикционного покрытия

№	Материал мишени	Материал подложки	Давление начала работы $P_{\text{нач}}$, Па	Ионная очистка			Магнетронное распыление						
				Напряжение ионного источника U_i , кВ	Расход газа (Ar) P_i , л/час	Время очистки t_i , мин	Мощность W , кВт	Расход газа P_m (Ar), л/час	Рабочее давление напыления P , Па	Время напыления t_m , мин	Режим	Напряжение U_m , В	Сила тока I_m , А
1	Медь	АМг-6, ВТ-1	$2 \cdot e^{-2}$	1,1	0,72	5	1	6	2,5–2,9	5	AS	512	1,95
2	Латунь		$2 \cdot e^{-2}$	1,1	0,72	5	1	6	3,0–3,2	5	AS	518	1,2



a



б

Рис. 1. *a* – подложка – титан, покрытие – медь;
б – подложка – алюминий, покрытие – латунь

Для определения коэффициента трения антифрикционных покрытий используется разработанная машина торцевого трения, схема которой изображена на рис. 2. Установка позволяет определять триботехнические характеристики конструкционных и смазочных материалов в условиях трения. На валу закреплен верхний испытуемый образец (контртело). В контакте с ним находится нижний подопытный образец, установленный в обойме. Нагрузка на образцы создается плунжером и системой рычагов с грузами на подвесе. Во время испытаний обойма с нижним образцом, увлекаемым силой трения, создает силу, изгибающую тензометрическую балку. Далее сигнал с тензодатчика поступает и преобразуется на драйвере тензодатчиков НХ711, обрабатывается и регистрируется микроконтроллером ATMEGA 328P в составе платы Arduino Uno, после чего данные в удобном для текущего и последующего анализа виде выводятся на экран компьютера.

Первоначально испытанием трением подвергались образцы из алюминиевого сплава АМг-6 и титанового сплава ВТ-1. В качестве материала контртела применялась закаленная (65 HRC) сталь У8. На рис. 3, а, б приведены графики зависимости коэффициента трения от времени для алюминия и для титана соответственно.

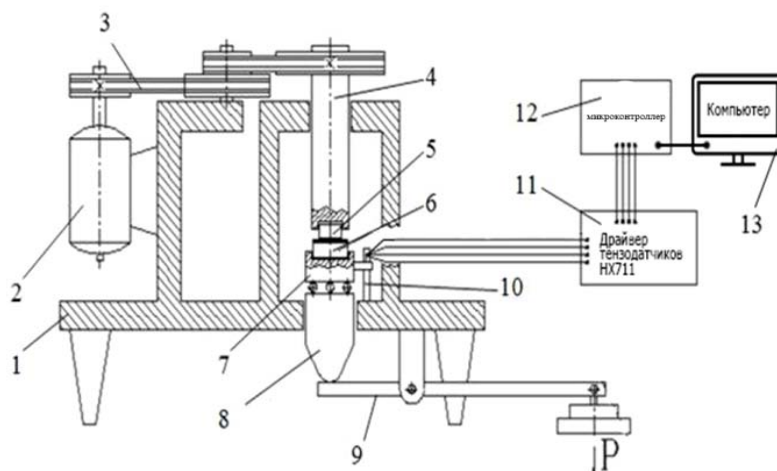
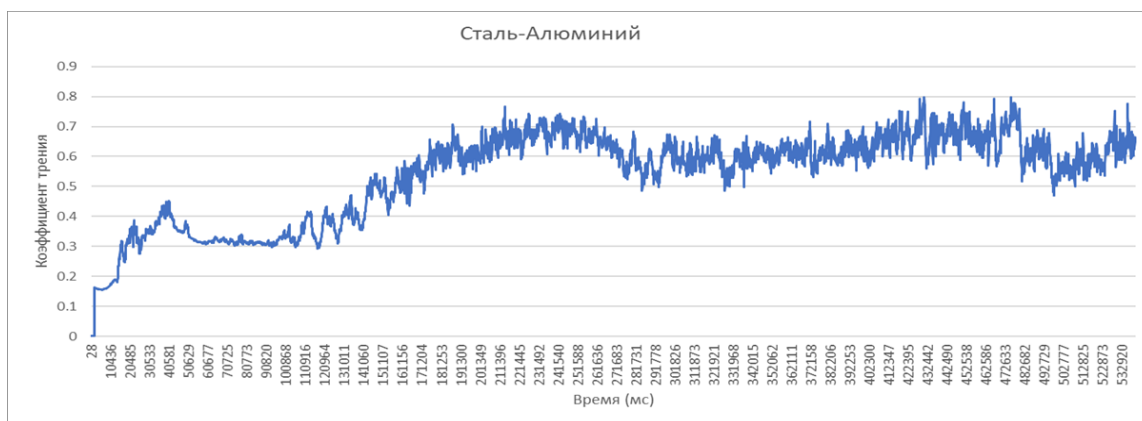
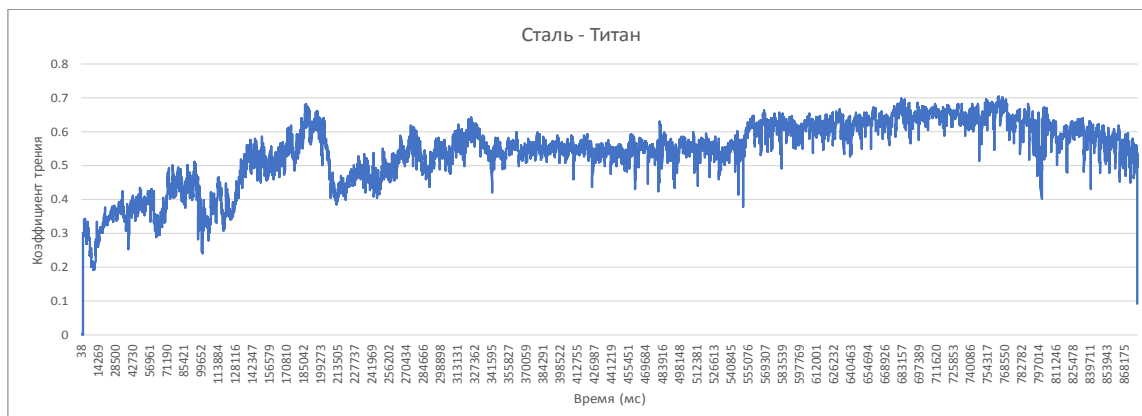


Рис. 2. Схема машины торцевого трения:

- 1 – стол; 2 – электродвигатель; 3 – ременная передача; 4 – вал; 5 – контртело;
6 – образец; 7 – обойма; 8 – плунжер; 9 – система рычагов; 10 – тензометрическая балка;
11 – драйвер тензодатчиков НХ711; 12 – микроконтроллер; 13 – компьютер



а

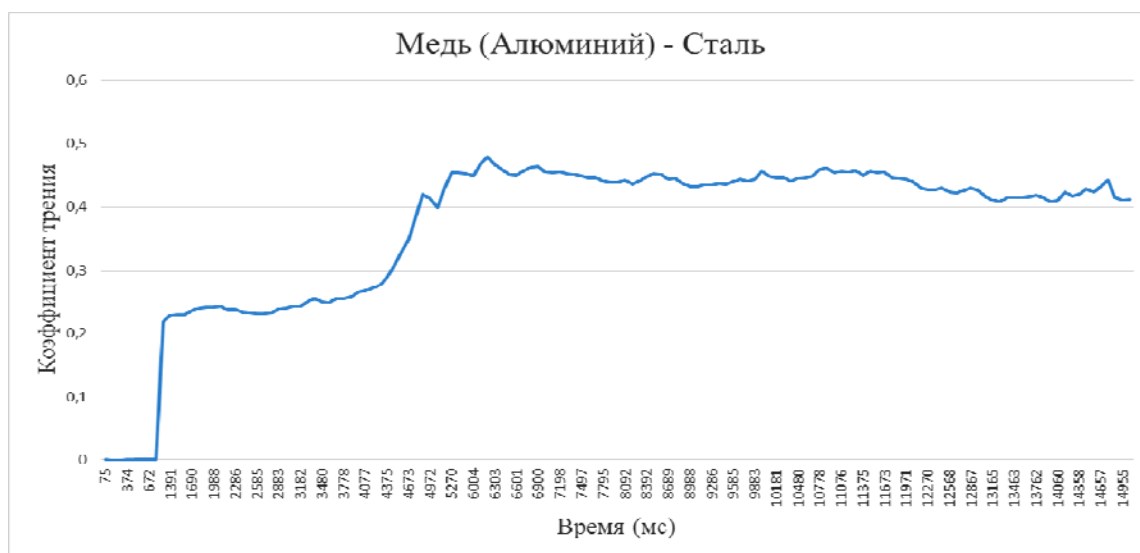


б

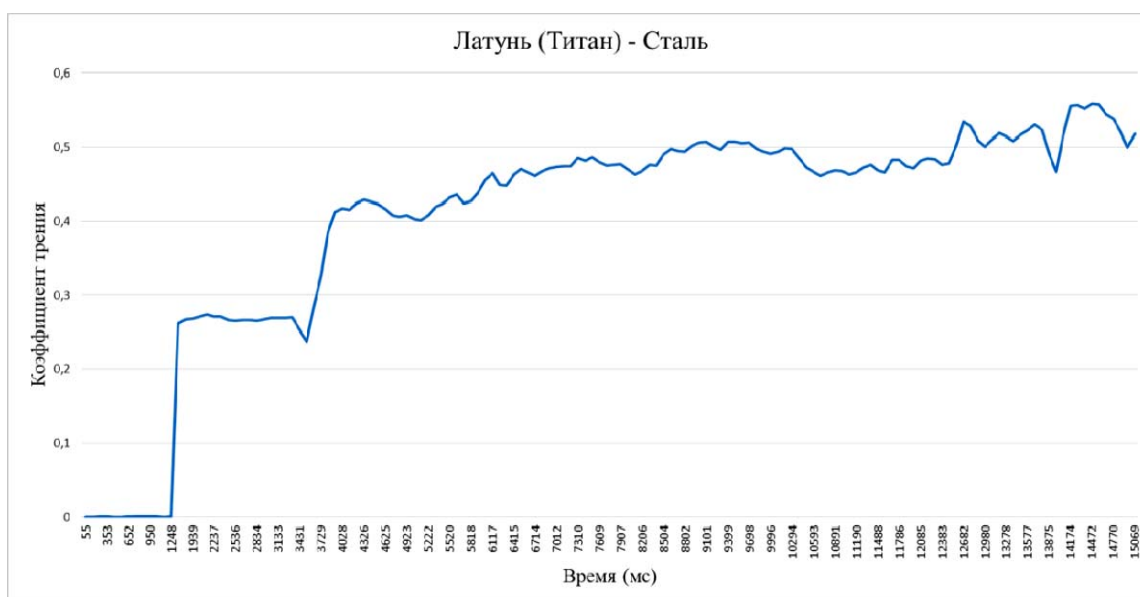
Рис. 3. Зависимость коэффициента трения пары:
а – «контртело – образец АМг6»; б – «контртело – образец ВТ-1»

Испытание образцов без покрытий показывает, что средний коэффициент трения для пары «контртело – образец АМг-6» составляет $k = 0,6$, а для пары «контртело – образец ВТ-1» $k = 0,55$.

На рис. 4, а, б приведены графики зависимости коэффициента трения от времени для медного покрытия и покрытия из латуни соответственно. Испытания определили, что средний коэффициент трения для медного покрытия составляет $k = 0,22$, для латуни $k = 0,28$.



а



б

Рис. 4. Зависимость коэффициента трения пары:
а – «контртело – образец медь (АМг-6)»; б – «контртело – образец латунь (ВТ-1)»

Как видно на обоих графиках, в определенный момент происходит резкое возрастание коэффициента трения, что говорит о том, что нанесенное антифрикционное покрытие разрушилось. При данной конфигурации использовавшейся машины трения, медное покрытие и покрытие из латуни разрушаются через 4 секунды испытания.

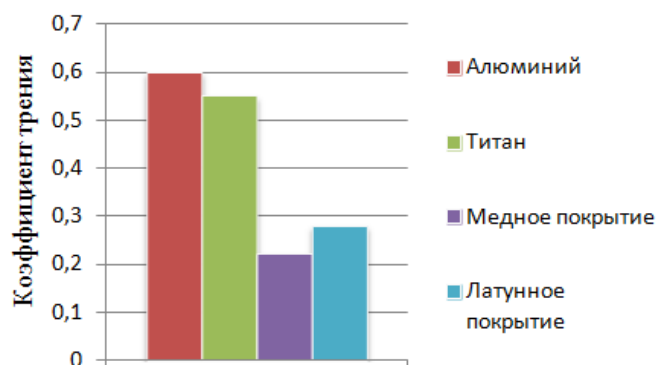


Рис. 5. Коэффициенты трения исследуемых образцов

На рис. 5 приведена сравнительная диаграмма коэффициентов трения исследуемых материалов. Как видно, медное покрытие обладает самым низким коэффициентом трения. Тем не менее, что медное покрытие, что покрытие из латуни существенно снижают коэффициенты трения исходных материалов – алюминия, титана и углепластика.

В результате антифрикционные покрытия из меди и латуни были успешно нанесены методом магнетронного распыления. Испытания на машине торцевого трения определили коэффициенты трения образцов без покрытия и с тонким антифрикционным покрытием. Покрытие из меди и латуни уменьшает коэффициент трения в 2–2,5 раза, по сравнению с образцами без покрытия.

Библиографические ссылки

1. Wyn-Roberts D. New frontiers for space tribology – Tribology International Vol. 23, Issue 2, April 1990, P. 149–155.
2. Scott B. Nokleby – Singularity analysis of the Canadarm2 – Mechanism and Machine Theory Vol. 42, Issue 4, April 2007, P. 442–454.
3. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н. Трение и износ в экстремальных условиях // Трение и износ в экстремальных условиях : справ. М. : Машиностроение, 1986.
4. Maurer C., Schulz U. Erosion resistant titanium based PVD coatings on CFRP – Wear 302 (2013), 937–945.

© Руденко М. С., Гирн А. В., Михеев А. Е., 2021

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. А. Амельченко, М. А. Григорьев, 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: grigorev94@mail.ru

Рассмотрена технология проектирования и изготовления мелкоразмерного осевого инструмента из твердых сплавов. Проведены испытания монолитного твердосплавного режущего инструмента при изготовлении изделий РКТ. Дана оценка работоспособности и надежности инструмента в производственных условиях при обработке термоупрочненных конструкционных сталей для штамповой оснастки.

Ключевые слова: изготовление инструмента, труднообрабатываемые материалы, твердый сплав, обработка отверстий, сверление, оценка качества поверхности.

В производстве изделий ракетно-космической техники (РКТ) весомую долю трудоемкости занимает механическая обработка. При этом большинство особо ответственных деталей изготавливаются из труднообрабатываемых жаропрочных сталей, алюминиевых и титановых сплавов, а также композиционных материалов. Высокая сложность, точность и качество выпускаемых изделий требует применения объемной фрезерной и токарной обработки с использованием современного высокотехнологичного оборудования [1]. Эффективность использования такого оборудования в значительной степени зависит от стойкости и надежности применяемого режущего инструмента.

Функциональные свойства металлорежущего инструмента (качество и точность получаемых после обработки поверхностей, производительность и его стойкость) зависят в основном от способности материала режущей части инструмента сопротивляться изнашиванию и разрушению, сохранению соответствий геометрических параметров инструмента условиям его работы, а также качества и точности поверхностей, образующих режущие кромки.

Инструменты из инструментальных быстрорежущих сталей остаются востребованными благодаря совершенствованию их структуры за счет введения дополнительных связующих компонентов, обеспечивающих повышение твердости и изменение физико-механических свойств. Нанесение износостойких покрытий на режущую часть позволяет продлить ресурс инструмента [2]. Однако применение инструментов из быстрорежущих сталей для обработки труднообрабатываемых материалов не эффективно по причине их низкой надежности.

Твердые сплавы сегодня являются широко используемым инструментальным материалом для изготовления режущих инструментов, которые применяются при обработке сверлением, точением и фрезерованием термоупрочненных материалов, деталей из жаропрочных сталей, титановых сплавов и композиционных материалов. Среди общего количества инструментальных материалов, применяемых в механообрабатывающем производстве, доля твердого сплава составляет 30...35 %. При этом твердосплавными инструментами снимают до 65 % стружки, так как допустимая скорость резания,

применяемая при обработке этими инструментами в 2...5 раза выше, чем у инструментов из быстрорежущих сталей.

Твердые сплавы производят в виде пластин, которыми оснащаются режущие инструменты (резцы, сверла, фрезы и др.). Выпускаются и цельные твердосплавные инструменты – концевые фрезы, сверла и др. Инструменты, изготовленные из твердых сплавов, обладают высокой твердостью 80...92 HRA (74...77 HRC), износостойкостью и высокой теплостойкостью (до 800...1000 °С) и по многим эксплуатационным свойствам превосходят инструменты из инструментальных сталей (рис. 1). Их главными недостатками является сравнительно низкие прочностные характеристики и сложность изготовления сложнопрофильных инструментов.



Рис. 1. Зависимость твердости различных инструментальных материалов от температуры нагрева

Как следует из рис. 1, со снижением теплостойкости режущие свойства материалов падают и надежность инструмента тоже снижается.

На мировом рынке сегодня представлена широкая номенклатура различных конструкций режущего инструмента из быстрорежущих сталей и твердосплавных материалов. Среди зарубежных фирм производителей режущего инструмента известны, например, SANDWIK Coromant, Seco, Pramet, Guhring, Mitsubishi и др. Постоянные закупки дорогого инструмента отражаются на себестоимости изделий.

Импортозамещение в этой сфере является одним из направлений для отечественных предприятий в условиях постоянных санкций, что позволяет избавиться от технологической зависимости зарубежных производителей, и изготавливать инструмент на территории России на специализированных инструментальных заводах или силами самих предприятий.

В соответствии с ГОСТ 3882–74 отечественная промышленность выпускает три группы твердых сплавов: вольфрамовые (однокарбидные), титановольфрамовые (двухкарбидные), и титанотанталовольфрамовые (трехкарбидные).

Наличие в широком ассортименте твердосплавных спеченных материалов в виде прутков позволяет потребителю при наличии соответствующего оборудования самостоятельно изготавливать монолитный инструмент любых диаметров и геометрии с учетом рекомендуемых параметров [3]. В табл. 1 приведены основные физико-механические свойства твердосплавных прутковых полуфабрикатов различных марок диаметром до 30 мм.

Весьма существенной и актуальной проблемой на производстве является обработка отверстий малого диаметра в термоупрочненных материалах, например, при изготовлении штампов и пресс-форм. Поэтому наиболее рациональным направлением является изготовление специального осевого инструмента из твердосплавных материа-

лов. В качестве заготовок в этом случае можно использовать спеченный калиброванный пруток из порошков твердого сплава марок ВК6 или ВК8 (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства твердосплавных прутковых материалов

№	Образцы твердосплавных прутков	Отечественный аналог	Содержание кобальта Co, %	Плотность, г/см ³	Твердость, HRA	Предел прочности при изгибе, МПа
1	YL10.2	ВК8	8	14,5–14,8	91,5	170
2	XF30	ВК10	10	14,2–14,6	92,3	180
3	SM30	ВК6	6	14,5–15,0	92,3	155
4	UF10	ВК15	15	13,9–14,4	92	190

В настоящей работе рассматривается технология изготовления мелкоразмерного осевого инструмента из прутковых материалов однокарбидного твердого сплава марки ВК8. При изготовлении инструмента использовали оборудование НОЦ РКТ. На рис. 2 приведен общий вид 6-ти координатного заточного станка с ЧПУ ANCA RX7.



Рис. 2. Заточной станок с ЧПУ ANCA RX7

На пульте управления ЧПУ станка (рис. 2) установлено лицензионное программное обеспечение iGrind и ToolRoom. В процессе работы станка на экране монитора отображается технологический процесс в виде операций, схема расположения кругов в инструментальной наладке, режимы обработки, нагрузка на шпиндель и другая информация, необходимая для контроля процесса.

Проектирование осевого инструмента, например, сверл диаметром 1,2...3,5 мм, начинается с разработки моделей. В соответствии с алгоритмом проектирования на первом этапе следует задать геометрические параметры инструмента учитывая рекомендации [3; 4]: тип вершины, наружный диаметр сверла d , угол при вершине ($2\phi = 118\text{--}135^\circ$), угол наклона винтовой канавки ($\omega = 20\text{--}35^\circ$) и ее длину, передний угол $\gamma = 5\text{--}12^\circ$, ширина калибрующей ленточки $f = (0,3\text{--}0,4)d$, задний угол α , угол наклона перемычки ψ и др.

На основе созданной 3D-модели инструмента в режиме диалога программа выдает технологический маршрут, согласно которому выбирается комбинация кругов. Далее на оправке собирается инструментальная наладка, назначаются режимы обработки. На первом этапе осуществляется привязка и оцифровка заготовки. Последовательность операций технологического маршрута изготовления сверла показана на рис. 3. Режимы заточки приведены в табл. 2. В качестве оборудования для изготовления сверл из твердых сплавов использовали, как уже было отмечено, станок с ЧПУ модели ANCA RX7 (рис. 2).

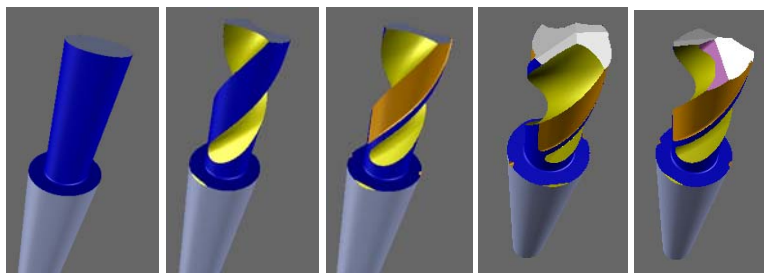


Рис. 3. Технологический маршрут изготовления сверла из сплава ВК8

В табл. 2 приведен маршрут и режимы резания при изготовлении осевого инструмента из твердосплавных материалов марки ВК8.

Таблица 2

Режимы изготовления осевого инструмента на станке ANCA RX7 с УЧПУ

Операции обработки	Подача F , мм/мин	Шлифовальные круги алмазные, (размеры в мм)	Режимы заточки		
			Окружная скорость V_k , м/с	Частота вращения S , мин ⁻¹	Скорость резания V , м/мин
1. Круглая шлифовка (а)	1	1A1 (D100, B10)	19	3800	1193,2
2. Канавка из целого (б)	140	1A1 (D75, B10)	20	5200	1224,6
3. Вд спинка (в)	160	11V9 (D75, B30)	20	5200	1224,6
4. Подточка торца (г)	158				
5. Фасет торец (д)	110				

Как следует из табл. 2, на первом этапе производится круглая шлифовка (а) заготовки до требуемого размера на заданную длину. При этом используются круглые алмазные шлифовальные круги прямого профиля. Для формообразования винтовой канавки (б), спинки внешнего диаметра (в) использовали также алмазные круги только с коническим профилем. Применяемые режимы резания приведены в табл. 2.

При изготовлении сверл самой трудоемкой операцией является шлифование винтовой канавки, при этом глубина врезания распределяется неравномерно. На рис. 4 показаны варианты задания глубины резания при шлифовании винтовых канавок для сверла Ø3 мм.

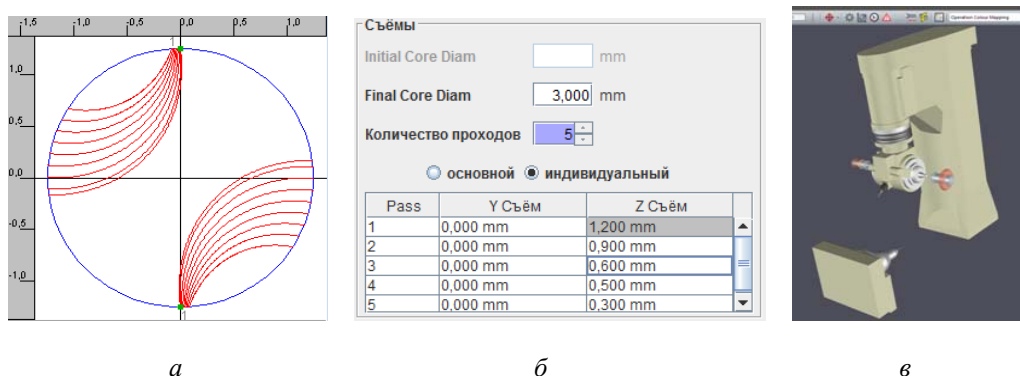


Рис. 4. Задание числа проходов (а) и глубины резания (б) при шлифовке канавок; в – визуализация процесса обработки инструмента

Как следует из рис. 4, наибольшая глубина врезания $t_1 = 1,2$ мм происходит на первом проходе. На последующих переходах она может уменьшаться либо при равномерном распределении (рис. 4, а), либо неравномерно (рис. 4, б). При финишном

проходе глубина резания, как правило, не превышает 0,05 мм. Качество шлифования поверхности винтовой канавки обеспечивает беспрепятственный выход стружки при сверлении. Форма заточки лезвия (φ) и ленточек разнообразны и представляют собой сочетание определенных геометрических элементов сверла (см. рис. 3). К ним относятся: задний угол α на главной режущей кромке, задний угол α_1 на корпусе сверла, подточка поперечной кромки, фаска вдоль режущей кромки для твердосплавных сверл.

Далее для исключения аварийных ситуаций производится проверка движений шлифовальных кругов на предмет выявления возможных столкновений с элементами технологической оснастки (рис. 4, в). В случае обнаружения контактов кругов с элементами технологической оснастки возможна корректировка вылета заготовки или режимов обработки с последующей новой оцифровкой, что отображается в управляющей программе.

Контроль геометрических параметров изготовленных инструментов выполняется с применением контрольно-измерительных инструментов и оптического инструментального микроскопа. В случае обнаружения отклонений измеренных параметров готового изделия и требований чертежа вводится корректировка исходных данных и редактирование маршрута обработки. Дальнейшая последовательность действий сохраняется согласно алгоритму.

Испытания надежности изготовленного инструмента проводили в производственных условиях при изготовлении матрицы пресс-формы из стали марки 7X3 с твердостью 37...45 HRC. Для оценки стойкости и режущей способности инструмента использовали оборудование НОЦ РКТ – станок с ЧПУ DMU 50 Ecoline при выполнении НИР.

В процессе испытаний при формообразовании отверстий назначали цикл глубокого сверления G83 и режимы резания S1000 (мин^{-1}) с подачей F40 мм/мин. Стойкость инструмента предварительно оценивали по суммарной длине обработки и машинному времени. По мере затупления проводили осмотр и замену. Характер разрушения и износа инструмента оценивали на приборе для настройки инструмента VIO 210 Microvision III. На рис. 5 показаны снимки режущей части сверла после обработки.

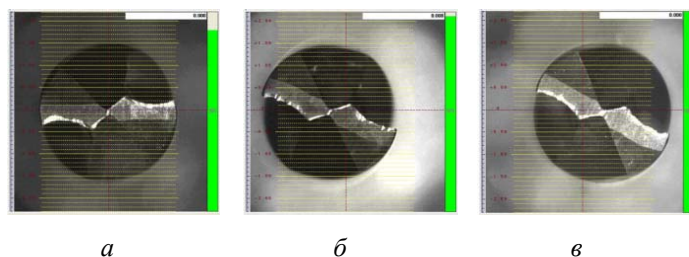


Рис. 5. Характер износа режущей кромки инструмента при сверлении:
a – суммарная длина сверления 685 мм;
б, в – суммарная длина сверления 580 мм

На основании анализа фрагментов рис. 5 выявлено, что основной причиной выхода инструмента из строя является выкрашивание твердого сплава по основной режущей кромке, что характерно для хрупких материалов. Это вызывает необходимость периодически проводить подточку инструмента. Данная операция также выполняется в режиме правка на станке ANCA RX7 после оцифровки и привязки инструмента.

При изготовлении матрицы пресс-формы из стали 40X твердостью 35...40 HRC возникла необходимость обработки 114 отверстий $\varnothing 1,29\text{H7}$ мм. Было принято решение вести ступенчатую обработку с применением четырех типов инструмента: сверла $\varnothing 1,12$ мм, сверла $\varnothing 1,23$ мм, зенкера $\varnothing 1,26$ мм и развертки $\varnothing 1,29\text{H7}$ мм. Данный инструмент также был изготовлен на станке после создания 3D-моделей. На рис. 6 приведены модели инструмента.

Для оценки качества обработанных поверхностей отверстий были изготовлены образцы – свидетели из данных материалов, которые в дальнейшем разрезали, обеспечивали плоскостность образца шлифованием и проводили замеры шероховатости с помощью прибора MarSurf PS1/M300. Общий вид прибора и образцов представлен на рис. 7.

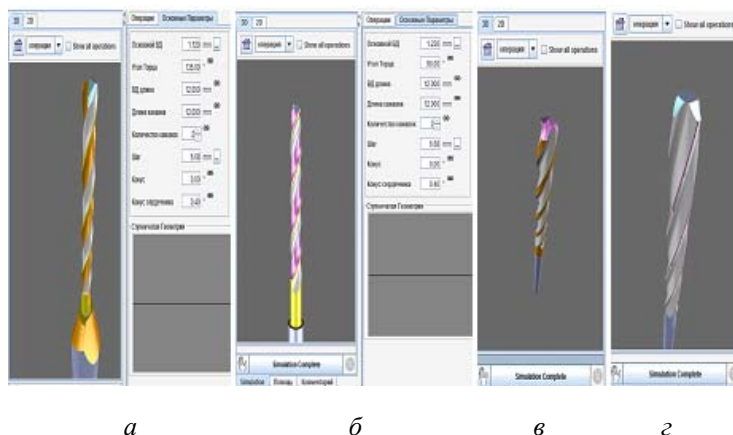


Рис. 6. 3D-модели осевого инструмента малого диаметра в программе ToolRoom:
а – сверло Ø1,12 мм; б – Ø1,23 мм; в – зенкер Ø1,26 мм; г – развертка Ø1,29H7 мм

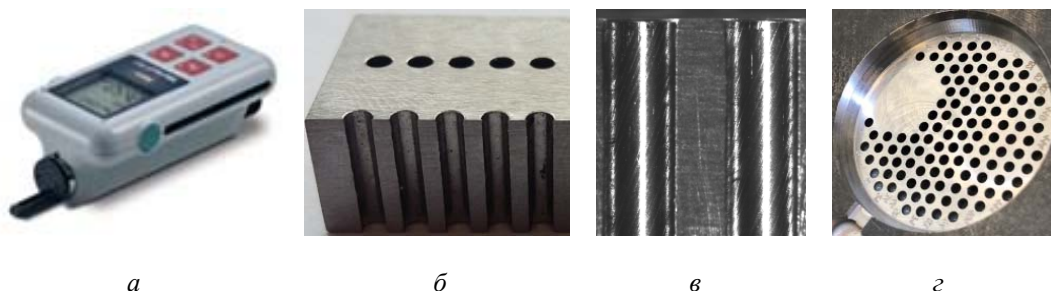


Рис. 7. Профилометр MarSurf PS1/M300 (а) и образцы для исследований (б, в);
г – товарный образец решетки

Ниже на рис. 8 представлена профилограмма измерений шероховатости.

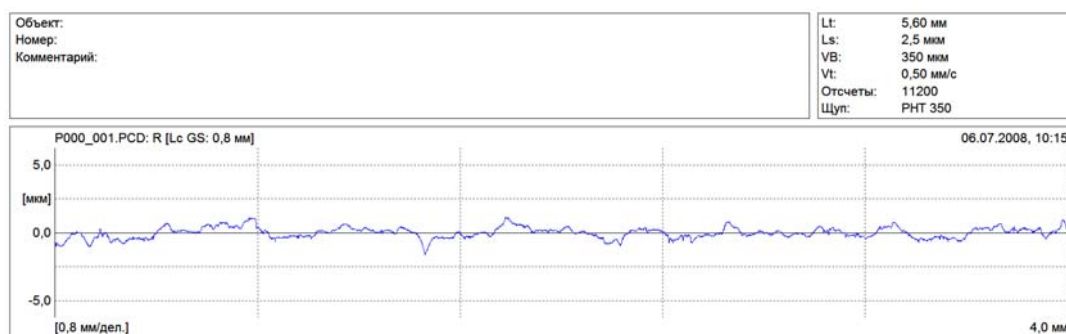


Рис. 8. Профилограмма шероховатости поверхности отверстия № 1

Согласно рис. 8 значения шероховатости измеренных поверхностей вскрытых отверстий составляет от $R_a = 0,25$ мкм ($R_z = 1,72$ мкм) до $R_a = 0,8$ мкм ($R_z = 4,56$ мкм), что удовлетворяет требованиям чертежа и говорит о высоком качестве обработки. В правом верхнем углу приведены режимы сканирования и тип щупа (рис. 8).

Точность межцентровых расстояний расположения осей отверстий с допуском $\pm 0,01$ мм проводили на координатно-измерительной машине CONTURA 2.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- отработана технология изготовления мелкоразмерного осевого инструмента из твердых сплавов на станке ANCA RX7 с числовой системой управления (ЧПУ);

- применение твердых сплавов при обработке термоупрочненных материалов позволяет использовать производительные режимы резания и получать высокое качество обработки поверхности и геометрической точности;

- прочностные свойства применяемых твердосплавных материалов для изготовления цельных инструментов оказывают значительное влияние на его надежность;

- основными причинами выхода инструмента из строя при эксплуатации является выкрашивание режущей кромки, что вызывает необходимость доработки конструкции.

Данные исследования проведены на площадях НОЦ РКТ при выполнении работ по договору 1118187311572010101000282/5-19/2.102.5837 с АО «Красмаш».

Библиографические ссылки

1. Корниенко А. А. Тенденции развития металлорежущего инструмента // Техно Мир. 2005. № 3. С. 20–22.

2. Локтев Д., Ямашкин Е. Основные виды износостойких покрытий // Наноиндустрия, 2007. № 5. С. 24–30.

3. Справочник конструктора-инструментальщика / под общ. ред. В.А. Гречишников и С. В. Кирсанова. 2-е изд. перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2006. 542 с.

4. Каталог фирмы Hoffman Group. GARANT. Справочник по обработке резанием [Электронный ресурс]. 2016. 857 с. URL: www.garant-tools.com (дата обращения: 12.03.2021).

© Амельченко Н. А., Григорьев М. А.,
Раменская Е. В., Янковская Н. Ф., 2021

ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ ЩЕЛЕВОГО КАТОДНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВАФЕЛЬНОГО ФОНА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Н. А. Швалева, А. А. Фадеев, М. В. Стахнова, И. Я. Шестаков

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

Актуальность работы связана с повышением производительности получения ячеек вафельного фона перспективным методом размерной обработки – электрохимическим способом. Для реализации электрохимической обработки разработан щелевой катодный инструмент. Представлены результаты прочностного анализа методом конечных элементов с использованием среды SOLIDWORKS simulation.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, вафельный фон, катодный инструмент.

Изготовление деталей с вафельной конструкцией получило широкое распространение в ракетно-космической отрасли. Вафельный фон представляет собой тонкостенное полотно, изготовленное с продольными, поперечными или диагональными ребрами, образующих ячейки в поперечном сечении, выполненными с полотном как единое целое. Такая конструкция деталей позволяет сохранить прочность на необходимом уровне при достаточно низкой массе детали. Вафельная конструкция применяется при проектировании топливных баков, силовых каркасных конструкций. В большинстве случаев, в качестве материала используют сплавы на алюминиевой или магниевой основе. В производстве обычно применяют алюминиевый сплав АМг6, упрочненный холодным деформированием в листах при их прокатке.

Перспективным методом получения ячеек является размерная электрохимическая обработка. Производительность процесса прямо не зависит от твердости, вязкости и других механических свойств обрабатываемого материала. Отпадает необходимость в применении инструмента из более твердого материала, чем обрабатываемый материал. [1] Процесс ведется в отсутствии контакта между инструментом и деталью. Это означает, что данный метод является пригодным для обработки тонкостенных и легко деформируемых деталей. Так как износ инструмента практически отсутствует, что увеличивает производительность процесса и повышает точность обработки. Процесс электрохимической обработки позволит сократить время обработки, трудоемкость, снизить затраты на изготовление.

Разработана конструкция щелевого катодного инструмента для получения вафельного фона методом электрохимической обработки и представлена на рис. 1.

Конструкция инструмента включает в себя: тонкостенную трубку 2х1,6 – 1 с отверстиями диаметром 1 мм, расположенные перпендикулярно относительно друг друга по всей длине трубки с шагом 5 мм; переходники – 2, которые соединены с трубкой паяным соединением. В качестве материала трубки используется медь марки М1, а также может быть использована нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Материал переходников – нержавеющая сталь. Форма щелевого катодного инструмента соответствует профилю ячейки вафельного фона шириной 100 мм, длиной 80 мм и глубиной 14 мм [2]

Принцип работы инструмента заключается в следующем: электролит под давлением подается в трубку, вытекая через отверстия, воздействует на обрабатываемый материал. Инструмент посредством штуцерно-ниппельного соединения (на рисунке не показан) присоединяется к системе установки (станка). В начале обработки инструмент подается вертикально к поверхности заготовки, когда осуществилось врезание и ячейка обработана на необходимую глубину, инструмент подается горизонтально, а затем вертикально в обратном направлении, тем самым образуя ячейку. Так как, система находится под давлением, необходимо выполнить проверку прочности для определения допустимых значений давления аналитическим способом.

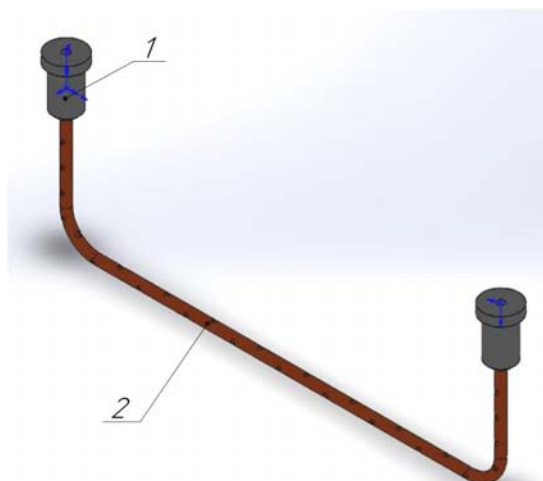


Рис. 1. Щелевой катодный инструмент:
1 – переходник; 2 – тонкостенная трубка

Прочностной анализ выполнен в соответствии с РД 26-12-29–88 методом конечных элементов в среде SOLIDWORKS Simulation. Согласно РД 26-12-29-88 любые изделия испытываются на прочность избыточным давлением до 0,1 МПа (1,0 кгс/см²) [3] При испытаниях на прочность давление поднимают постепенно до достижения испытательного, поэтому, с целью имитации испытания был проведен анализ с несколькими значениями давления. Результаты испытания сведены в табл. 1 и представлены на рис. 2–4.

Результаты анализа SOLIDWORKS Simulation щелевого катодного инструмента

Давление, кгс/см ² (МПа)	Предел прочности материала трубки, Н/м ²	Предел прочности материала переходника, Н/м ²	Модуль упругости Трубки, Н/м ²	Напряжение мин., Н/м ²	Напряжение макс., Н/м ²	Эквивалентная деформация, макс. ESTRN
0,35 (0,035)	3,9438·10 ⁸	3,99826·10 ⁸	1,1·10 ¹¹	9,478·10 ³	1,965·10 ⁷	9,947·10 ⁻⁵
0,7 (0,07)				8,101·10 ³	1,973·10 ⁷	9,974·10 ⁻⁵
1 (0,1)				6,681·10 ³	2,373·10 ⁷	1,133·10 ⁻⁴

Анализируя таблицу, видим, что инструмент прошел испытания давлением на прочность. При максимальном испытательном давлении величина максимального напряжения равна 2,373·10⁷, что меньше предела прочности материала трубки меди марки М1, равного 3,9438·10⁸. Следовательно, тонкостенная трубка 2х1,6 мм может выдержать данные давления.

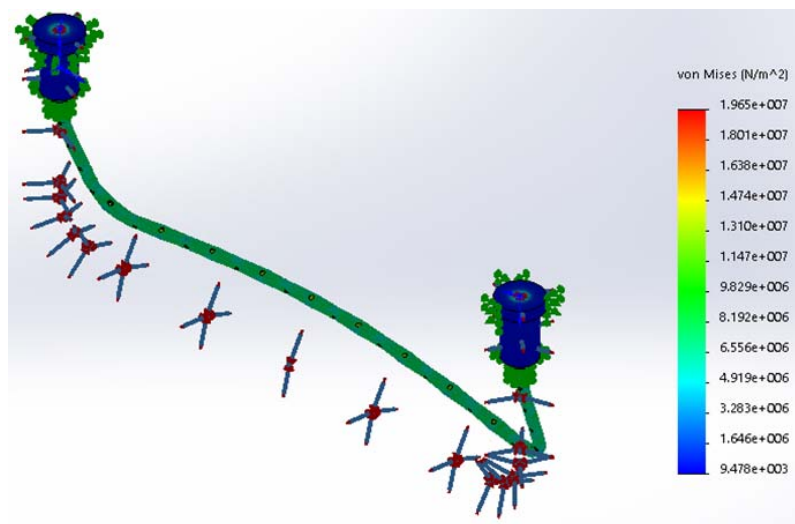


Рис. 2. Результаты испытания – напряжение при давлении 0,35 кгс/см²

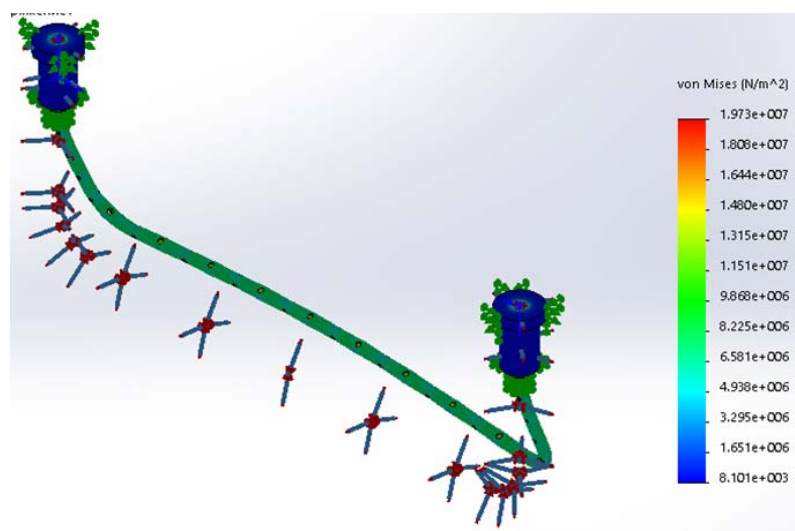


Рис. 3. Результаты испытания – напряжение при давлении 0,7 кгс/см²

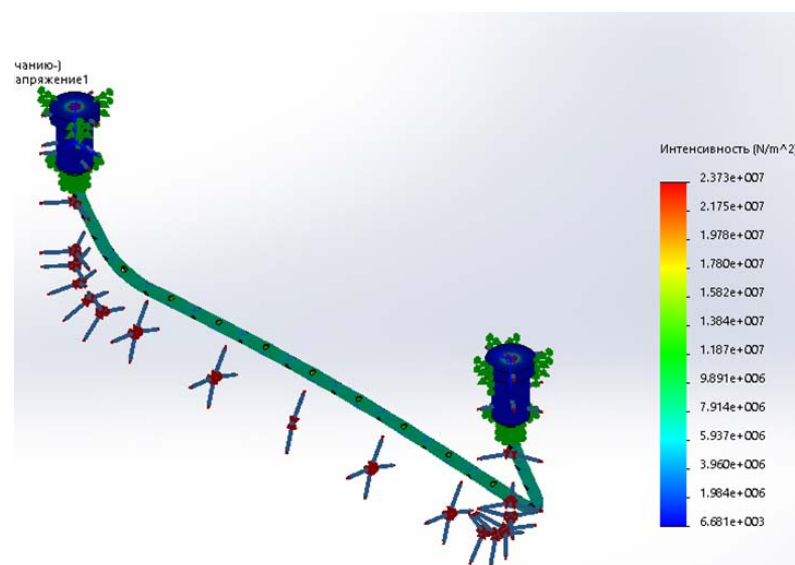


Рис. 4. Результаты испытания – напряжение при давлении 1 кгс/см²

В этой связи, проработан вопрос о перспективах применения электрохимической обработки для получения вафельного фона щелевым катодным инструментом методом электрохимической размерной обработки. В дальнейшем необходимо проведение опытных испытаний с целью сравнения с теоретическими исследованиями.

Библиографические ссылки

1. Мирзоев Р. А., Давыдов А. Д. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов [Электронный ресурс] : учеб. пособие. 2-е изд., стер. СПб. : Лань, 2016. 384 с. ISBN 978-5-8114-2288-3 // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/76036> (дата обращения: 12.03.2021).

2. Батрудинов Р. Г., Сысоев С. К. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Красноярск, 2011. С. 7–8.

3. РД 26-12-29-88. Правила проведения пневматических испытаний изделий на прочность герметичность ОКСТУ. Утвержден главным научно-техническим управлением Минхиммаш. Введен в действие письмом главного научно-технического управления Минхиммаш от 27.01.89 № 1-10-4/61. 38 с.

© Швалева Н. А., Фадеев А. А.,
Стахнова М. В., Шестаков И. Я., 2021

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

УДК 62-52

**СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

К. С. Алилекова, В. Г. Сидоров

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

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

Рассматриваются такие вопросы, как актуальность систем автоматического управления (САУ) в современном мире, способы анализа данных систем. Приводится пример применения САУ в технологиях летательных аппаратов. Также в статье говорится о причинах роста требований к надежности и эффективности систем автоматического управления. Обсуждается вопрос направленности технической диагностики. Анализируется, что именно должна учитывать диагностика. Далее вводится термин математической модели и описывается причина необходимости в ней. Перечисляются математические операции, способствующие анализу математической модели. Говорится об охвате математической моделью важнейших физических явлений. Затем появляется понятие оператора и его детерминированности при анализе математических моделей. Делается вывод о сведении диагностики САУ к математической задаче и приводятся способы математического описания данных систем. Рассматривается каждый способ по отдельности, начиная с дифференциальных уравнений, и выясняется, что разбиение является методом, облегчающим анализ математической модели. Также производится разбор функциональной схемы. Излагаются следующие способы анализа математической модели: метод передаточных функций, временных характеристик и частотных характеристик. Приводится еще один метод получения рациональных программ определения работоспособности и поиска дефекта.

Ключевые слова: технологии, системы автоматического управления, технический объект, надежность и эффективность САУ, объект управления, ошибка, неисправность, диагностика, техническое состояние, объект диагностирования, математическая модель, состояние, оператор, детерминированность, дифференциальные уравнения, функциональная схема САУ, передаточные функции, преобразования Лапласа–Карсона, временные характеристики, разложение Хевисайда, частотные характеристики, таблица состояний.

Введение

Сегодня трудно представить мир без технологий, которые имеют повсеместное распространение и являются неотъемлемой частью нашей жизни. Многие действия осуществимы лишь благодаря их возможностям. Очевидно, что без системы управления никакой аппарат работать не сможет. Таким образом, обозначается важность и необходимость системы автоматического управления для технического объекта.

Но перед тем как говорить о важности таких систем, следует разобраться в их роли по отношению к этим объектам. Например, для летательных аппаратов система автоматического управления (САУ) предназначена для автоматического и директорного управления траекторией на главнейших этапах полета и обеспечения заданных характеристик деформирования, устойчивости и управляемости при ручном управлении.

Математическая модель и способы диагностики

В последние несколько лет требования к надежности и эффективности САУ имеют всё больший рост. Во-первых, это связано со сложностью самих объектов управления. Во-вторых, САУ – основная система любого технического аппарата, потому, во избежание ошибки, она должна быть надежна и эффективна. Ввиду этого появляются новые способы диагностики систем управления.

Техническая диагностика направлена на исследование состояния объектов диагностирования (ОД) в настоящий момент времени и разработку методов его определения принципа построения систем диагностирования.

Диагностирование должно учитывать разные формы проявления технического состояния САУ, необходимость использования тех или иных методов определения работоспособности и отыскания ошибки и особенности технического осуществления средств диагностирования, так как технические средства, используемые на ОД, различны.

Для анализа САУ используются математические модели, охватывающие важнейшие физические явления, связанные с ее функционированием. Необходимость формирования математических моделей связана с классификацией исправного и неисправного ОД для изучения влияния дефектов на работоспособность этого объекта. Результат такого анализа позволяет определить наиболее рациональный алгоритм нахождения ошибки и направленность проектирования систем диагностирования.

При анализе математических моделей применяются следующие математические операции: работа с n -мерными векторами (при записи состояния объекта диагностирования), матрицами (при записи перехода системы из состояния в состояние), дифференциальными уравнениями (для широкого класса систем), интегрирование, вероятностные характеристики (из-за существования ограниченности достоверности знаний закономерности переходов системы, применяется для случайных моделей). Некоторые современные системы описываются дифференциальными уравнениями, имеющими порядок в несколько десятков, в связи с чем аналитические решения получаются лишь в исключительных случаях.

Учитывая тот факт, что современные САУ представляют собой комплекс сложных взаимодействующих технических устройств, их математическая модель должна охватывать важнейшие физические явления, связанные с ее функционированием, потому требуется умение в совершенстве маневрировать приведенными ранее операциями для достижения наибольшей точности.

Когда система функционирует, она переходит из одного состояния в другое. Так как исправное состояние, которое определено, – исходное, существенным считается определение оператора перехода системы в те или иные состояния. Математическая интерпретация оператора зависит от природы рассматриваемой системы, её структурных составляющих, вида упрощающих предположений и др. В любом из случаев состояние системы должно определяться этим оператором однозначно, потому как в этом состоит его детерминированность.

Таким образом, диагностика САУ сводится к математической задаче. Способами математического описания САУ являются: дифференциальные уравнения, передаточные функции, временные характеристики, частотные характеристики.

В первом из приведенных методов система автоматического управления разбивается на элементы, что позволяет ввести понятие функциональной схемы автоматической системы. Современные САУ достаточно сложны, поэтому разбиение на более

простые части и составление уравнений для каждой из них является наиболее оптимальным решением. Разбиение позволяет определить функциональную сущность отдельных элементов САУ, следуя из чего можно построить ее функциональную схему САУ (рис. 1).

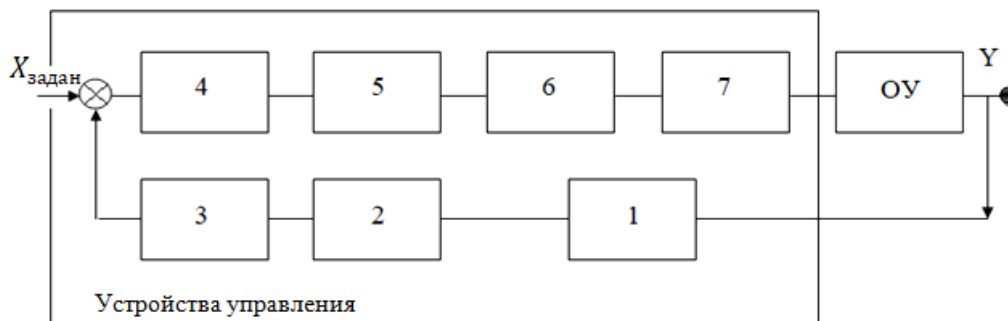


Рис. 1. Функциональная схема САУ:

1 – датчик; 2 – преобразующе-усиливающие устройства; 3 – сравнивающий элемент;
4 – усилитель; 5 – усиливающе-преобразующие устройства; 6 – исполнительный механизм; 7 – регулирующий орган

Устройство управления для поддержки состояния ОД на требуемом этапе выполняет следующие функции:

- 1) измерение значений контролируемых параметров датчика;
- 2) преобразование – усиление сигнала;
- 3) сравнение с заданным значением;
- 4) индицирование, усиление;
- 5) принятие решение, использование.

Метод передаточных функций основан на решении дифференциального уравнения с помощью преобразований Лапласа–Карсона. Преобразование Лапласа имеет следующий вид:

$$L\{x(t)\} = X(s) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt,$$

где $x(t)$ – оригинал; $X(s)$ – изображение; $s = \sigma + j\omega$ – комплексная переменная.

Преобразованием Карсона называют соотношение:

$$K\{x(t)\} = sL\{x(t)\} = s \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt.$$

Передаточные функции систем определяют динамические свойства этих систем. САУ характеризуется несколькими передаточными функциями. При одной выходной координате их количество равно числу входных воздействий.

Временные характеристики также являются одними из важнейших характеристик САУ. Они описывают реакцию САУ на импульсное воздействие при нулевых начальных условиях. Если известна передаточная функция динамического звена, то переходная импульсная функция определяется разложением Хевисайда. На практике временные характеристики можно использовать для идентификации объектов управления (определить тип звена и его параметры уравнения).

Частотные характеристики, в свою очередь, определяют поведение системы при действии на входе звеньев гармонических колебаний и характеризуются реакцией звена

на синусоидальное входное воздействие в установившемся режиме. В отличие от временных характеристик, частотные описывают поведение системы на бесконечном отрезке времени. Несмотря на это, частотные характеристики также полно определяют поведение во времени управляемой величины, вызванное воздействиями как периодическими, так и непериодическими.

Принятые принципы представления математических моделей не противоречат методам получения рациональных программ определения работоспособности и поиска дефекта. Основой данного метода является оператор перехода в виде таблицы состояний в двоичной системе счисления. Использование такого подхода построения математической модели позволяет задать данные состояния, связав их с теми, которые вообще возможны и правомерны для любой из систем.

Заключение

Подводя итог, можно сделать вывод, что современные системы автоматического управления являются сложными и метод их диагностики – также непростая задача как с математической точки зрения, так и с физической. Но несмотря на это, нельзя оспорить эффективность и надежность этих методов и, следовательно, технологический прогресс.

Библиографические ссылки

1. Дядик В. Ф., Байдали С. А., Криницын Н. С. Теория автоматического управления. Томск : Изд-во Том. политех. ун-та, 2011.
2. Надежность и диагностика систем автоматического управления / И. Н. Белоглазов, А. Н. Кривцов, Б. Н. Куценко, О. В. Сулова, А. Г. Схиртладзе. СПб., 2008.
3. Дианов В. Н. Диагностика и надежность автоматических систем : учеб. пособие. М. : МГИУ, 2004.
4. Воробьев В. В. Системы управления летательных аппаратов. М. : Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008.
5. Основы автоматизации технологических процессов / А. В. Щагин и др. М. : Юрайт, 2019.

© Алилекова К. С., Сидоров В. Г., 2021

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ САМОКОНТРОЛЕМ

Н. Р. Кашапова, Е. К. Жирнова

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: nailyak99@gmail.ru

Цифровизация метрологии и интеллектуальные средства измерений открывают новые возможности управления автоматизированными системами. Анализируется преимущества и перспективы применения средств измерений с метрологическим самоконтролем в системах автоматического управления.

Ключевые слова: надежность, система автоматического управления, средства измерения с метрологическим самоконтролем.

В настоящее время стратегия обеспечения единства измерения направлена на цифровизацию метрологии и разработку интеллектуальных средств измерений [1].

Целью работы является анализ влияния средств измерения с метрологическим самоконтролем на надежность систем автоматического управления.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать роль средств измерений в системах автоматического управления;
- рассмотреть нормативно-технические основы обеспечения метрологической надежности;
- исследовать преимущества и перспективы применения средств измерений с метрологическим самоконтролем в системах автоматического управления.

Система автоматического управления (САУ) представляют собой динамическую систему, стремящуюся сохранить отклонения между требуемыми и действительными изменением регулируемых переменных в допустимых пределах при помощи их сравнения на основе принципа обратной связи, замкнутого цикла, а также использования полученных при этом сигналов для управления источниками энергии [2].

Автоматизация процессов измерения имеет своей целью передать как можно большее число операционных действий от человека к электронно-вычислительным машинам, микропроцессорам и различным системам преобразования и передачи информации, то есть освободить оператора от ручного труда.

Система автоматического управления содержит следующие компоненты, которые обеспечивают ее функционирование (рис. 1): объект управления ОУ (управляемый процесс); исполнительные устройства ИСУ; измерительные устройства ИЗУ; устройство управления УУ.

Средства измерения (ИЗУ) оказывают значительное влияние на надежность систем автоматического управления, так как надежность систем автоматического управления напрямую связана с достоверностью получаемой измерительной информации. Примером может являться процесс закаливания металла в электропечи, который проходит без участия человека (рис. 2).

Метрологическая надежность средства измерения – это такое свойство средства измерения сохранять во времени свои метрологические характеристики в пределах установленных норм. Метрологическая надежность определяется характером и темпом изменения нормируемых метрологических характеристик [3]. Для подтверждения соответствия средства измерения установленным метрологическим требованиям проводится процедура поверки, результаты которой могут подтвердить метрологическую исправность средства измерения, но только в момент проведения поверки. Гарантировать же метрологическую исправность средства измерения на предстоящем межповерочном интервале они не могут [4]. Чем выше показатели метрологической надежности, например, метрологический ресурс, вероятность работы без метрологического отказа, интенсивность отказов и т. д., тем реже придется поверять средство измерения, следовательно, тем меньше риск использования неисправного прибора в течение межповерочного интервала. Сведения о метрологической надежности средств измерения необходимы для правильной организации его метрологического обслуживания, а также назначения сроков очередной поверки [3].

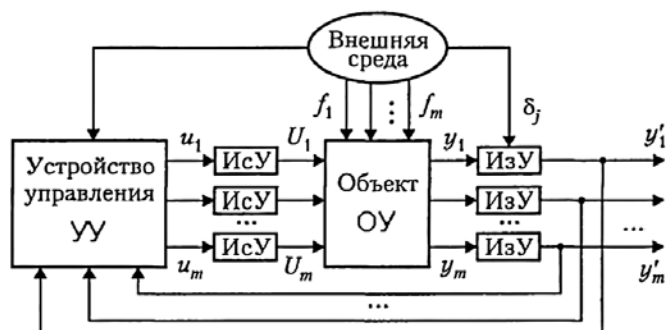


Рис. 1. Основные компоненты САУ



Рис. 2. Функциональная схема автоматической системы, реализующей процесс закаливания металла в электропечи

Одним из основных показателей метрологической надежности является безотказность средства измерения, а отказы можно прогнозировать с помощью определенных математических моделей. Для получения наиболее полной информации о метрологической надежности используются такие модели, которые позволяют описать изменение метрологических характеристик средства измерения во времени. Следовательно, с их помощью можно провести анализ метрологической надежности. Для прогнозирования метрологической исправности средства измерения на предстоящем межповерочном интервале необходимо обладать информацией об изменении метрологических характеристик в процессе эксплуатации. Такую информацию могут предоставить средства измерения с метрологическим самоконтролем.

Рассмотрим преимущества применения в системах автоматического управления средств измерений с метрологическим самоконтролем: снижение риска возникновения

необнаруженного метрологического отказа, а также его опасных последствий; возможность обеспечить отказоустойчивость, а также самокоррекцию системы; снижение эксплуатационных затрат [5].

Применение средств измерений с метрологическим самоконтролем позволит повысить надежность систем автоматического управления за счет самообучения системы, то есть ее способность к автоматической оптимизации параметров и алгоритмов работы; автоматической коррекции погрешности, возникающей в результате воздействия влияющих величин и/или старения компонентов; самовосстановление при единичном дефекте в датчике.

Библиографические ссылки

1. Стратегия обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года [Электронный ресурс] : (утверждена Постановлением Правительства № 737-Р от 19 апреля 2017 года). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71563952/> (дата обращения: 16.02.2021).
2. Пронин А. И., Щелкунов Е. Б. Теория автоматического управления : учеб. пособие. 2-е изд., доп. Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ «КНАГТУ», 2015. 108 с.
3. Грубо Е. О. Алгоритмическое обеспечение повышения метрологической надежности средств измерений : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16. СПб., 2011. 18 с.
4. Крупская А. В. Алгоритмическое обеспечение средств измерений с метрологическим самоконтролем : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16. СПб., 2017. 123 с.
5. Кашапова Н. Р., Жога Р. А., Жирнова Е. А. Перспективы применения средств измерений с метрологическим самоконтролем. Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (Екатеринбург, 21 апреля 2020 г.) / ФГАОУ ВО «УрФУ». Екатеринбург, 2020. С. 336–342.

© Кашапова Н. Р., Жирнова Е. А., 2021

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА 3D-ПЕЧАТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ НЕЙРОСЕТЕЙ

Г. М. Гринберг, В. А. Федоров, Р. В. Бакулин

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, vfedorov2@gmail.com

Аддитивные технологии или технологии 3D-печати – это одни из самых современных и быстроразвивающихся технологий в промышленности. Несмотря на очевидные преимущества, технологиям 3D-печати, как и любым другим технологиям производства, свойственны проблемы с обеспечением качества изготавливаемых изделий. Достижению заданных показателей качества способствует использование активных методов контроля над ходом технологического процесса формирования изделия. Рассмотрено использование нейросетей для организации активного контроля процесса 3D-печати.

Ключевые слова: 3D-печать, контроль, нейронные сети.

Введение. 3D-печать или аддитивное производство – это создание трехмерного объекта из модели САПР или цифровой 3D-модели. Термин «3D-печать» может относиться к множеству процессов, в которых для создания трехмерного объекта материал осаждается или добавляется, как правило, слой за слоем. При этом весь процесс создания объекта происходит под управлением компьютера и специализированного программного обеспечения.

В настоящее время точность, воспроизводимость и ассортимент материалов для 3D-печати увеличились до такой степени, что некоторые процессы 3D-печати считаются жизнеспособными в качестве технологии промышленного производства, в результате чего термин аддитивное производство может использоваться как синоним 3D-печати.

Модельные (строительные) материалы могут быть жидкими (фотополимерные смолы, воски и др.), сыпучими (пески, порошковые полимеры, металлопорошковые композиции), в виде тонких листов (полимерные пленки, листы бумаги и др.), а также в виде полимерной нити или металлической проволоки, расплавляемой непосредственно перед формированием слоя построения.

Одним из ключевых преимуществ 3D-печати является возможность создавать очень сложные формы или геометрии, которые в противном случае было бы невозможно построить вручную, включая полые детали или детали с разной внутренней структурой заполнения для снижения веса. Моделирование методом послойного наплавления, или FDM, является наиболее распространенным процессом 3D-печати, по сравнению с другими методами и характеризуется простой настройкой, установкой, низкой стоимостью начальной настройки и низкими эксплуатационными материальными затратами. Основное применение FDM технологии – это быстрое прототипирование, направленное на проверку дизайна, визуализацию и тестирование функциональности.

Принцип работы 3D-принтера FDM. Практически все 3D-принтеры типа FDM используют один и тот же подход к процессу 3D-печати. Рассматриваемые 3D-принтеры построены по принципу картезианского робота, то есть машины, которая может двигаться линейно в трех измерениях – по осям X, Y и Z, так же известные как картезианские (декартовы) координаты. Конструктивная схема такого 3D-принтера приведена на рис. 1.

В 3D-принтерах, построенных по такой схеме, по осям X, Y и Z перемещается печатающая головка, обозначенная на рисунке как экструдер. Для перемещения печатающей головки в 3D-принтерах имеются шаговые двигатели, которые могут обеспечить высокие скорость перемещения и точность позиционирования (обычно угловых 1,8 градусов на шаг). Эти «трехмерные» роботы управляются контроллерами разной степени интеграции и специализации (основной программируемый контроллер, контроллеры управления шаговыми двигателями, контроллер двигателя подачи модельного материала). Многие 3D-принтеры используют приводные ремни и ролики по осям X и Y для обеспечения быстрого и точного перемещения. Также многие производители используют резьбовые шпильки или особые ходовые винты по оси Z для еще более точного позиционирования. Технологии изготовления 3D-принтеров, в настоящее время, в значительной степени унифицированы и многие 3D-принтеры содержат в себе стандартные элементы, которые используются в большом количестве других отраслей и устройств [1].

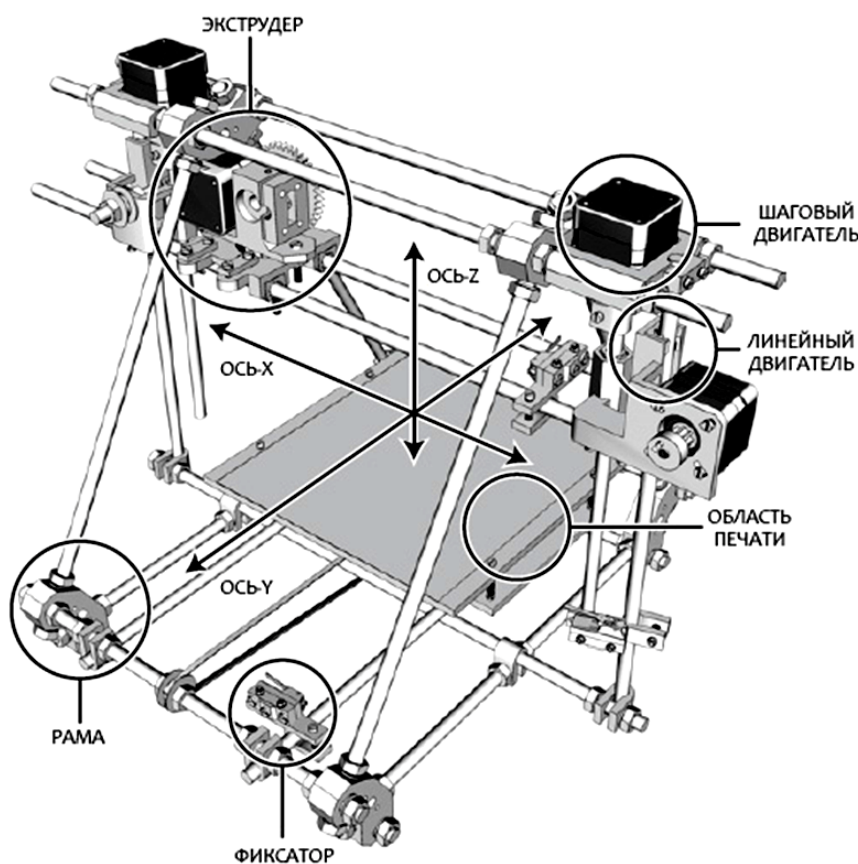


Рис. 1. Конструктивная схема 3D-принтера FDM

За счет передвижения печатающей головки по осям X-Y и постоянной экструзии модельного материала формируется слой печатаемого объекта. Далее печатная головка поднимается на заранее установленную высоту (доли, мм) и печатается следующий слой материала. Так как модельный материал нагревается до температуры, превышающей точку его плавления, и твердеет через доли секунды после экструзии, то соединение слоев осуществляется за счет сплавления. В некоторых конструкциях 3D-принтеров печатающая головка не перемещается по высоте, но опускается платформа печати. Скорость подачи материала поддерживается за счет управления двигателем экструдера в зависимости от внутреннего давления, изменения диаметра сопла и толщины слоя.

Дефекты 3D-печати. Наряду с указанными преимуществами технологии FDM, существуют неконтролируемые проблемы, возникающие в производственном процессе

по разным причинам и существенно влияющие на качество изготавливаемых деталей [2]. Большинство проблем решаются путем тщательной настройки 3D-принтера и подбором технологических режимов печати или настройками в программном обеспечении принтера. Эти настройки возможны только в режиме *In situ*, т. е. по факту проявления дефектов, когда процесс печати уже идет или закончен. Время печати на машинах FDM может составлять до 20 часов для достаточно сложных и крупных объектов, и каждая испорченная деталь приводит к прямым убыткам.

Чтобы обеспечить успешное обнаружение ошибок, важно определить ошибки, которые могут возникнуть заранее.

Самая распространенная ошибка, которую легче всего обнаружить – это коробление, то есть отрыв изготавливаемой детали (объекта) от печатной платформы. Этот тип/класс ошибки может возникнуть по следующим причинам: колебания температура печатной платформы; изменения расстояния между соплом экструзии и платформой из-за отсутствия начальной калибровки; большой высоты изделия и слабой адгезии модельного материала и поверхности печатной платформы; вибрации или удары, которые отрывают объект от платформы.

Следующий по частоте проявления дефект – это прерывание потока модельного материала через сопло печатающей головки. Печатающая головка движется по заданной траектории инструмента без экструдирования нити. Если поток материала прерывается кратковременно, то объект будет напечатан дефектным из-за отсутствия части слоя материала. В случае, когда поток материала прерывается на длительное время, возникает неустраняемый брак объекта и дальнейшая печать становится нецелесообразной. Этот класс ошибок может возникать из-за: засорения сопла/экструдера посторонними включениями; наличия пузырьков воздуха в экструдере или в модельном материале; застревании или окончании материала.

Еще один класс ошибок заключается в деформировании объекта, то есть отклонении геометрии от шаблона, выполненного в САПР. Эти ошибки могут возникать на участках с выступом или на мостах и консольных свесах объекта, на которых нижние слои материала отсутствуют. Принтер выдавливает материал в воздух, охватывающий путь между двумя точками с нижним слоем поддержки (в случае моста) или через край опорный материал нижнего слоя (для свесов). В самом критичном случае мост или свес могут провиснуть из-за действия силы тяжести или упасть на платформу, а принтер продолжит работу, создавая клубок нитей хаотично расположенных в пространстве. Причиной деформирования объекта может быть неправильный выбор поддерживающих элементов или следствие проявления первых двух дефектов: коробление и прерывание потока модельного материала.

Дефекты поверхности модели. Этот класс включает в себя ошибки, которые проявляются в волнистости поверхности, дефектах на острых углах и тонких частях объекта. Большая часть этих дефектов обусловлена самой технологией печати FDM: конечной толщиной экструдированного материала, который не позволяет получать гладкие поверхности и острые углы объекта.

Отклонение от 3D-модели. Эту ошибку трудно обнаружить автоматически, поскольку объект напечатан без какой-либо из ранее упомянутых ошибок, но отличается от модели (т. е. шаблона), например по размеру или структуре. Этот класс ошибки может возникнуть из-за неправильных настроек программы-слайсера, который «нарезает» объект на слои, ошибочного масштабирования или вращения. Существуют ошибки из-за усадки или деформации при охлаждении объекта, которые также могут привести к отклонениям от модели. Такие ошибки трудно обнаружить автоматически, так как неочевидны возникающие дефекты.

Способы выявления дефектов 3D-печати. С целью обеспечения контроля за процессом печати пользователи и производители размещают видеокамеры (веб-

камеры) в принтер, чтобы облегчить возможности удаленного наблюдения [3; 4]. Есть примеры использования для этих целей лазерных сканеров и тепловизионных приборов [5]. Это может помочь получить информацию о потенциальных проблемах и оценить качество печати удаленно, но требует от пользователя смотреть видеопоток постоянно или периодически для оперативного получения информации о проблемах и ошибках и принятия решения.

Более ценным решением, по нашему мнению, является использование машинного зрения и технологии нейросетей [6–9] для обнаружения ошибок 3D-печати. Такой подход обладает несомненными преимуществами: уменьшаются отходы материалов, сокращается непроизводительное использование ресурсов принтера благодаря раннему обнаружению ошибок печати и завершению процесса печати непосредственно в момент обнаружения, сокращаются временные затраты для конечного пользователя за счет снижения потребности в постоянном визуальном контроле.

С целью обучения студентов применению машинного зрения и технологии нейросетей обнаружения ошибок 3D-печати авторы статьи предполагают оснастить имеющийся в их распоряжении 3D-принтер системой (рис. 2), включающей телекамеру (достаточно веб-камеры), систему обработки изображений, основной функцией которого является захват изображения в реальном времени, нейронную сеть, реализованную на компьютере. Для получения качественных снимков рабочая область 3D-принтера освещается кольцевым осветителем для обеспечения условий съемки «без теней».

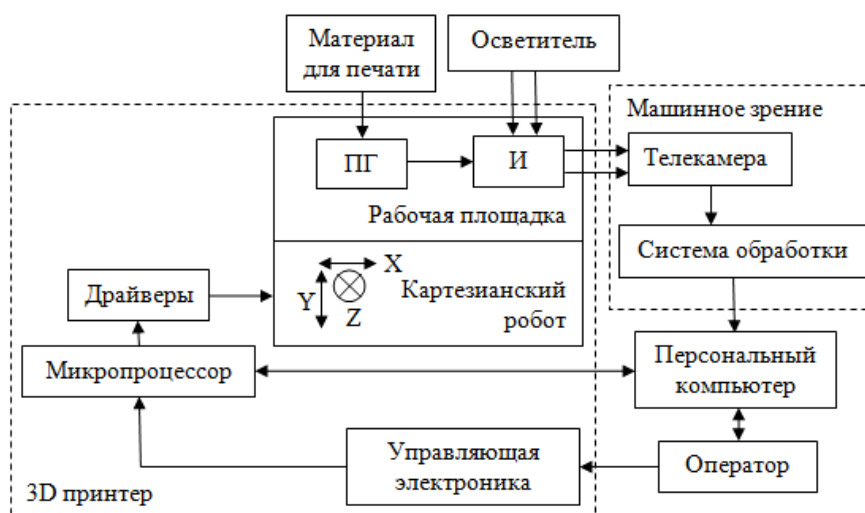


Рис. 2. Функциональная схема системы контроля над процессом 3D-печати с использованием нейросетей:
ПГ – печатающая головка; И – изделие

Телекамера работает в периодическом режиме и синхронизируется с моментом завершения очередного слоя и движением печатающей головки или платформы (в зависимости от конструкции принтера) по оси Z. Система обработки изображений преобразует изображение, полученное телекамерой в массив чисел, который поступает на вход нейронной сети. В качестве нейронной сети используется сверточная нейронная сеть, обладающая относительно высоким быстродействием даже на небольших вычислительных мощностях, небольшим, по сравнению с полносвязной сетью, количеством настраиваемых весов, устойчивостью к сдвигу и повороту распознаваемого объекта/ изображения [10].

Нейронную сеть перед использованием необходимо подвергнуть глубокому обучению с изображениями в качестве входных данных. Обучение сверточной нейронной сети не имеет каких-либо особенностей и может быть проведено классическим методом обратного распространения ошибки [11].

На первом этапе информация о ходе процесса печати будет поступать оператору для окончательного принятия решения. Далее, после подтверждения надежной работы, предполагается автоматическая работа системы контроля.

Заключение. Предлагаемый метод контроля процесса 3D-печати может быть применен в 3D-принтерах с технологиями FDM при печати сложных деталей. Контроль осуществляется практически в режиме реального времени с остановкой печати при возникновении дефектов и информированием оператора. Окончательное решение о существенности или несущественности обнаруженных отклонений принимает оператор. Экономическая эффективность описанного подхода заключается в экономии материала, из которого изготавливается деталь, и значительного сокращения времени реагирования на возникающие внештатные ситуации в процессе 3D-печати.

Библиографические ссылки

1. Как устроен 3D-принтер [Электронный ресурс]. URL: <https://losprinters.ru/articles/kak-ustroen-3d-printer/> (дата обращения: 16.02.2021).
2. Дефекты 3D-печати – попробуем ввести классификацию [Электронный ресурс]. URL: <http://3dtoday.ru/blogs/leoluch/defects-3d-printing-will-try-to-introduce-a-classification/> (дата обращения: 03.03.2021).
3. Baumann Felix & Roller Dieter. (2016). Vision based error detection for 3D printing processes. MATEC Web of Conferences. 59. 06003. 10.1051/mateconf/20165906003. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/303505965_Vision_based_error_detection_for_3D_printing_processes (дата обращения: 03.03.2021).
4. Контроль качества 3D-печати [Электронный ресурс]. URL: <https://3dfly.com.ua/blog/kontrol-kachestva-3d-pechati> (дата обращения: 03.03.2021).
5. Straub J. Initial Work on the Characterization of Additive Manufacturing (3D Printing) Using Software Image Analysis. Machines 2015, 3, 55–71 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/3/2/55> (дата обращения: 03.03.2021).
6. Zeqing Jin, Zhizhou Zhang, Grace X. Gu Autonomous in-situ correction of fused deposition modeling printers using computer vision and deep learning, Manufacturing Letters, Vol. 22, 2019, p. 11–15, ISSN 2213-8463 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846319300847> (дата обращения: 03.03.2021).
7. Goh G. D., Sing S. L. & Yeong W. Y. A review on machine learning in 3D-printing: applications, potential, and challenges. ArtifIntellRev 54, 63–94 (2021) [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-020-09876-9#citeas> (дата обращения 03.03.2021).
8. Ugandhar Delli, Shing Chang, Automated Process Monitoring in 3D-Printing Using Supervised Machine Learning, Procedia Manufacturing, Vol. 26, 2018, P. 865–870, ISSN 2351-9789 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918307820> (дата обращения: 03.03.2021).
9. Paraskevoudis, K.; Karayannis, P.; Koumoulos, E. P. Real-Time 3D-Printing Remote Defect Detection (Stringing) with Computer Vision and Artificial Intelligence. Processes 2020, 8, 1464 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/11/1464> (дата обращения: 03.03.2021).
10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. : пер. с англ. М. : Изд. дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
11. Тарик Рашид Создаем нейронную сеть : пер. с англ. СПб. : ООО «Альфа-книга», 2017. 272 с.

УДК 621.454.2

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРАХ ЖРД

Е. П. Талай, 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: il20596@mail.ru; nazarov@sibsau.ru

Рассмотрены методы по снижению воздействия возмущающих факторов на устойчивую работу жидкостного ракетного двигателя.

Ключевые слова: методы снижения, неустойчивость, жидкостный ракетный двигатель, высокочастотные колебания, низкочастотные колебания.

Устранение нестационарных процессов горения компонентов топлива в камере ЖРД, является одной из важнейших задач, которые решаются при расчете и проектировании двигателя. Только стабильные и качественные процессы горения в камере способны обеспечить необходимые значения тяги и удельного импульса, достаточные для выведения полезного груза и самого летательного аппарата на околоземную орбиту или в дальнее космическое пространство.

Возникновение неустойчивости рабочих процессов, сопровождается колебаниями давления в камере сгорания с недопустимой, обычно возрастающей во времени амплитудой. Неустойчивость существенно нарушает работу двигателя, так как ей сопутствуют весьма вредные явления: мощные вибрации, механические повреждения, термическое разрушение внутренних стенок камеры, возникновение неустойчивости тяги, расхода топлива и удельного импульса.

Если колебания не вызывают разрушения отдельных агрегатов двигателя, то они могут стать причиной ненормальной работы некоторых систем и агрегатов ЖРД и, в частности, его систем регулирования, то есть снижают надежность работы двигателя. Поэтому работам по выявлению причин неустойчивости рабочих процессов, ликвидации колебаний или снижению их амплитуды уделяется большое внимание. Естественно это требует больших затрат, удлиняет и удорожает этап доводки двигателя.

Высокие значения параметров процессов в агрегатах ЖРД (температуры и тепловые потоки, расходонапряженности и скорости продуктов сгорания, давление и мощности) способствуют возникновению неустойчивости процессов, порождающей автоколебательные явления.

Сложные, процессы, происходящие в ЖРД, до настоящего времени полностью не изучены. В связи с этим имеющиеся теоретические работы по устойчивости ЖРД позволяют пока устанавливать лишь качественные закономерности и не дают возможности заранее надежно рассчитывать устойчивость двигателя, особенно против высокочастотных колебаний.

При колебаниях любой механической системы происходят потери колебательной энергии. Колебательные процессы в камере сгорания тоже происходят с потерями

энергии колебаний. Энергия уменьшается из-за наличия молекулярного и турбулентного трения в газе, диссипации на упругих элементах, вследствие выноса энергии колебаний с газом, покидающим камеру сгорания. Для поддержания и развития колебаний необходим источник энергии, восполняющий потери колебательной энергии, и механизм, приводящий к взаимодействию источника энергии с процессом колебаний.

Различают несколько типов неустойчивости по предполагаемому механизму возникновения или по частоте колебаний, поэтому для устранения каждого типа неустойчивости требуются свои методы. Форма колебаний значений параметров, их амплитуда и частота могут изменяться в широких пределах: по форме, по частоте, по амплитуде.

Наиболее распространена классификация колебаний по диапазонам их частот. Диапазон частот колебаний давления при низкочастотной неустойчивости не превышает нескольких сот Герц. При высокочастотной неустойчивости частоты колебаний давления близки к расчётным характеристикам собственных акустических частот камеры сгорания и составляют от нескольких сотен Герц и выше. Однако следует отметить, что четких границ между неустойчивостью на различных частотах проводить нельзя, это в ряде случаев может привести к ошибочным суждениям.

Факторы, оказывающие влияние на процесс образования продуктов сгорания, в той или иной степени оказывают влияние и на развитие низкочастотных колебаний. Характерным временем процесса горения является время преобразования – $\tau_{пр}$. При уменьшении $\tau_{пр}$ расширяются области устойчивости, частота возникающих колебаний возрастает, а их амплитуда уменьшается.

Уменьшения $\tau_{пр}$ можно достигнуть за счет выбора более активных компонентов топлива, при переходе на режим с большим давлением в камере сгорания p_k .

Увеличение перепада на форсунках Δp_f и наличие в топливных магистралях дроссельных шайб с большим перепадом давлений также приводят к расширению области устойчивости режима работы.

Оказывают влияние на устойчивость и такие параметры, как приведенная длина $L_{пр}$, относительная расходонапряженность, так как от выбора этих параметров (и системы смесеобразования) зависит полнота преобразования топлива. С увеличением $L_{пр}$ двигатель становится более устойчивым, частота возникающих колебаний уменьшается. Вместо приведенной длины в качестве характерного параметра может быть выбрана постоянная времени камеры T_k , связанная с $L_{пр}$ определенным соотношением для выбранного топлива.

Влияние на низкочастотную устойчивость относительной расходонапряженности противоположно влиянию длины $L_{пр}$.

На устойчивость двигателя к низкой частоте могут влиять и другие факторы, например, длина трубопроводов, наличие упругих элементов в топливных трактах и т. д.

Акустические свойства камеры сгорания как высокочастотной колебательной системы определяются ее геометрическими размерами, а процесс горения, являющийся источником энергии, зависит от вида топлива, конструкции смесительных элементов и параметров рабочих процессов.

Геометрия камеры сгорания и сужающейся части сопла, форма камеры сгорания оказывают существенное влияние на устойчивость к колебаниям. Наиболее заметное влияние оказывает отношение длины камеры к ее диаметру L/d и относительная площадь входного сечения сопла (их уменьшение обычно является стабилизирующим фактором). Однако следует учитывать, что увеличение запаса устойчивости для одних мод колебаний, может уменьшить его для других.

Весьма существенная роль в развитии высокочастотных колебаний принадлежит организации смесеобразования. Конструкция смесительной головки, тип и размещение смесительных элементов по ее поверхности определяют характеристики распыления и, тем самым, чувствительность процесса горения к возмущениям. Спектр распыла и сред-

ний размер капель в спектре определяют, как частоту колебаний, соответствующую максимальной чувствительности процесса горения, так и саму чувствительность к этим колебаниям. Обычно эти показатели снижаются с увеличением диаметра отверстий (форсунок) и уменьшением скорости впрыска того компонента, который определяет эту чувствительность. Наиболее целесообразно этот эффект может быть использован для смесительных элементов, размещенных во внешнем поясе смесительной головки, где расположены области с максимальными колебаниями давления. Связь между процессами горения, колебаниями давлениями и расхода может быть уменьшена при снижении количества впрыскиваемого компонента в зоны, где колебания давления или скорости максимальны. Кроме того, чувствительность процесса горения к поперечным перемещениям компонентов может быть существенно уменьшена такой организацией распыла, при которой обеспечиваются наименьшие градиенты изменения состава смеси в поперечном направлении. Соответствующим образом следует также выбирать скорости компонентов на выходе из форсунок и в особенности отношение скоростей впрыска компонентов, так как от них зависит спектр распыла капель топлива по размерам. Известно, например, что для крупномасштабных и кислородно-керосиновых ЖРД с двухкомпонентными струйными форсунками, отношение скоростей впрыска более летучего кислорода и менее летучего керосина составляет 3 и более, при этом обеспечивается устойчивость горения.

Расходонапряженность является проектным параметром двигателей, который в ряде случаев влияет на устойчивость горения. Этот параметр часто рассматривается как критерий для оценки трудности борьбы с высокочастотной неустойчивостью.

Важным конструктивным средством, обеспечивающим подавление колебаний в камере сгорания, является оптимальное распределение процесса горения (выделение энергии) по длине камеры сгорания. Для случая продольных колебаний это означает, что в целях уменьшения связи между колебаниями давления, пучности которых находятся вблизи огневого днища, и процессом горения необходимо растягивать зону горения вдоль камеры сгорания.

Для этого смесительную головку камеры двигателя рекомендуется оснащать форсунками с различными характеристиками распыления. Данная рекомендация вступает в некоторое противоречие со стремлением предприятий ракетного двигателестроения к повышению точности геометрических размеров форсунок и внедрению прогрессивных методов обработки. Так, при изготовлении центробежных форсунок со шнековыми завихрителями для комплектации смесительных головок двигателей второй ступени космической ракеты-носителя использовалась технология фрезерования винтовых канавок шнека на резьбофрезерных станках. В процессе обработки обеспечивалась точность допуска на средний диаметр $0,03 \div 0,04$ мм, допуск на глубину канавки $0,02 \div 0,04$ мм, допуск на шаг канавки $0,03 \div 0,05$ мм, эллипсность 0,03 мм. (конструкцию шнека см. на рис. 1). При проведении контрольно-технологических стендовых испытаний высокочастотная активность не наблюдалась.

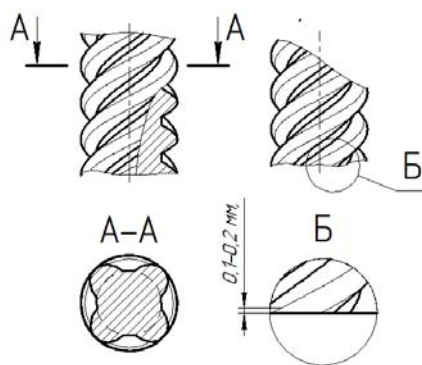


Рис. 1. Конструкция шнека

С целью повышения производительности труда, качества выпускаемой продукции, а также улучшения коэффициента использования материала, на предприятии была внедрена технология накатки винтовых канавок роликами на резьбонакатных станках. В результате, помимо значительного повышения производительности труда и снижения металлоемкости изделия, существенно повысилась точность формообразования канавок: допуск на средний диаметр составил $0,01 \div 0,02$ мм, на глубину канавки $0,01 \div 0,03$ мм, на шаг канавок $0,02 \div 0,04$ мм, эллипсность уменьшилась до $0,02$ мм.

Однако в ходе стендовых испытаний двигателей с форсунками, изготовленными по новой технологии, была обнаружена явно выраженная высокочастотная неустойчивость с параметрами, препятствующими нормальной эксплуатации ЖРД в составе ракеты-носителя.

В результате экспериментальных исследований с анализом телеметрической и статистической информации, установлено, что причиной высокочастотной неустойчивости являлась узкая локализация фронта пламени, обусловленная практически одинаковыми гидравлическими характеристиками всех форсунок, расположенных в смесительной головке камеры сгорания.

На основании вышеуказанных результатов исследования в технологический процесс обработки канавок внесены изменения, способствующие некоторому разбросу (неодинаковости) в пределах поля допуска геометрических размеров канавок. В частности, предусмотрена периодическая замена формообразующего инструмента (подвижного ролика), изменение усилия нажима ролика (Н), скорости обработки (м/мин), величины поперечной подачи (мм/об). С этой целью, регламентируется количество обрабатываемых деталей с последующей заменой инструмента и режимов обработки.

На рис. 2 показано распределение фактических размеров глубины канавок, в значительной степени, определяющих качество распыла и «дальнобойность» форсунок. Аналогичное распределение строится для ширины канавок, внутреннего диаметра и других характерных размеров шнека.

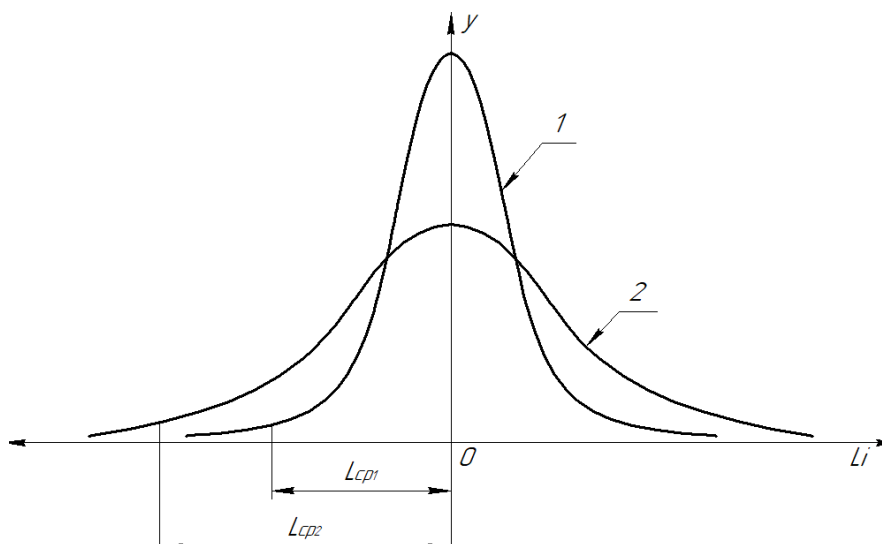


Рис. 2. Распределение измеренных размеров глубины канавок:
 L_{cp1} , L_{cp2} — среднее арифметическое значение действительных размеров;
 L_i — текущий действительный размер.

Кривая 1 характеризует дифференциальный закон нормального распределения вышеуказанных размеров канавок шнеков, изготовленных по первоначальной технологии накатки роликом. Кривая 2 построена по результатам измерения глубины канавок, обработанных с учетом принятых изменений технологического процесса.

Из анализа графиков 1 и 2 на рис. 2 следует, что среднее квадратичное отклонение размеров, соответствующих распределению 2 позволяет расширить диапазон гидравлических характеристик форсунок и, следовательно, рассредоточить фронт пламени в камере сгорания.

В результате проведенных работ высокочастотные колебания в камере ЖРД были устранены и двигатель длительное время находился в эксплуатации.

При поперечных колебаниях максимальные значения амплитуды колебаний также имеют место вблизи огневого днища; далее по потоку происходит быстрый спад амплитуды колебаний. Таким образом, и для случая поперечных колебаний распределение кривой выгорания по оси является важной характеристикой. Для обеспечения более устойчивой работы ЖРД можно регулировать распределение процесса горения в направлении, перпендикулярном оси камеры сгорания. Это достигается перемещением места выделения энергии в область, которая считается менее чувствительной по отношению к возбуждению к подпитке колебаний данного типа. Следовательно, основной задачей конструктора является определение участков смесительной головки, наиболее чувствительных в отношении изменений давления и скорости для различных поперечных колебаний, и организация структуры горения таким образом, чтобы двигатель был устойчивым.

Существенное влияние на высокочастотную устойчивость в камере сгорания оказывают также пристеночные эффекты, создаваемые вблизи огневой стенки для уменьшения тепловых потоков к ней. Известно, что уменьшение количества непрореагировавшего топлива по периферии камеры повышает устойчивость процесса по отношению к тангенциальным методам колебаний. Наличие же богатого горючим защитного пристеночного слоя усиливает волну и увеличивает ее крутизну, что в свою очередь приводит к увеличению теплового потока. К факторам, регулирующим устойчивость, связанным с пристеночным слоем, относят равномерное распределение массового расхода и соотношения компонентов при впрыске в пристеночном слое, а также уменьшение взаимодействия основного потока с пристеночным слоем. Это достигается правильной ориентацией пристеночных смесительных элементов, расположением осей их факелов распыла по хорде окружности головки.

Среди конструктивных мероприятий находят также применение специальные антипульсационные перегородки. Их роль в повышении устойчивости состоит в изменении акустических характеристик камеры и предохранении предпламенной зоны от воздействия пульсаций. В качестве примера на рис. 3 показан общий вид антипульсационных перегородок.

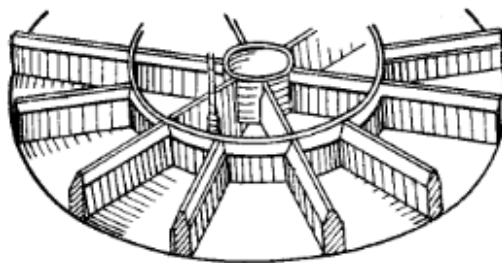


Рис. 3. Пример конфигурации антипульсационных перегородок

Установка антипульсационных перегородок была предложена главным конструктором КБ «Химмаш» А. М. Исаевым. На смесительной головке камеры одного из двигателей, разработанных в КБ «Химмаш», закреплены прихватками аргонно-дуговой сварки к огневому (нижнему) днищу перегородки, изготовленные из стали 12Х18Н10Т

шириной $60 \pm 0,5$ мм, толщиной $2 \pm 0,2$ мм. В двигателях, работающих по замкнутой схеме (с дожиганием генераторного газа), в качестве антипульсационных перегородок целесообразно применение выдвинутых в камеру сгорания двухкомпонентных газожидкостных форсунок по схеме, разработанной в НПО «Энергомаш» им. академика В. П. Глушко.

Важное значение имеют и другие меры, направленные на подавление колебаний. Среди них добавка к горючему твердых частиц, использование аблирующих покрытий на стенках, установка акустических поглотителей способствуют поглощению энергии колебаний и другие.

В заключение следует отметить, что некоторые из многочисленных мер по устранению неустойчивости рабочего процесса в камерах двигателей имеют разнонаправленный характер, а иногда противоположны друг другу. В этом заключается основная трудность достижения устойчивой работы ЖРД.

Библиографические ссылки

1. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для вузов / под ред. Д. А. Ягодникова. 2-е изд., переработанное и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 488 с.
2. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей : учебник для студентов вузов / Г. Г. Гахун [и др.] ; под ред. Г. Г. Гахуна. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.
3. Алемасов В. Е., Дрегаллин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей / под ред. В. П. Гахуна. М. : Машиностроение, 1980. 553 с.
4. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД: учебник для вузов. М. : Машиностроение, 1986.
5. Пекарская И. В., Голиковская К. Ф. Особенности нестационарных режимов работы ЖРД // Актуальные проблемы авиации и космонавтики ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017.

© Талай Е. П., Назаров В. П., 2021

СТЕНД ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МИКРОТУРБИН. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ МИКРОТУРБИН С НАПРАВЛЯЮЩИМ ЛОПАТОЧНЫМ АППАРАТОМ

Ю. Н. Шевченко, О. В. Шилкин, К. А. Чайкина

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: spsp99@mail.ru

Рассмотрена схема экспериментального стенда и методика проведения физического моделирования рабочих процессов в газовой среде микро турбомашин, встроенных в систему обеспечения теплового режима модулей космического летательного аппарата. В состав стенда включены системы позволяющие вести измерения полей скоростей и давлений в характерных сечениях проточной части микротурбины, а также измерения режимных и энергетических характеристик как турбины, так и энергетических характеристик электрогенератора потребителя. В качестве пробных испытаний проведены сравнительные испытания двух сборок турбогенератора: с направляющим лопаточным аппаратом, между тангенциальным подводом и рабочим колесом и сборка без лопаточного аппарата. Сравняются поля скоростей и давлений на рабочем колесе, а также энергетические характеристики турбогенератора в целом.

Ключевые слова: рабочее колесо реактивной центростремительной турбины, датчики полного и статического давлений, направляющий аппарат, электрогенератор – потребитель в балансирном подвесе, для измерения моментной характеристики на корпусе генератора, датчики температуры-термисторы, блок индикации датчиков давлений и температуры.

Для получения экспериментальных характеристик энергетической установки, подтверждения данных теоретических исследований и проведения верификации расчетного алгоритма были произведены испытания физического макета энергетической установки.

Принципиальная схема экспериментального стенда для проведения испытаний физического макета энергетической установки представлена на рис. 1. Стенд состоит из турбинного узла с набором сменных колес, двигателя в балансирном подвесе, пульта управления расходом рабочего тела, ресивера, компрессора, системы измерений.

Принцип работы испытательного стенда следующий. Модельное рабочее тело подается в проточную часть турбины из ресивера 3 через пульт управления расходом с редуктором 4. Энергия рабочего тела приводит во вращение ротор турбины, выполненный на одном валу с ротором мотор-двигателя 2. Отработавшее рабочее тело выбрасывается из турбины в атмосферу. Расход рабочего тела задается редуктором 4 пульта.

Система измерений испытательного стенда позволяет контролировать параметры температуры, давления, расхода, крутящего момента, скорости вращения ротора. Все измеренные показатели системы измерений фиксируются измерительным комплексом 10. Измеряемые на стенде параметры представлены в табл. 1.

В качестве контрольных точек стенда используются точки в характерных сечениях проточной части турбины (входное сечение (вх), сечение в канале подводящего устройства (0), сечение на входе в колесо (1), выходное сечение (вых)). Для возможно-

сти оценки степени парциальности турбины для сечения на входе в колесо измерения проводятся в четырех точках, отстоящих друг от друга на 90° (точки 1-1, 1-2, 1-3, 1-4). Всего на стенде задействовано семь контрольных точек, обозначение которых представлено в табл. 2. Положение точек показано на рис. 2.

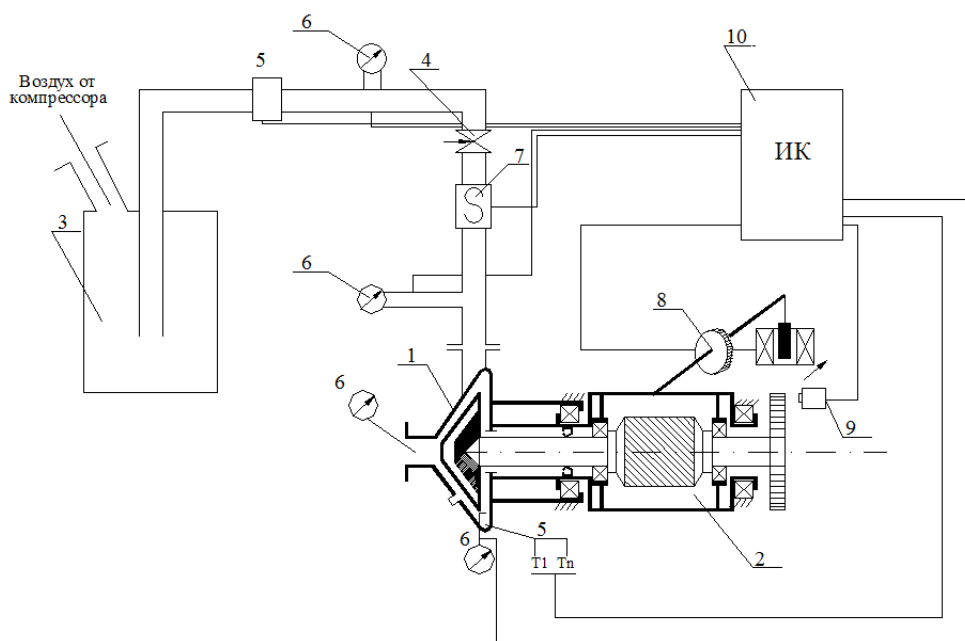


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – турбинный узел; 2 – двигатель в балансирном подвесе; 3 – ресивер; 4 – редуктор управления расходом рабочего тела; 5 – датчик температуры; 6 – датчик давления; 7 – датчик расхода; 8 – датчик крутящего момента; 9 – датчик оборотов; 10 – измерительный комплекс

Таблица 1

Измеряемые на стенде параметры

№	Параметр	Обозначение
1	Статическое и полное давление на входе в турбинный узел	$P_{ВХ}, P_{ВХ}^*$
2	Статическое и полное давление на выходе из турбинного узла	$P_{ВЫХ}, P_{ВЫХ}^*$
3	Статическое и полное давление в контрольных точках	P, P^*
4	Температуры в контрольных точках	T
5	Скорость вращения ротора турбины	n
6	Сила рычага двигателя в балансирном подвесе	F
7	Расход модельного рабочего тела	V
8	Показания напряжения и силы тока генератора	U, I

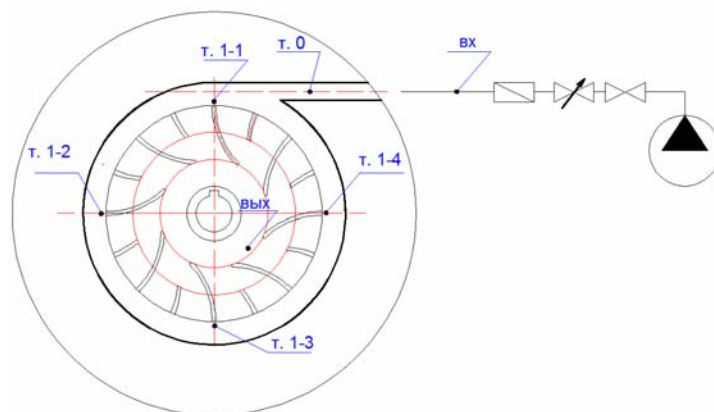


Рис. 2. Расположение контрольных точек

Контрольные точки системы измерения

№	Обозначение	Примечание
1	вх	входное сечение
2	0	сечение в канале подводящего устройства
3	1-1	сечение на входе в колесо
4	1-2	
5	1-3	
6	1-4	
7	вых	выходное сечение

Стенд испытаний физического макета энергетической установки позволяет проводить испытания турбин различных типов на модельном рабочем теле при давлении на входе в турбинный узел до 3 атм и скорости вращения ротора турбины до 10000 об/мин.

Измерительная система для испытательного стенда автоматизирована и построена на базе контролеров National Instruments NI cDAQ9181 и NI USB 6008. Считывание и фиксация сигналов датчиков измерительной системы производится в графической среде разработки LabVIEW 2012. При запуске программы производится считывание конфигурационных файлов, содержащих описание измерительных каналов и сразу же начинается общий цикл измерений с частотой опроса 1 с. По окончании измерений для каждого испытания записывается файл, содержащий в себе показатели измерительных приборов и их изменение за все время проведения испытания.

Давление в системе контролируется датчиками давления ИКД-6, которые измеряемую величину возвращают в вольтах. Для перевода показаний датчиков ИКД-6 в формат единиц измерения давления используются тарировочные характеристики, полученные одновременно с градуацией давления по гидравлическому столбу жидкости.

Температура в системе контролируется термисторами B57861-S 103-F40, с базовым сопротивлением 10 кОм, возвращающих измеряемую величину в вольтах. Для перевода показаний термисторов B57861-S 103-F40 в формат единиц измерения температуры используются тарировочные характеристики, полученные одновременно с градуацией температуры по ртутному термометру.

Для компенсации помех датчиков температуры и давления используются фильтры помех, реализованные на базе пленочных конденсаторов емкостью до 3,3 мкФ.

Расход рабочего тела контролируется датчиком расхода SMC PF2A7.

Показания напряжения и силы тока генератора фиксировались по показаниям амперметра и вольтметра [1].

В данном экспериментальном исследовании использовалось радиальное колесо с наружным диаметром $d_1 = 45$ мм, высотой лопатки на входе $b_1 = 3$ мм, высотой лопатки на выходе $b_2 = 3$ мм и степенью реактивности $\rho = 0,5$. Конструкция колеса представлена на рис. 3. Перед входом в рабочее колесо был размещен направляющий аппарат для осуществления организованного движения потока рабочего тела в полости турбины. Конструкция направляющего аппарата показана на рис. 4.

В качестве подводящего устройства использовался подвод К2,9.

Схема размещения колеса d45 в корпусе турбинного узла показана на рис. 5. Смонтированное в корпусе колесо d45 представлено на рис. 6.

При испытаниях контролировались параметры температуры и давления на входе, в сечениях 0 и 1, на выходе из турбины, крутящий момент (по балансирному подвесу), угловая скорость вращения, показатели генератора. Для контроля давлений использовались датчики давления ДД1...ДД12 (тип датчика ИКД6) системы измерений. Температура контролировалась датчиками температуры ДТ1...ДТ6 (тип датчика термистор).

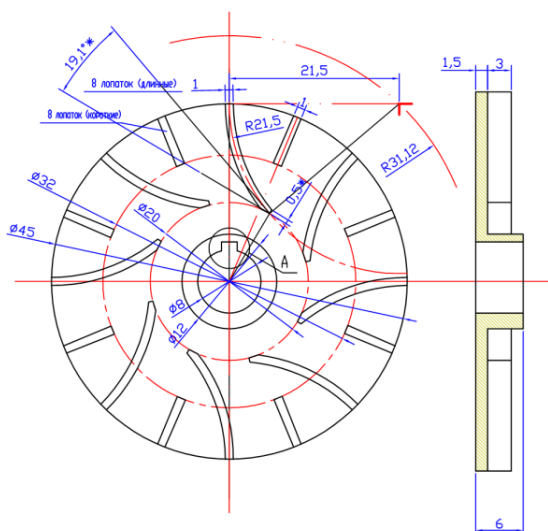


Рис. 3. Конструкция колеса d45

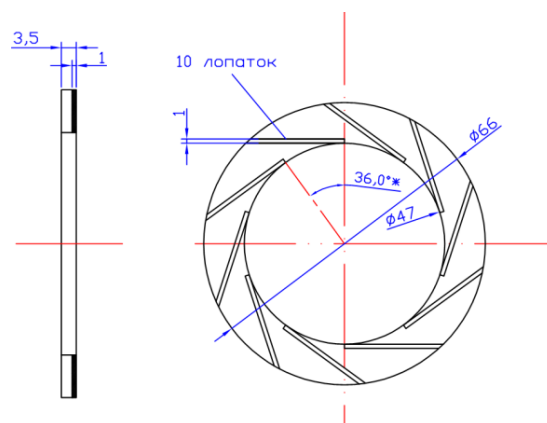


Рис. 4. Конструкция направляющего аппарата для колеса d45

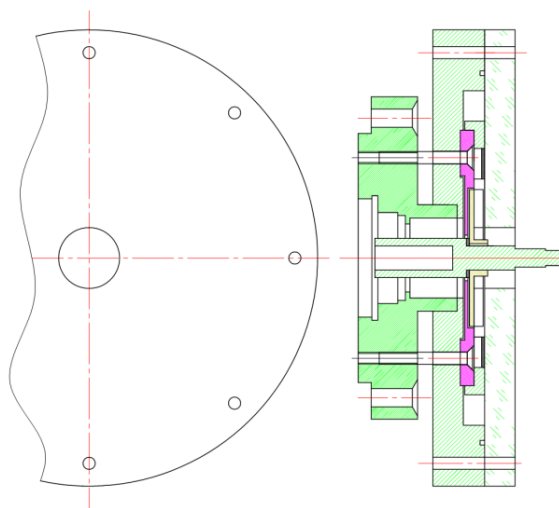


Рис. 5. Схема размещения колеса d45 в корпусе турбинного узла

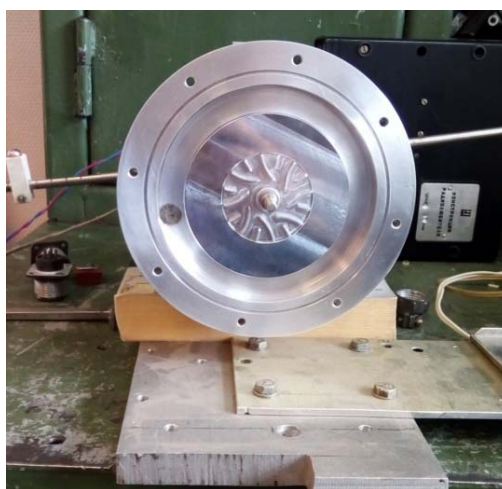


Рис. 6. Колесо турбины d45, смонтированное в корпусе

В контрольных точках 0, 1-1, 1-2, 1-3, 1-4 контролировались параметры как полного, так и статического давления. Для контроля полного давления использовался приемник с трубкой Пито. Схема расположения датчиков температуры и давления приведена на рис. 7. Внешний вид сборки с колесом d45 с вмонтированными датчиками температуры и приемниками давления в контрольных точках показан на рис. 8.

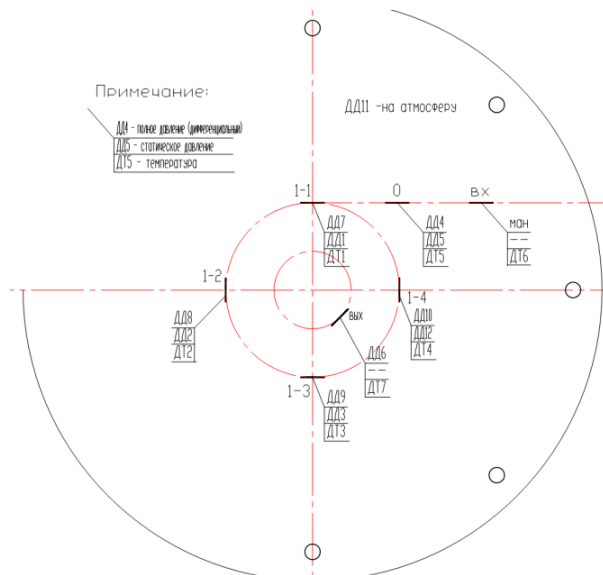


Рис. 7. Схема расположения датчиков системы измерений в контрольных точках проточной части турбинного узла

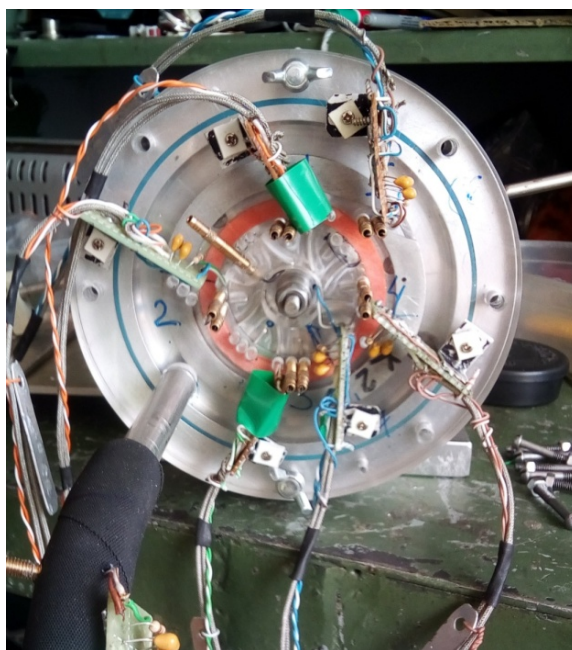


Рис. 8. Внешний вид сборки с колесом d45 с вмонтированными датчиками температуры и приемниками давления в контрольных точках

Испытания проводились в две серии для различных уровней нагрузки генератора (минимальная и максимальная нагрузка). Для каждой серии проводился ряд замеров параметров турбины в установившемся режиме для различных скоростей вращения ротора турбины.

С использованием полученных экспериментальных данных с использованием алгоритма для анализа данных в проточном тракте турбинного узла [3] была получена оценка кинематических и энергетических параметров для колеса d45 с подводом К2,9 с направляющим аппаратом. Результаты определения скоростей в контрольных точках представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры скоростей в контрольных сечениях

Скорость вращения, об/мин	C0, м/с	C1-1, м/с	C1-2, м/с	C1-3, м/с	C1-4, м/с
1500	83,05701	214,1687	167,9801	167,9631	222,717
990	82,50442	196,5503	156,2336	155,3712	204,5732
750	85,9834	187,069	150,0343	148,5564	194,6186
600	86,72267	179,371	144,3497	143,0138	186,2853
300	82,45144	171,7031	138,9905	137,498	177,7545
3900	90,20248	178,6141	118,2568	116,1115	135,0827
1980	78,31155	158,23	105,4269	106,3985	118,7051
990	84,36915	147,6683	100,3089	98,47863	110,8112

Данные по скоростям на входе в рабочее колесо из табл. 3 показывают отсутствие парциальности для колеса с направляющим аппаратом, в результате чего поток рабочего тела на входе в колесо распределяется практически равномерно.

Полученные экспериментальные данные позволяют определить энергетические показатели турбины при различных уровнях нагрузки на генератор. Результаты расчета энергетических показателей приведены в табл. 4.

Таблица 4

Энергетические показатели турбины d45 с направляющим аппаратом

Скорость вращения, об/мин	$\dot{m}$, кг/с	$L_{ад}$, Дж/кг	$N_{затр}$, Вт	$N_{полезн}$, Вт	η , %
1500	0,006897	33183,08	228,878	5,834371	2,549118
990	0,006487	29101,75	188,7769	3,080548	1,631846
750	0,006265	26835,62	176,1882	2,046892	1,161765
600	0,006087	25102,26	162,8489	1,439145	0,88373
300	0,005617	25558,7	153,7759	0,622333	0,404701
3900	0,007645	38093,79	291,2382	11,18109	3,839155
1980	0,006166	33130,41	204,2964	4,470003	2,187999
990	0,006485	29717,21	192,7155	2,005565	1,040687

Максимальная полезная мощность на колесе d45 для данных серий экспериментов была достигнута при максимальной нагрузке генератора при скорости вращения 3900 об/мин и составила 11,18 Вт при затраченной мощности 291,23 Вт (КПД 3,84 %).

С использованием полученных экспериментальных данных для серии испытаний аналогичной сборки без направляющего аппарата, с использованием алгоритма для анализа данных в проточном тракте турбинного узла была получена оценка кинематических и энергетических параметров. Результаты определения скоростей в контрольных точках представлены в табл. 5 [2].

Данные по скоростям на входе в рабочее колесо из табл. 5 показывают, что при отсутствии направляющего аппарата парциальность турбины становится явно выраженной, в результате чего наблюдается картина дифференциации скоростей на входе в колесо по сечениям 1-1, 1-2, 1-3, 1-4.

Таблица 5

Параметры скоростей в контрольных сечениях (без направляющего аппарата)

Скорость вращения, об/мин	C0, м/с	C1-1, м/с	C1-2, м/с	C1-3, м/с	C1-4, м/с
3000	244,7024	223,361	131,8869	62,3745	63,49094
1980	233,3268	215,5525	126,8006	54,97359	64,54394
990	230,4171	200,2203	118,4998	48,07903	61,5324
3990	250,4676	221,7578	137,3207	66,68831	61,3451
3000	240,6605	225,2433	130,8386	59,01365	62,68571
1980	236,5428	212,8843	126,6993	50,79162	58,73017
990	233,4532	203,9183	122,6596	52,04928	66,87256

Полученные экспериментальные данные позволяют определить энергетические показатели турбины при различных уровнях нагрузки на генератор. Результаты расчета энергетических показателей приведены в табл. 6.

Таблица 6

Энергетические показатели турбины d45 без направляющего аппарата

Скорость вращения, об/мин	$\dot{m}$, кг/с	L_{ad} , Дж/кг	$N_{затр}$, Вт	$N_{полезн}$, Вт	η , %
3000	0,008338	50857,51	424,0399	4,876562	1,150024
1980	0,007601	50858,95	386,5958	2,560706	0,662373
990	0,007133	41337,64	294,8477	0,95144	0,322689
3990	0,009098	55166,96	501,9322	12,519	2,494162
3000	0,008217	51166,38	420,45	8,313979	1,9774
1980	0,007728	46874,19	362,2242	4,678582	1,291626
990	0,007331	46717,59	342,4796	1,981498	0,578574

Сравнительный анализ результатов испытаний позволяет сделать вывод:

- использование направляющего аппарата позволяет выровнять эпюры скоростей на входе в рабочее колесо микротурбины, что, несомненно, снижает значение вектора осевой силы на ротор микротурбины – основного фактора, определяющего ресурс узлов качения;
- направляющий аппарат незначительно увеличивает общий КПД микротурбины;
- рассмотренный алгоритм и схема экспериментального стенда позволяют и предполагают экспериментальные исследования по комплексной доводке конструкции проточной части микротурбины.

Библиографические ссылки

1. Галеркин Ю. Б., Рекстин Ф. С. Методы исследования центробежных компрессорных машин. Л. : Машиностроение, 1969. 304 с.
2. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2003. 336 с.
3. Методика проведения энергетических и частичных балансовых испытаний микротурбин [Электронный ресурс] / Ю. Н. Шевченко, О. В. Шилкин, Е. Н. Луговой и др. // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. (26–28 февраля 2020 г., Красноярск) ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. С. 102–106.

© Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Чайкина К. А., 2021

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

П. А. Воложанин, М. И. Толстомятов, Л. А. Бабкина*

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

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

*E-mail: L_babkina@mail.ru

Разработана программа на языке программирования C# для автоматического (параметрического) моделирования контура камеры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Программа обеспечивает построение контура камеры ЖРД на основе расчетных данных, полученных в результате термодинамического расчета. Геометрическая модель является базовой для расчета охлаждения камеры ЖРД.

Ключевые слова: язык программирования C#, геометрическая модель, камера жидкостного ракетного двигателя.

В учебном процессе направления подготовки 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей в курсе дисциплины «Теория и расчет ракетных двигателей», проектирование ЖРД начинается с термодинамического расчета, в результате которого определяются геометрические размеры камеры двигателя, состав и свойства продуктов сгорания и др. [1; 2]. Расчет охлаждения камеры – обязательная составная часть курсового и дипломного проектов.

Создание геометрической модели камеры достаточно трудоемкий процесс, требующий от студентов навыков трехмерного твердотельного моделирования в современных системах автоматизированного проектирования (САПР). Построенная геометрическая модель далее используется для расчета охлаждения камеры двигателя, в ходе которого определяются коэффициенты теплоотдачи, тепловые потоки, распределение температуры охладителя и огневой стенки камеры и др. параметры. Если данный расчет не удовлетворит требованиям по удельному импульсу, то требуется внести изменения в термодинамический расчет, после чего повторяется итерация по созданию геометрической модели контура камеры ЖРД. Далее повторяется расчет охлаждения и т. д. до тех пор, пока не будет выбрана схема подвода охладителя к тракту, получены все необходимые габаритные геометрические параметры камеры двигателя и тракта охлаждения, позволяющие приступить непосредственно к конструированию ЖРД.

Таким образом, чтобы не начинать после каждой итерации создание геометрической модели камеры ЖРД заново по новым, уточненным размерам, в работе предложена программа на языке программирования C# с использованием SolidWorks API [3] для автоматического построения контура камеры ракетного двигателя. Построение камеры сгорания и сопла ЖРД происходит по строго определенным геометрическим выражениям определенными из введенных данных.

После запуска программы, появляется диалоговое окно, в которое пользователь должен ввести значения параметров: диаметр камеры сгорания, диаметр критики, диаметр среза сопла, угол раскрытия сопла в критике, средний угол раскрытия сопла, средний угол раскрытия сопла в срезе, длина цилиндрической части камеры, полученных в результате термодинамического расчета (рис. 1). После заполнения всех полей требуется запустить расчет, после чего дать команду «Построить».

В результате работы программы создается файл трехмерной геометрической модели камеры с расширением SOLIDWORKS Part (файл детали [4]), который может быть открыт для просмотра и редактирования в системе автоматизированного проектирования SolidWorks (рис. 3).

Геометрическая модель камеры автоматически разбивается на 11 сечений ($i=10$ участков). Количество участков определяет точность конечных результатов расчета. Одно из сечений совпадает с критическим сечением камеры двигателя, еще одно сечение совпадает со срезом сверхзвукового сопла. Если в сечении происходит слишком резкое изменение параметров продуктов сгорания (скорости и температуры) или будут получены неудовлетворительные результаты окончательного расчета, следует изменить расчетную схему таким образом, чтобы избежать резких скачков давления (рис. 3, 4).

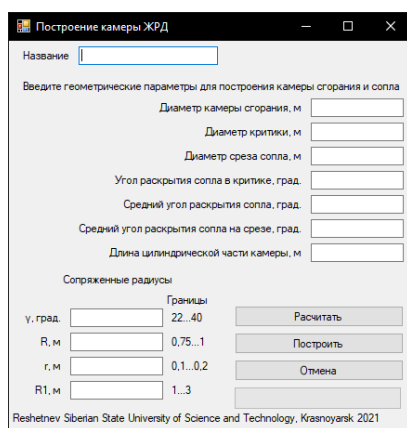


Рис. 1. Диалоговое окно программы

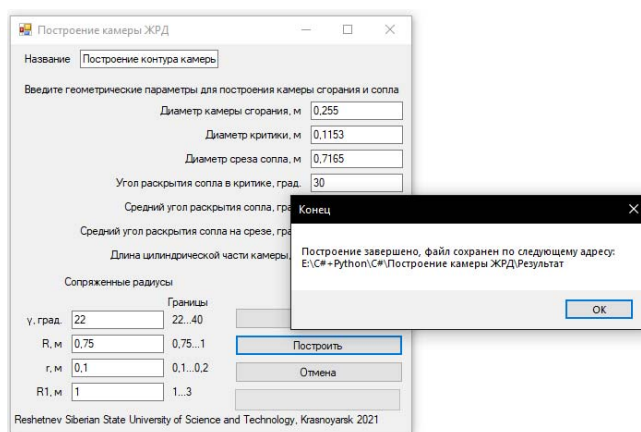


Рис. 2. Диалоговое окно программы и сообщение о завершении работы программы

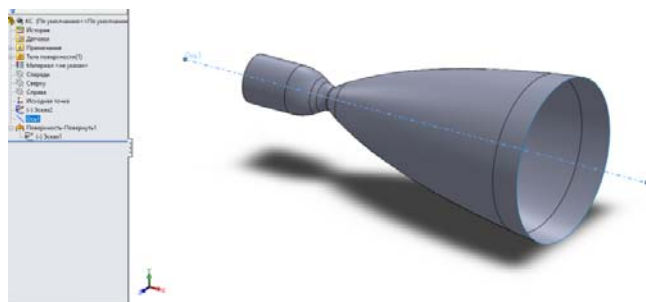


Рис. 3. Результат работы программы – геометрическая модель камеры ЖРД

ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ АВТОМАТИКИ ЖРД

А. О. Алексеев, В. П. Назаров, К. Ф. Голиковская

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@sibsau.ru

Рассматриваются основные методы испытаний узлов и агрегатов автоматики ЖРД, которые используются на предприятиях ракетно-космической промышленности.

Ключевые слова: узлы и агрегаты автоматики, испытания, прочность, герметичность.

Работоспособность жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) во многом определяется правильным функционированием его отдельных систем, узлов и агрегатов. Одной из сложных задач, возникающих при создании ЖРД, является обеспечение удовлетворительного протекания переходных процессов.

Переходные процессы в значительной мере обеспечивают реализацию основного функционала двигателя, так как большинство дефектов и аварий, которые могут возникать при работе ЖРД, происходят именно на неустановившихся режимах – при запуске или останове. Поэтому дальнейшее развитие ЖРД тесно связано с необходимостью глубокого анализа и исследования агрегатов системы управления, разработки прогрессивных технологий их изготовления и испытаний, что является одним из определяющих факторов надежности двигателя в целом [1].

По своему назначению узлы и агрегаты автоматики выполняют функции автоматического управления и регулирования переходных процессов при выполнении заданного режима подачи топлива ЖРД [2].

Клапаны – наиболее многочисленные и разнообразные узлы среди других агрегатов автоматики двигателя. В любом ЖРД имеется большое количество клапанов различного назначения, различной конструкции и принципа действия. По классификации профессора А. И. Эдельмана [3] топливные клапаны в зависимости от количества срабатываний делятся на два основных типа:

- многократного действия;
- однократного действия.

В свою очередь они могут подразделяться на различные группы: гидроклапаны, пневмоклапаны, электроклапаны. Клапаны однократного действия подразделяются на: мембранные гидropневмоуправляемые клапаны, пироклапаны.

Каждая из перечисленных групп клапанов имеет свое дальнейшее деление исходя из назначения и конструкции. Например, существуют нормально закрытые и нормально открытые клапаны, клапаны прямого действия и клапаны с чековым устройством.

Топливные клапаны также следует разделять на клапаны горючего и клапаны окислителя. Вид топлива, его физико-химические характеристики оказывают существенное влияние на выбор материалов деталей клапана и конструкцию всего агрегата.

К другой многочисленной группе узлов и агрегатов двигательной автоматики относятся регуляторы. Назначение агрегатов регулирования состоит в том, чтобы обеспе-

чивать (поддерживать) в процессе работы двигателя его основные параметры: тягу, соотношение компонентов в камере сгорания и газогенераторе, давление наддува топливных баков в заданных пределах, предусмотренных программой полета ракеты [4].

Регуляторы тяги – агрегаты, предназначенные для поддержания постоянным давления или расхода компонентов топлива, поступающих в камеру сгорания или газогенератор, а также изменения их по командам системы управления.

Регуляторы подразделяются на две группы:

- регуляторы прямого действия;
- регуляторы с приводом.

У регуляторов прямого действия регулирующий орган перемещается под непосредственным воздействием ЧСУ – чувствительно-сравнительного устройства.

У регуляторов второй группы дросселирующий орган перемещается под воздействием промежуточного усилителя – сервопривода, работающего на каком-либо виде энергии – электрической, гидравлической или пневматической.

Регуляторы давления газа, по принятой в ракетном двигателестроении терминологии, называются редукторами. В отечественных ЖРД с турбонасосной системой подачи топлива редукторы применяются для наддува топливных баков, в двигателях с вытеснительной системой подачи они обеспечивают давление газа для подачи жидкого топлива в камеру сгорания. Газообразным рабочим телом редукторов обычно являются сжатый воздух, азот, гелий. Расход газа находится в диапазоне $10 \div 120$ г/с при начальном давлении в шарбаллонах до 40 МПа, регулируемое давление составляет $0,2 \div 5$ МПа.

Стабилизаторы давления предназначены для стабилизации соотношения расчетных показателей давления горючего и окислителя по двум напорным магистралям подачи компонентов топлива в камеру сгорания и газогенератор. При этом стабилизатор устанавливают на одной магистрали, а опорное (командное) давление подводят с другой магистрали [5].

В пневмогидросистемах ЖРД применяются стабилизаторы давления двух типов:

- стабилизатор прямого действия;
- стабилизатор непрямого действия.

В стабилизаторе давления прямого действия усилие от чувствительного элемента передается непосредственно на исполнительный элемент. Таким образом, стабилизатор реагирует на изменение опорного давления, изменяет давление на выходе за счет дросселирования компонента, подаваемого на входе в стабилизатор. Стабилизатор давления непрямого действия конструктивно состоит из золотника и серводросселя. Чувствительно-сравнительное устройство золотника сравнивает действительное давление в регулируемой магистрали с опорным (командным) давлением в магистрали другого компонента, преобразует его в собственное давление золотника, которое соответствует заданному программой работы двигателя.

Выбор типа регулятора обусловлен комплексом сложных инженерных расчетов на стадии проектирования двигателя в зависимости от назначения ЖРД [6].

Несмотря на многообразие конструкций регуляторов, стабилизаторов, дросселей и клапанов можно выделить некоторые общие конструктивно-технологические требования к узлам и агрегатам автоматики ЖРД:

- герметичность подвижных и неподвижных уплотнений;
- стабильность времени срабатывания, т.е. постоянство времени от момента подачи команды на перемещение до момента начала перемещения;
- стабильность гидравлических характеристик;
- стойкость материалов в агрессивных средах;
- ресурс работы и длительность срока хранения;
- технологичность изготовления, минимальная стоимость.

Технологичность конструкции узлов автоматики означает возможность их серийного изготовления на универсальном и специальном оборудовании по стабильной технологической документации. При этом должна быть исключена необходимость подбора или подгонки деталей, т. е. сборка должна осуществляться по методу полной или, в отдельных случаях, частичной взаимозаменяемости [7].

В процессе промышленного производства изделий ракетно-космической техники особое внимание уделяется испытаниям всех деталей и сборочных единиц, входящих в состав конструкции изделия.

Узлы и агрегаты автоматики ЖРД проходят, как правило, следующий цикл технологических испытаний:

- испытания на прочность;
- испытания на герметичность, в том числе испытания уплотнений, диафрагм, мембран;
- гидродинамические испытания (гидропробив).

Этим испытаниям подвергается каждый узел, входящий в штатную комплектацию ЖРД. Другие виды испытаний: контрольно-выборочные испытания, испытания на срабатывание, виброиспытания проводятся по индивидуальным программам и в данной статье не рассматриваются.

Испытания на прочность агрегатов автоматики обычно проводят в статических условиях. При этом должна имитироваться наиболее тяжелая нагрузка при совместном действии давления компонента во внутренней полости и управляющего (командного) давления. Величина испытательного давления определяется при расчете узла на прочность в процессе проектно-конструкторских работ.

Испытания проводятся в специальных бронезащитных устройствах (бронекабинах). Рабочим телом для испытаний является дистиллированная вода, которая подается в узел специальным гидронасосом. При подготовке испытаний необходимо обеспечить равномерное заполнение всего внутреннего объема узла, не допуская образования «воздушных мешков». Давление требуется подавать одновременно во все полости узла, чтобы избежать деформации мембран, диафрагм и других тонкостенных деталей.

После подачи испытательного давления производится выдержка в течение 5÷7 мин, затем давление снижается на 15 % до давления осмотра. В этом состоянии разрешается провести внешний осмотр узла. Наличие сквозных дефектов, капель жидкости, влажных мест на поверхности не допускается и является браковочным признаком.

Испытания узлов и агрегатов автоматики на герметичность проводятся, в основном, манометрическими, газогидравлическими и газоаналитическими (масс-спектрометрическими) методами. Выбор метода испытаний определяется допускаемой величиной локальной или суммарной негерметичности, которая задана конструкторской документацией.

Наиболее простым и доступным является метод спада давления, который относится к манометрическим методам испытаний. Последовательность технологических операций при этом следующая: испытуемый узел заполняют через пневмостенд воздухом до давления испытаний $P_{исп}$, отсекают объект испытаний от магистрали стенда запорным вентилем, фиксируют величину давления и время начала испытаний. Контроль давления $P_{исп}$ проводят через время выдержки t . Уменьшение величины давления свидетельствует о суммарной негерметичности узла. Величина негерметичности Q определяется по формуле

$$Q = \frac{\Delta P_{исп} V}{t} B_T,$$

где $\Delta P_{исп}$ – уменьшение давления за время t , Па; t – время выдержки, с; V – внутренний объем узла и технологической оснастки, м³.

Чувствительность данного способа невелика ($1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ Вт), поэтому он используется для предварительной оценки герметизированности крупной партии узлов до проведения испытаний более точными и дорогостоящими методами.

Газогидравлические методы испытаний – метод «аквариума» и метод «бароаквариума» наиболее часто применяются серийном производстве узлов и агрегатов автоматики. Метод «аквариума» позволяет определить локальные течи в испытываемых узлах. Рабочим телом для испытаний является сухой сжатый воздух с «точкой росы» не выше 55°C , рабочей средой – дистиллированная вода. Узел погружают в броневанну с водой на глубину 50–100 мм, при этом он должен быть предварительно заполнен воздухом до давления 10–20 % от испытательного, чтобы жидкость не закупорила течи изделия. Давление газа повышают до испытательного и выдерживают не менее 3 мин. Затем давление уменьшают на 15 % до давления осмотра. Осмотр проводят визуально через смотровые окна, изготовленные в виде многослойных стеклопакетов.

Для уверенного определения негерметичности необходимо вести наблюдение до образования не менее трех пузырьков газа в месте предполагаемой течи. Чувствительность данного метода составляет $Q = 5 \cdot 10^{-6}$ Вт, что является приемлемым для испытаний узлов, работающих при невысоких давлениях компонентов топлива.

Метод «бароаквариума» получил широкое применение на предприятиях ракетно-космической промышленности в связи с достаточно высокой чувствительностью и возможностью визуально точно определять место негерметичности (локальную течь).

В качестве рабочего тела для испытаний (испытательного газа) используется гелий или гелиево-воздушная смесь, рабочей средой для испытаний является жидкость хладон-113. Выбор хладона-113 обоснован его свойством растворять некоторые органические и неорганические вещества, которые могут загрязнять поверхность изделия, закупоривая микротечи.

Испытываемый узел устанавливается в полость «бароаквариума» и нагружается давлением газа не более $3 \div 5 \text{ кг/см}^2$, затем в «бароаквариум» при помощи насоса закачивается хладон из вспомогательной емкости. Далее, давление газа повышается до заданной величины $P_{\text{исп}}$. Полость между поверхностью жидкости и крышкой «бароаквариума» вакуумируется до остаточного давления $P_{\text{ост}} = 1 \cdot 10^{-1} \text{ кг/см}^2$, вследствие чего происходит интенсивное выделение растворенного в хладоне газа. Жидкость «вскипает». Через $3 \div 5$ мин в системе «пар–жидкость» устанавливается термодинамическое равновесие при низком давлении насыщенного пара, что характеризует физико-химические свойства хладона и способствует обнаружению достаточно малых значений локальной негерметичности.

Экспериментально установлено, что чувствительность метода может быть повышена до $Q = 5 \cdot 10^{-8}$ Вт после проведения регенерации хладона на специальной установке при температуре $t = 60^{\circ}\text{C}$ с конденсацией паров и перекачивания чистого хладона во вспомогательную емкость, которая предварительно отвакуумирована.

Негерметичность манжетных и торцевых уплотнений, мембран, диафрагм узлов автоматики контролируется методом «мундштука». При этом в одну из проверяемых полостей узла подается сжатый воздух давлением $P_{\text{исп}} = 3 \div 6 \text{ кг/см}^2$, из другой полости выводится резиновая или полихлорвиниловая трубка, в которую вставляется стеклянная трубка – «мундштук». «Мундштук» опускается на глубину 5 мм в прозрачную мензурку с этиловым спиртом. При определении негерметичности методом «мундштука» необходимо обеспечить неизменность температуры во время всего процесса испытаний, так как повышение температуры приведет к тому, что будет зафиксировано «ложное» травление в связи с расширением воздуха в контролируемой полости.

Газоаналитические методы в настоящее время являются основными методами испытаний на герметичность сборочных единиц ЖРД, к которым предъявляются особые

требования по обеспечению минимальной негерметичности, т. е. эти методы обладают высокой чувствительностью и возможностью определения локальной и суммарной герметичности.

В производстве узлов и агрегатов автоматики получил применение масс-спектрометрический метод, как высокотехнологичная и наукоемкая разновидность газоаналитических методов.

В основу этого метода положен физический принцип разделения в масс-спектрометрической камере по атомным массам смеси газов под воздействием электромагнитного поля и выделения из этой смеси одного газа, который является контрольным и подается в полости испытываемого изделия.

В качестве контрольного газа для испытаний изделия используется инертный газ гелий, который обладает высокой проникающей способностью, легко ионизируется и, поэтому, достаточно точно идентифицируется в масс-спектрометрической камере в виде ионного тока, величина которого адекватно соответствует величине потока газа.

Описание масс-спектрометрического метода выходит за рамки данной статьи, поскольку изложено в специальной научно-технической литературе, в частности в издании [7]. Испытания узлов и агрегатов автоматики на суммарную негерметичность проводятся в стационарной вакуумной камере (барокамере), в которой устанавливается испытываемый узел. В полости узла подается гелий, а полость барокамеры вакуумируется до остаточного давления $P < 1 \cdot 10^{-2}$ Па.

При наличии негерметичности молекулы гелия проникают в полость барокамеры, далее по вакуумному трубопроводу поступают в масс-спектрометрическую камеру, являющуюся основным функционально-измерительным устройством прибора ПТИ (переносного течеискателя).

Определение и расчет величины фактической суммарной негерметичности узла проводится по специальной методике путем сравнения параметров потока гелия из негерметичного узла с известными параметрами потока из калиброванной эталонной течи, размещаемой в вакуумной камере.

Статистический анализ показывает, что допускаемая величина негерметичности узлов и агрегатов автоматики изделий ракетно-космической техники находится в диапазоне

$$Q = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \div 1 \cdot 10^{-7} \text{ Вт.}$$

Локальная негерметичность (место течи) обнаруживается методом «щупа», который также относится к масс-спектрометрическим методам и обладает чувствительностью

$Q = 5 \cdot 10^{-9}$ Вт при испытании в динамическом режиме, т. е. безотрывном перемещении «щупа» по поверхности испытываемого узла.

На завершающей стадии производства узлы и агрегаты автоматики подвергаются гидродинамическим испытаниям (гидропроливу). Испытания проводятся на специальных гидравлических стендах, рабочим телом является чистая холодная вода температурой до 40 °С с содержанием механических примесей не более $1,5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. Контролируется также жесткость воды, показатель pH, содержание в ней сульфат- и хлорионов, влияющих на коррозионную активность воды.

Цель гидропролива: определение гидравлического сопротивления узла на характерных режимах работы (предварительном, главном, заключительном); определение расхода жидкости и перепада давлений, при которых происходит перемещение подвижной системы узла; получение зависимостей перепада давления от расхода.

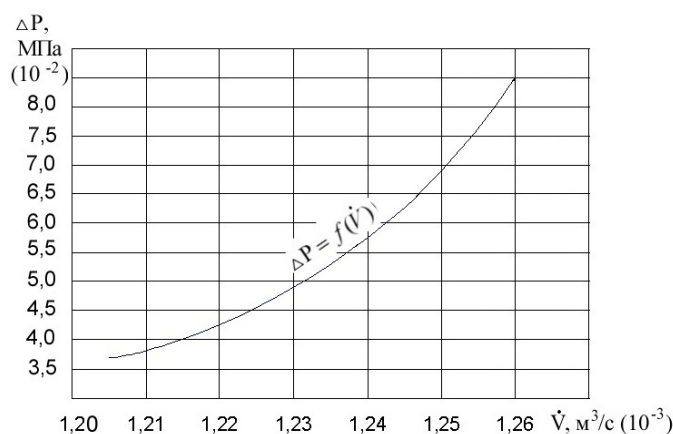
Перепад давлений ΔP определяется как разность статических давлений на входе P_1 и выходе P_2 : $\Delta P = P_1 - P_2$. При проливе обычно поддерживают примерно постоянным давление P_2 и, меняя расход $\dot{V}$, получают зависимость статического перепада ΔP

от расхода. При этом в расчетах используются объемным расходом $\dot{V}$ м³/с, а не массовым расходом $\dot{m}$ кг/с.

По результатам гидропролива строят графики $\Delta P = f(\dot{V})$ или производят приведение нескольких значений перепада ΔP к номинальному расходу $\dot{V}_{\text{ном}}$ и рассчитывают номинальное значение $\Delta P_{\text{ном}}$, как среднее из n -го количества измерений ΔP_i :

$$\Delta P_{\text{ном}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta P_i.$$

На рис. 1 представлен график $\Delta P = f(\dot{V})$, построенный по результатам гидропролива пуско-отсечного клапана на линии подачи горючего в газогенератор двигателя второй ступени космической ракеты-носителя легкого класса. Тяга двигателя на режиме главной ступени составляет 105 кН, расход горючего (НДМГ) в газогенератор – 0,985 кг/с, давление в газогенераторе 11,5 МПа.



Зависимость перепада давлений ΔP от расхода $\dot{V}$ при гидропроливе клапана «Г» по линии газогенератора

График представляет собой параболическую кривую типа $\Delta P = a\dot{V}^2$, параметр «а» определяется коэффициентом гидравлического сопротивления ξ :

$$a = \xi \frac{\rho}{2F^2},$$

где F – площадь входного сечения клапана.

Коэффициент ξ в широком диапазоне изменения расхода $\dot{V}$ остается примерно постоянным в связи с тем, что значение числа Рейнольдса (Re) в потоке достаточно велико, т. е. реализуется автомодельный режим, при котором коэффициент гидросопротивления не зависит от Re .

Гидропролив клапана производится при давлении жидкости меньшим, чем рабочее давление при работе двигателя, так как на режиме главной ступени клапан полностью открыт, а подвижная система (тарель клапана) прижата значительным усилием к упору. Ввиду малой сжимаемости воды, величина перепада определяется расходом без существенного влияния давления жидкости. Данный фактор позволяет использовать стендовые насосы меньшей мощности.

В заключение следует отметить, что в процессе экспериментальной отработки и серийного производства узлы и агрегаты автоматики ЖРД подвергаются различным видам и методам испытаний, которые проводятся с использованием сложного и энерго-

емкого технологического оборудования. Нормативно-методическая и технологическая документация испытаний базируется на классических законах механики, гидродинамики, теории оптимизации и системотехники.

Библиографические ссылки

1. Назаров В. П., Ефремов Г. В. Конструкция жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. 194 с. + прил.: Альбом принципиальных схем.
2. Агрегаты регулирования жидкостных ракетных двигательных установок : учеб. пособие / [Ю. И. Васютин и др.] ; под ред. Д. А. Ягодникова. М. : Изд-во МТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 223, [1] с.: ил.
3. Эдельман А. И. Топливные клапаны жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1970. 244 с.
4. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей : учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин и др. ; под общ. ред. Г. Г. Гахуна. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.: ил.
5. Козлов А. Л., Новиков В. Н., Соловьев Е. В. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок : учебник для студентов авиадвигателестроительных специальностей вузов. М. : Машиностроение, 1988. 352 с: ил.
6. Ракетные двигатели космических аппаратов : учеб. пособие / В. П. Назаров, В. Ю. Журавлев, М. В. Краев и др. ; под ред. В. П. Назарова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 200 с.
7. Технология производства жидкостных ракетных двигателей : учебник / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков, А. С. Филимонов ; под ред. В. А. Моисеева и В. А. Тарасова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 381 с.: ил. (Технологии ракетно-космического машиностроения).

© Алексеев А. О., Назаров В. П., Голиковская К. Ф., 2021

ЕВРОПЕЙСКИЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ПОДХОДЫ К ЭТАПАМ РАЗРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. С. Максютин^{*1, 2}

Научный руководитель – Д. В. Дымов¹

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

Российская Федерация, 662972, ЗАТО 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

Рассмотрена общая концепция реализации космических проектов по этапам в странах Запада и в России. Рассмотрена каждая фаза/этап в отдельности.

Ключевые слова: космические аппараты, космические агентства, системное проектирование.

На сегодняшний день сложилась ситуация, при которой существуют различные подходы к проектированию космических аппаратов (далее – КА). Это напрямую влияет на качество, сроки и стоимость реализации всего проекта в целом. В данной статье представлен краткий обзор подходов этапов производства КА в европейских странах и в России.

Общая суть проектирования систем КА в странах Запада имеет четкую структуру. Любая космическая программа разбивается определенным образом по времени на, так называемые, фазы.

Итак, программа разработки КА традиционно делится на несколько фаз или этапов. Следует отметить, что этот формат не применяется к небольшим спутникам и может быть значительно сокращен в коммерческих проектах. Следует также сказать, что определения, принятые в различных организациях (например, в ESA и в NASA), могут отличаться.

Фаза А (выполнимость).

Этот этап, который длится обычно 8–12 месяцев, называют фазой выполнимости или фазой планирования проекта. Цели фазы включают:

- выбор наиболее оптимальной (и экономически эффективной) концепции системы;
- демонстрацию осуществимости проекта по разработке и анализам;
- определение технического решения в объеме, необходимом для создания и обоснования практической реализации проекта, графики, планирование и данные по стоимости всех последующих этапов.

В фазе А заказчик предоставляет информацию о полете, требованиях к ракетеносителю и полезной нагрузке, а также плановые технические условия. Системный инженер проводит анализ требований, чтобы представить отчет менеджеру программы и заказчику об общей технической осуществимости программы. Исходя из отчета оценивается готовность перехода к фазе Б. Как только программа получает одобрение или заключается договор с генеральным подрядчиком, наступает время следующих этапов.

Фаза Б (подробное определение).

Этот этап, как правило, длится 12–18 месяцев. В крупных программах он может занимать больше времени, особенно когда процесс полной разработки замедляется фи-

нансовыми и политическими аспектами. Этот этап прежде всего связан с детальным проектированием. Конкретные действия включают в себя:

- подробное определение конструктивного облика системы и подсистем для перехода к основному проектированию и работе над фазами В/Г с минимумом проблем;
- разработку требований и проектных спецификаций для подсистем, проектирование и планы разработки подсистем и оборудования, графики программ и полного предложения для последующих фаз В/Г;

Фаза В/Г (проектирование, разработка, производство, интеграция и верификация).

Это самый длинный этап, максимальная продолжительность которого составляет от трех до пяти лет. К нему относятся разработка, производство, интеграция и испытания КА. Конкретные виды деятельности включают:

- завершение всех проектных работ и анализов;
- подготовку производственной документации и технологических операций;
- завершение всей разработки и квалификационных испытаний оборудования;
- изготовление КА и приемо-сдаточные испытания.

В этой фазе проводятся предварительное рассмотрение проекта (PDR), критическое рассмотрение проекта (CDR), рассмотрение готовности к проведению испытаний (TRR) и рассмотрение готовности к полету (FRR). Используются соответствующие инструменты контроля качества. Данные инструменты формируют блокирующие и разрешающие поручения для перехода к следующей фазе (или рассмотрению).

Фаза Д (процесс полета и анализ данных).

Фаза начинается после того, как космический аппарат прошел проверку готовности к полету. Как правило, этот этап делится на две части. Фаза Д1 – приведение спутниковой системы (и остальной части системы) в состояние, когда фаза может начать эксплуатационные операции, составляющие Фазу Д2. Фаза Д1 включает отправку КА к месту запуска и подготовку к запуску («кампания запуска»). Затем следуют запуск и начальная работа на орбите (LEOP), особенно важные в первые несколько дней функционирования КА. Совершается ряд важных действий, таких как развертывание внешних устройств и элементов конструкции КА. В конце фазы LEOP спутник должен быть в стабильном, работоспособном состоянии, хотя оборудование полезной нагрузки еще может быть не включено [1].

При прохождении каждой фазы процессы в ней регулируются при помощи полного комплекта документов разработки космических проектов. Среди них выделяют: управление проектами, интеграцию стандартов, управление сроками и т. д.

Процессы, проходящие в фазах, регулируются нормативной базой, представляющей собой развитый комплект стандартов. Данная система включает в себя стандарты управления космическим проектом, обеспечения качества космической продукции, разработки ракетно-космической техники и т. д. [2]. Следует отметить, что данные стандарты управления проектами внедряются как общие для всех предприятий космической отрасли.

В нашей стране процесс разработки КА несколько отличен от европейских стандартов. В специализированной методической литературе по проектированию КА, как правило, выделяются следующие этапы:

- 1) разработка технических предложений (аванпроект);
- 2) разработка эскизного проекта;
- 3) изготовление опытных изделий. Наземная отработка;
- 4) летные испытания;
- 5) подготовка документации для серийного производства;
- 6) серийное производство [3].

На этапе разработки технических предложений описываются все технические характеристики (массовые, габаритные, энергетические и т. д.) будущего КА. Этот этап позво-

ляет решать характерные задачи проектирования, такие как, например, уточнение проектных характеристик КА, расчет стартовой массы, выбор компонентов топлива и т. д.

Если рассматривать далее этап разработки эскизного проекта, то там решаются задачи по выбору бортовых систем КА, разработке конструктивно-компоновочной схемы КА, разработке ТЗ на создание отдельных составных частей КА и т. д.

На этапе изготовления опытных изделий и наземной отработки осуществляются испытания КА в объеме, предусмотренном комплексной программой экспериментальной отработки и комплексными программами экспериментальной отработки изделий, входящих в состав КА.

Летные испытания представляют собой всестороннюю проверку и подтверждение характеристик КА, заданных в ТЗ, в условиях, максимально приближенных к условиям применения и эксплуатации, и в реальных условиях функционирования. Происходит отработка эксплуатационной документации.

На этапе подготовки документации для серийного производства происходит корректировка, проверка, согласование и утверждение комплектов конструкторской документации.

На этапе серийного производства осуществляется разработка или корректировка технологических паспортов серийных изделий производится аттестация технологических процессов и т. д.

В ходе каждого из этапов также производятся расчеты надежности, анализ видов и последовательности отказов и т. д. В завершении этапа производится выпуск промежуточного отчета качества продукции [4].

В данной статье был представлен краткий обзор двух концепций реализации космических проектов по их этапам. В дальнейшем будет проведено детальное сопоставление данных концепций, выделены преимущества и недостатки каждой из них.

Библиографические ссылки

1. Фортескью П., Суайнерд Г., Старк Д. Разработка систем космических аппаратов : учеб. пособие. Космонавтика. 2016. С. 276.
2. Цветков А. Б. Вопросы эффективности проектного менеджмента в космической отрасли: российский и международный опыт // Логистика ракетно-космической промышленности. 2017.
3. Волоцуев В. В., Ткаченко И. С. Введение в проектирование, конструирование и производство ракет. Изд-во Самар. ун-та. Самара, 2017.
4. ГОСТ Р 56516–2015. Порядок и правила обеспечения контроля надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. 2016.

© Максютин А. С., 2021

ДВУХЭТАПНАЯ СИСТЕМА ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

А. В. Пучков, А. А. Дружинин

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

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

E-mail: puchok_95@mail.ru

Современная бортовая аппаратура проектируется на основе многофункциональных цифровых микросхем с высокой степенью интеграции. Тестирование электрической части такой аппаратуры на этапах проектирования и производства требует принципиально новых подходов. В работе проведен анализ достоинств и недостатков классических методов тестирования аппаратуры, и предложен комплексный метод анализа её качества и работоспособности.

Ключевые слова: интегральные микросхемы, бортовая аппаратура, имитационная модель, периферийное сканирование, автоматизация.

Currently, the fields related to the manufacture of space technology are developing: production capacities are being increased and new technologies are being introduced. The new technologies cause additional problems connected with the ensuring quality of products, as it is necessary to develop new and effective methods of testing and quality control. The modern electronic onboard equipment (OE), which is part of a satellite, is constantly being improved. Today the very-large-scale integration (VLSI chips) such as microcontrollers or field-programmable gate arrays (FPGA) play a key role in the design of electronic control units. They have a high degree of integration and specific characteristics. Such elements implement digital control and the logic of functioning of an individual unit or the entire device. Manufacturers are constantly increasing the functional composition of VLSI, reducing the overall dimensions and thickness of the crystals. Due to the reduction in the sizes of electronic components, the assembly mounting of modern printed circuit boards (PCBs) is reduced. In most cases, in OE VLSI control the analog elements which form control signals for electric motors (EM), switched-mode power supplies (SMPS), etc. Due to the rapidly increasing complexity of the hardware, the standard implementation of known quality control methods for electronic products faces a significant increase in time and labor force for their preparation and implementation. The problems are especially relevant in the serial manufacture of complex multilayer printed circuit boards with microcircuit packages that do not have physical access to contacts.

The manufacturing of a multilayer printed circuit board is a complex process consisting of many technological operations. It is advisable to identify and eliminate defects at an earlier stage of manufacture because the costs for this at later stages increase significantly. The particularity of mass production requires high productivity of inspection and defect search operations, which is also realizable only on the basis of automation. In addition, as the complexity of functional modules increases, the average number of faults increases, and the percentage of correct modules decreases rapidly. The task of quality control is fundamentally differently accomplished during the manufacture and operation of the product. In the process of operation the most interesting is the correct functioning, but the task of checking the serviceability

is solved during manufacture. Assembly and installation defects account for 60 to 90 % of all module faults [1].

Currently, the following types of automated testing of radio electronic devices are common in the industry:

- electrical testing;
- functional testing;
- boundary scanning.

The Electrical testing of printed circuit boards is an important manufacturing step and includes two types of tests:

- integrity test;
- insulation test.

These tests allow PCBs to be checked for open circuit, short circuit, and correct topology.

The most technically complicated element necessary for the implementation of electrical testing is the contact system with the board under test. There are several methods of electrical contact: manual, “bed of nails”, “flying probes”. These technologies allow detecting short circuits or breaks in signal lines on the surface of the printed circuit board, before energizing the entire device. The “bed of nails” designed for a specific type of device performs the diagnostic process at a high speed, but cannot be used when switching to another type of device. The systems of “flying probes” are more adaptable, however, due to the peculiarities of this approach, testing of products with a much lower performance is carried out [2].

The principle of boundary scanning consists in placing a sequential shift register along the boundaries of microcircuits, the cells of which are located between the edge connectors of the electronic device and the logical core. Through the JTAG interface, according to the IEEE 1149.1 standard [3], a certain binary sequence is fed to the test input, the result obtained at the test output is compared with the reference one. The disadvantages of this method are its unsuitability for testing analog components and the impossibility of checking the quality of connections, which can significantly affect the operation of high-speed electronic devices.

Functional testing, as the name suggests, is a check on the correctness of the performance of the target function by electronic products in accordance with the logic embedded in them. Using the software model of the controlled object, it is possible to predict the behavior of the device with possible faults and check this assumption using measurements on the hardware object. This technology is used due to the maximum number of tested components and functional units, and short testing time [4]. This method has a number of disadvantages such as the lack of versatility, the impossibility of accurate localization of the fault, and large labor costs for the development of test software.

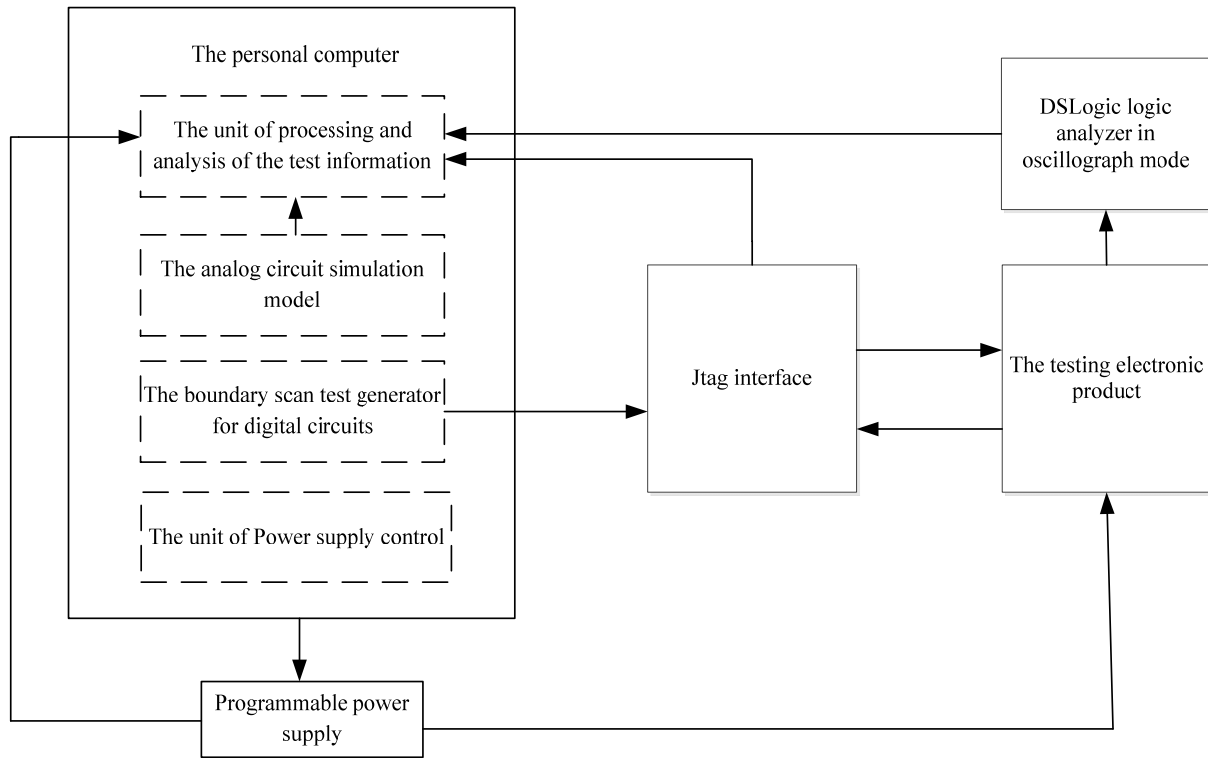
Of course, none of the test methods can allow detecting all defects in all functional units. Full verification and detection of the maximum number of faults are achieved only by a combination of several methods and a reasonable compromise.

After mounting the PCB, at the first stage of control, the power circuits are checked. Programmable power supplies are used for this test. For the programmable power supply, the current consumption limitation is adjusted in accordance with the requirements and the supply voltage is gradually increased to the nominal. The results are processed on a PC using a special program. At this stage, you can prevent faults that occur after the device is powered up due to incorrectly mounted components.

At the second stage of control, digital and analog circuits are checked.

Modern microchips included in the OE support the IEEE 1149.1 standard. They allow you to test not only the circuits associated with these microchips but also other elements, such

as memory, logic, resistors, and external connectors. When the JTAG components go into boundary scan mode, they disable their main logic and enter test mode, allowing external equipment to drive their pins and test circuits. Boundary scanning is the most optimal method for testing complex digital devices, due to the relatively low cost of equipment, low labor costs, and also the fact that the ability to test is already embedded in many digital microchips. In order to accelerate tests, a test sequence generator is used.



Block diagram of functional testing

Boundary scanning is not suitable for detecting defects in analog circuits. It is possible to increase the number of tested functional units by simulating analog units of the OE. In the space industry, electronic products are designed on the basis of previous design solutions, so there is no need to create completely new models for subsequent developments. The actual characteristics of the simulated unit are measured by the DSLogic logic analyzer in oscilloscope mode. As a result of the analysis of the simulated and real data, a conclusion is made on the correctness of the unit operation. The quality of testing depends on how detailed the model is.

An analysis of the existing methods for testing equipment made it possible to identify a number of their disadvantages. With the growth of the number and complexity of ICs in the device, conventional testing methods are less and less able to talk about the quality and performance of the tested equipment. In this regard, a comprehensive two-stage technique for testing OE at the manufacturing stage is proposed, which makes it possible to compensate for the disadvantages of some methods by introducing others. The use of a comprehensive system of tests will optimize the costs of developing and manufacturing electronic products by automating the development of tests, reducing manufacturing time, and increasing the number of tested functional units.

References

1. Медведев А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа. М. : Радио и связь, 1986.
2. Городецкий А. Снова о внутрисхемном тестировании ИСТ. Ч. 1 // Компоненты и технологии. 2011. № 7. С. 58–59.
3. IEEE Std. 1149.1. Standard Test Access Port and Boundary-Scan Architecture. [Электронный ресурс]. URL: <http://grouper.ieee.org/groups/1149/1> (дата обращения: 20.08.2020).
4. Бейзер Б. Тестирование чёрного ящика. Технологии функционального тестирования программного обеспечения и систем. СПб. : Питер, 2004. 320 с.

© Puchkov A. V., Druzhinin A. A., 2021

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ПОДВОДА ДОЗВУКОВОЙ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЫ

А. А. Кишкин, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко, М. У. Абдуллаев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: spsp99@mail.ru

На сегодняшний день в спектре задач решаемых орбитальными космическими аппаратами выделяется направление, связанное с увеличением как функциональной, так и тепловой мощностью излучаемой системой терморегулирования в космическое пространство. При тепловых мощностях больше 7 кВт возникает дефицит тепло излучающих поверхностей. Задачу, возможно, решить по трем направлениям: повышение температуры излучающей поверхности; разворачиванием дополнительных поверхностей; утилизация тепловой энергии в органическом цикле Ренкина. Ключевым звеном в реализации цикла является моделирование и проектирование малопотенциальной реактивной микротурбины. При моделировании рабочего процесса такой турбины необходима предварительная оценка потерь энергии при формировании окружного потока на входе в рабочее колесо. Одним из параметров определяющим часть потерь является коэффициент скорости φ_v . Данная работа посвящена теоретическому обоснованию и методике экспериментального определения коэффициента в диапазоне изменения геометрических и режимных параметров тангенциального подвода дозвуковой центростремительной турбины.

Ключевые слова: реактивная микротурбина, цикл Ренкина, геометрические и режимные параметры, тангенциальный подвод, дозвуковая центростремительная турбина, энергетика потока.

На сегодняшний день существует несколько технических реализации органического цикла Ренкина, отличающегося от пароводяного цикла большой энергетики органическими (фторхлоруглероды) низкикипящими хладагентами позволяющими реализовать цикл в температурном диапазоне меньше 200 °С, являющимся бросовым для большой энергетики. Источником низкопотенциального тепла является практически все химические производства, производства металлургии, бросовое тепло большой энергетики, тепло коммунальных сбросов, вентиляции и т. п. Общей характеристикой названных технологий является относительно большие мощности и температурные диапазоны, что определяет высокий коэффициент быстроходности используемых турбин. Для рассматриваемых типов микротурбин мощность не превышает 1 кВт, а температурный перепад меньше 50°С (область теплоэнергетического фона орбитально космического аппарата (КА)) что определяет коэффициент быстроходности $n_s < 40$, и предполагает снижение энергетики и требует экспериментально теоретической доводки. Одним из основных элементов обеспечивающих энергетику потока перед рабочим колесом является тангенциальное подводящее устройство (иными словами: направляющий или сопловой аппарат) [1; 2].

Для разработки математической модели и алгоритма расчета центростремительной микротурбины применяющейся для утилизации тепловой мощности космических аппаратов необходимо оценивать окружную составляющую абсолютной скорости

/на радиусе входа в рабочее колесо (РК) турбины. Теоретический анализ суммарных потерь потока как суперпозиция внезапного расширения с последующим вихревым течением до рабочего колеса представляет теоретически неопределенную задачу, для предварительной оценки и формирования базы данных потерь на этом участке необходимо использовать данные экспериментальных продувок с регистрацией энергетических и скоростных параметров потока на участке: 0 – параметры во входном канале устройства; 1 – параметры на входном диаметре во входном канале устройства. Для обработки экспериментальных данных помимо коэффициента потерь энергии ζ_{01} удобно воспользоваться коэффициентом окружной составляющей скорости φ_u [3; 4; 5].

Обоснуем некоторые соображения определяющие содержание коэффициента окружной составляющей скорости. Расчетная экспериментальная схема представлена на рис. 1.

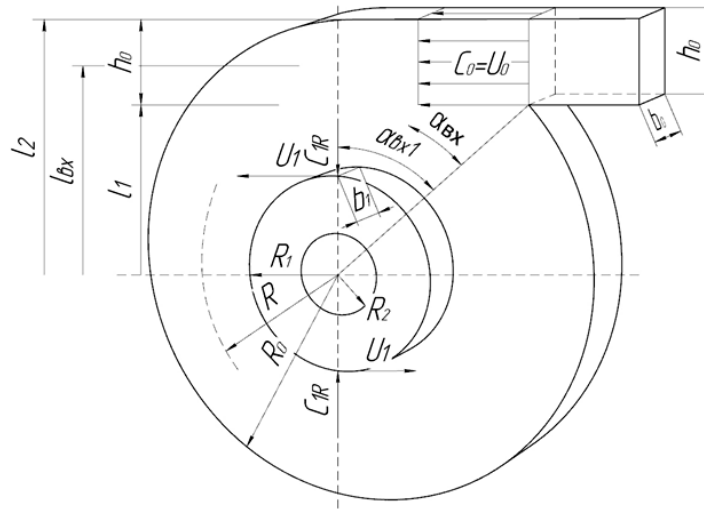


Рис. 1. Расчетная схема момента количества движения

Определим массовый расход в подводящем канале:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho C_0 \cdot h_0 \cdot b_0, \quad (1)$$

где ρ – плотность; C_0 – расходная скорость в канале; h_0 – высота канала; b_0 – ширина.

Допустим, что $C_0 = \text{const}$ по высоте h_0 , плечо момента количества движения по h_0 изменяется от l_1 до l_2 , тогда момент количества движения во входным сечением запишется как интеграл:

$$M_0 = \int_{l_1}^{l_2} \rho \cdot C_0^2 \cdot l \cdot b_0 \cdot dl = \rho \cdot C_0 \cdot h_0 \cdot b_0 \cdot C_0 \frac{l^2}{2} \Big|_{l_1}^{l_2}. \quad (2)$$

Подставим пределы интегрирования $l_1 = R_1$; $l_2 = R_1 - h_0$ и учтем (1):

$$M_0 = \dot{m} \cdot C_0 \cdot \frac{1}{2} (l_2^2 - l_1^2).$$

$$M_0 = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot C_0 (2R_1 - h_0) = \dot{m} \cdot C_0 \left(R_1 - \frac{h_0}{2} \right). \quad (3)$$

Момент количества движения на текущем радиусе R :

$$M = \dot{m} \cdot U \cdot R, \quad (4)$$

где $\dot{m}$ массовый расход определяется выражением:

$$\dot{m} = 2\pi R \cdot b \cdot C_R \cdot \rho. \quad (5)$$

Для идеального случая, когда нет момента сил трения, моменты M_0 и M равны:

$$M_0 = M,$$

Подставив выражения для моментов (4), получаем:

$$\frac{1}{2} \dot{m} \cdot C_0 \cdot h_0 (2R_0 - h_0) = \dot{m} \cdot C_u \cdot R. \quad (6)$$

Продолжим преобразование, выразим значения окружной составляющей на текущем радиусе, через параметры во входном канале:

$$C_{uT} = \frac{C_0 h_0}{R} \left(R_0 - \frac{1}{2} h_0 \right), \quad (7)$$

или с учетом:

$$R_0 = l_{\text{вх}} + \frac{h_0}{2},$$

$$C_{uT} = \frac{C_0 h_0}{R} \cdot l_{\text{вх}}, \quad (8)$$

Для радиуса входа в рабочее колесо R_1 при отсутствии потерь:

$$C_{u1T} = \frac{U_0 h_0}{R_1} \cdot l_{\text{вх}}, \quad (9)$$

Коэффициент окружной составляющей скорости определяется:

$$\varphi_u = \frac{C_{u1\partial}}{C_{u1T}}, \quad (10)$$

где $C_{u1\partial}$ – действительное (измеренное) значение; C_{u1T} – максимально теоретически возможное.

Действительное значение окружной скорости рассчитывается как среднее по результатам измерений полного и статического давлений и температуры по периферии рабочего колеса микротурбины в 4 точках окружности R_1 см. рис. 2.

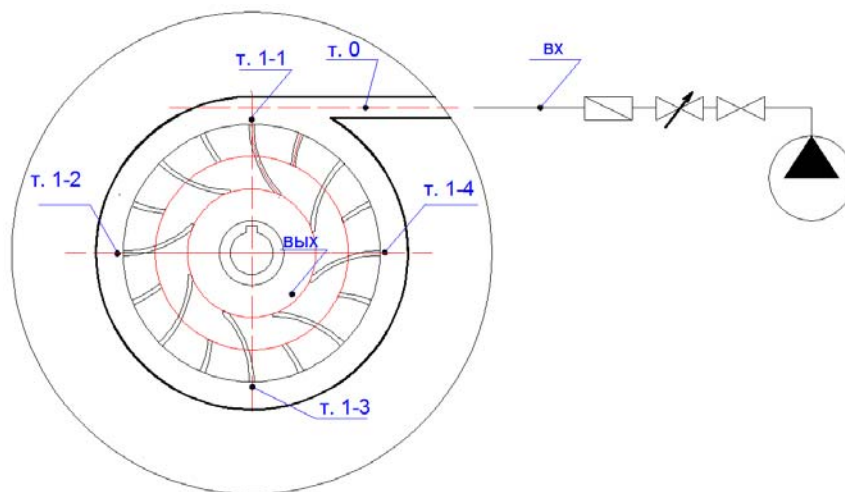


Рис. 2. Расположение контрольных точек

Общий вид сборки представлен на рис. 3.

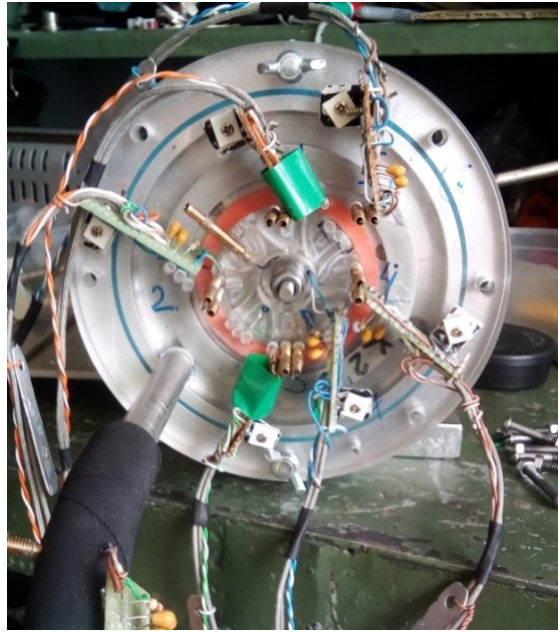


Рис. 3. Общий вид сборки

На рисунке показана подводка к термисторам, приемники давления не подключены к измерительным трубкам датчиков давлений.

Предварительная оценка окружной скорости на входе в РК микротурбины необходимо для возможности использовать уравнения энергии по периферии РК [1]:

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_0}{p_0} + \frac{C_0^2}{2} = \frac{k}{k-1} - \frac{P_1}{p_1} + \frac{C_1^2}{2} + \zeta_c \cdot \frac{C_0^2}{2}, \quad (11)$$

где ζ_c – коэффициент потерь полного напора в сопле; абсолютная скорость на входе в РК:

$$C_1^2 = C_{u1}^2 + C_{R1}^2, \quad (12)$$

расходная составляющая определяется только расчетно:

$$C_{R1} = \frac{\dot{m}}{\rho_1 F_1}, \quad (13)$$

где $\dot{m}$ – массовый расход рабочего тела; ρ_1 – плотность на входе в РК; F_1 – площадь проходного сечения в РК.

Коэффициент скорости представляет собой параметр, рассчитанный непосредственно по результатам измерений без дополнительных допущений. По результатам эксперимента в диапазоне изменений геометрических и режимных параметров подводящего устройства микротурбины: h_0 – высота канала; $l_{вх}$ – среднее плечо момента количества движения; R_1 – радиус входа в рабочее колесо; Re – число Рейнольдса на входе, реализуется возможность формирования базы данных для φ_u с целью использования при математическом моделировании и проектировании микротурбины.

Использование баз данных по коэффициенту окружной составляющей скорости φ_u (10) и коэффициенту потерь полного давления ζ_c (11) позволяет однозначно определить полное давление на входе в РК микротурбины при математическом моделировании и проектировании, а также проводить оптимизацию в диапазоне изменений режимных и геометрических параметров микротурбины.

Библиографические ссылки

1. Органический цикл Ренкина в автономной теплоэнергетической системе : монография / А. А. Кишкин, О. В. Шилкин, А. В. Делков и др. ; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Кишкина ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. 234 с.
2. Паротурбинные установки с органическими рабочими телами / М. М. Гришутин, А. П. Севастьянов, Л. И. Селезнев, Е. Д. Федорович. М. : Машиностроение, 1988. 219 с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-217-00076-7 (В пер.) : 1 р. 20 к.
3. Kishkin A. A., Shevchenko Yu. N., Delkov A. V. Analysis Of The Key Design Features Of Low-Power Turbines For Electricity Generation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 62030.
4. Использование турбоустановок малой мощности для реализации системы распределенного электроснабжения на территории Красноярского края / А. А. Кишкин, Т. Г. Чабукашвили, К. А. Чайкина, М. У. Абдуллаев // Инновационный дискурс развития современной науки : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 2020. С. 6–9.
5. Аналитический подход при исследовании уравнений импульсов пограничного слоя при течении в межлопаточном канале газовых турбин / А. А. Кишкин, А. А. Зуев, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28, № 1. С. 45–60.

© Кишкин А. А., Делков А. В., Шевченко Ю. Н., Абдуллаев М. У., 2021