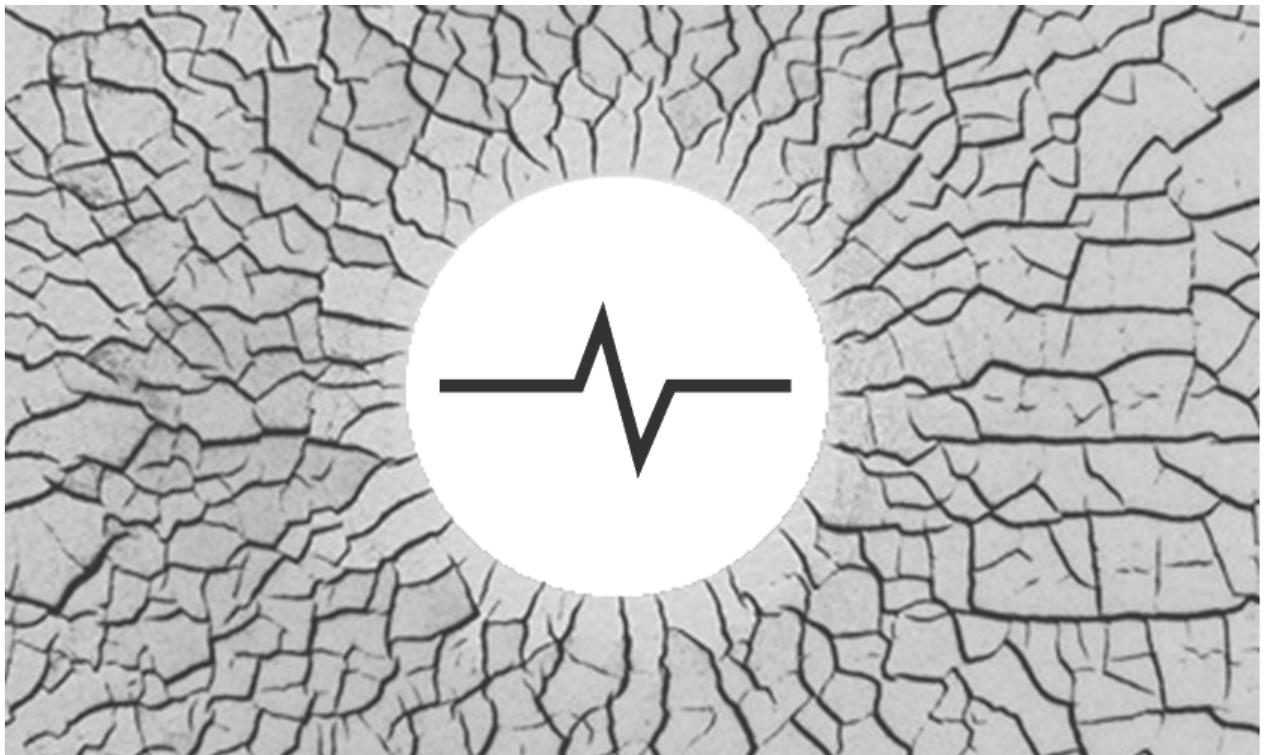




Сибирский государственный университет
науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



КРАСНОЯРСК 2019

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 Региональной научно-практической конференции
(26–28 февраля 2019 г., Красноярск)*

Электронное издание

Красноярск 2019

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019

УДК 629.7
ББК 39.5
И88

Редакционная коллегия:

Г. М. ГРИНБЕРГ, М. Д. ЕВТИФЬЕВ, В. Ю. ЖУРАВЛЕВ, В. Г. ЯЦУНЕНКО

Под общей редакцией

кандидата технических наук, профессора В. П. НАЗАРОВА

Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика [Электронный И88 ресурс] : сб. материалов Регион. науч.-практ. конф. (26–28 февраля 2019 г., Красноярск). – Электрон. текстовые дан. (1 файл, 1,5 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, 2019. – Режим доступа: <https://www.sibsau.ru/scientific-publication/>, свободный. – Загл. с экрана.

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

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

**УДК 629.7
ББК 39.5**

Подписано к использованию: 24.05.2019. Объем 1,5 МБ. С 180/19.

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	5
--------------------------------	---

Секция

«Современные методы испытаний и диагностики изделий»

Фадеев А. А., Шестаков И. Я., Кирбижекова В. В. Исследования производительности электроконтактно-химической обработки металлов	6
Зуев А. А., Арнгольд А. А., Фальков В. О., Кишкин А. А. Адаптация теоретического коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя в полостях вращения газовых турбин ЖРД	9
Журавлев В. Ю. Особенности проведения термоциклических испытаний изделий ракетно-космической техники	12
Ничипуренко А. А. Надежность опорных частей вантовых мостов с учетом их температурных деформаций	15
Серватинский В. В., Балабаева О. Д. Интеллектуальные транспортные системы как способ сохранения надежности автомобильной дороги	19
Шклюдов И. А., Шепета Н. А. Применение порошковых композиционных материалов для повышения надежности рабочих колес насосов	24
Грачева Е. А. Повышение качества использования рентгенографического контроля для сварных соединений топливных магистралей ЖРД	28
Огурцов А. М., Журавлев В. Ю. Повышение качества ультразвуковой дефектоскопии	30
Горяева Е. В. Проблемы проведения оценки технико-эксплуатационного состояния улично-дорожной сети городских поселений	33

Секция

«Надежность систем автоматического управления»

Баранова Е. Г., Лобанов Д. К., Харлашина С. В. Моделирование нагрузочного устройства для испытания системы электропитания космического аппарата	37
Толстенков Е. Д. Разработка эксперимента по обнаружению влияния звуковых колебаний на импеданс аккумулятора	40
Солодилов И. П., Зиборов Е. Д. Исследование частотных характеристик стабилизатора напряжения	42
Капитонов А. А., Козлов С. И. Методы обеспечения надежности систем современных космических аппаратов	46
Дружинин А. А., Пучков А. В., Иванов А. В. Испытательный комплекс на основе контроллера нечеткого вывода в среде MATLAB	49
Сидоров В. Г. Применение платформы Arduino для обучения студентов проведению испытаний	52

Штабель Н. В., Самогик Л. А., Мизрах Е. А. Устройства защиты от дугообразования для систем электропитания космического аппарата	55
Дерябкин В. Д., Мекаева Е. М. Разработка прибора для автоматизированного тестирования бортовой кабельной сети	58
Пащенко Е. В., Орешенко Т. Г. Контроль качества при производстве турбонасосных агрегатов	60

Секция

«Контроль и испытания ракетно-космической техники»

Метелкин Д. В., Белых А. С. Ультразвуковой контроль изделий ракетно-космической техники	62
Харченко В. В. Необходимость метрологического контроля и надзора при изготовлении изделий повышенной надежности	66
Белых А. С., Метелкин Д. В. Применение капиллярного контроля в процессе изготовления изделий ракетно-космической техники	69
Кузин А. Г. Порядок проведения диагностики изделий методом акустической эмиссии	73
Кишкин А. А. Особенности энергетических испытаний микротурбин малой мощности	76

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Перед Вами первый сборник материалов Региональной 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 67.02

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

А. А. Фадеев, И. Я. Шестаков, В. В. Кирбижекова

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: fadeev.77@mail.ru

Приводятся исследования электроконтактно-химической обработки (ЭКХО) металлов. Приведена схема исследовательской установки, на основе экспериментальных данных рассчитана зависимость производительности обработки от технологических параметров метода.

Ключевые слова: электроконтактная, электрохимическая обработка, вибрирующий электрод-инструмент, плотность тока,

Особое место в обработке деталей сложной конфигурации из металлов с любыми физико-механическими свойствами занимает электрическая размерная обработка, при которой преобразование электрической энергии в другие виды энергии происходит в зоне обработки, образованной взаимодействующими поверхностями инструмента и обрабатываемой детали [1].

Метод электроконтактно-химической обработки (ЭКХО) представляет собой комбинацию двух способов: электроконтактной и электрохимической обработки и относится к числу перспективных методов, позволяющих достичь высокой производительности обработки при использовании относительно несложного оборудования и технологий.

ЭКХО с использованием вибрирующего электрода-инструмента (ЭИ) происходит при весьма малых межэлектродных промежутках (МЭП), движение электрода оказывает специфическое действие на развитие электрического разряда и его технологические свойства. При данном виде электрообработки применяется значительно более низкое напряжение (6–12В), поэтому в этих условиях возможность образования мгновенных металлических контактов увеличивается, однако движущийся электрод разрушает возникающие контакты, что позволяет стабилизировать процесс обработки. При наличии достаточного запаса мощности источника питания процесс обработки может происходить при жесткой подаче, т. е. без применения следящих систем [2].

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке [3]. Деталь 10 (сталь ХВГ) устанавливается в ванну 9 при помощи крепежного болта. На шток электропривода 1 монтируется приспособление с ЭИ с возможностью регулировки МЭП на уровне 2...3 мм. Для регистрации параметров импульсной обработки применяется осциллограф 5. Для замеров средних значений тока и напряжения используется амперметр 6 и вольтметр 7. Питание электропривода осуществляется с помощью блока

питания 4, регулирование частоты вибрации ЭИ – с помощью генераторов импульса 2 и 3. Рабочее напряжение обработки детали – 10...30 В. После обработки детали производилось измерение шероховатости полученных полостей (профилометром модели 283).

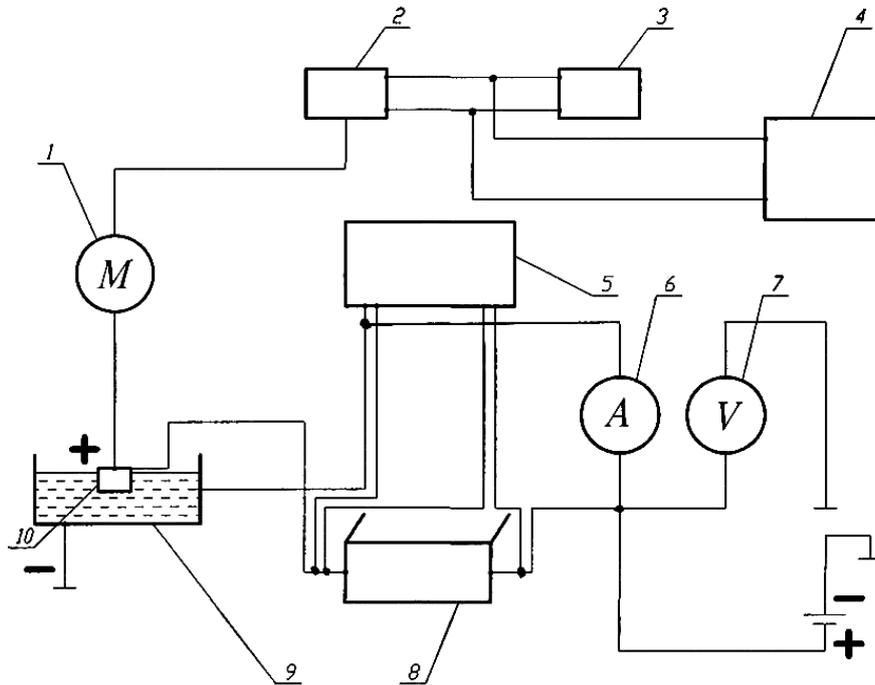


Схема экспериментальной установки:

- 1 – электродинамический привод; 2 и 3 – генераторы импульсов;
4 – блок питания электродинамического привода; 5 – осциллограф; 6 – амперметр;
7 – вольтметр; 8 – шунт; 9 – ванна для электролита; 10 – деталь

В результате экспериментов получен некоторый статистический ряд измерений, который был подвергнут регрессионному анализу с целью установления связи между случайной величиной Y и параметром X , значения которого задавались в ходе эксперимента. Были выбраны эмпирические формулы, описывающие процесс ЭКХО вибрирующим ЭИ.

Производительность ЭКХО зависит от средней плотности тока следующим образом

$$\Pi = 0,016 \cdot e^{2,88i}, \text{ мм/мин.}$$

Производительность обработки связана с амплитудой колебаний A отношением:

$$\Pi = 0,19 + \frac{0,15}{A}, \text{ мм/мин (при } U_{xx} = 26 \text{ В),}$$

$$\Pi = 0,038 + \frac{0,03}{A}, \text{ мм/мин (при } U_{xx} = 12 \text{ В).}$$

С помощью данных соотношений имеется возможность оценки производительности ЭКХО вибрирующим ЭИ при плотности тока от 20 до 100 А/см² и амплитуде колебаний от 0,5 до 1,5 мм.

Достоверность полученных эмпирических зависимостей оценивалась по критерию Кохрена. Во всех случаях полученное значение критерия Кохрена меньше табличной величины, что подтверждает правильность выбранных зависимостей.

Качество поверхности деталей после ЭКХО соответствует характеру изменения при известных способах электроэрозионной обработки. При уменьшении производительности улучшается шероховатость поверхности и в режиме электромеханического сглаживания возможно получить Ra 0,1 мкм. Поверхность детали, находящаяся вблизи электрода-инструмента, во время обработки не подвергается электрохимическому травлению, что говорит в пользу исследуемого метода. Точность копирования электрода-инструмента во всех опытах составляет 0,02 мм.

Библиографические ссылки

1. Амитан Г. Л., Байсупов И. А., Барон Ю. М. и др. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / под общ. ред. В. А. Волосатова. Л. : Машиностроение. Ленингр. отд., 1988. 719 с.
2. Мещеряков Н. Г. Высокопроизводительная размерная обработка дугowymi рядами. М. : Машиностроение, 1991. 40 с.
3. Фадеев А. А., Шестаков И. Я., Артюкова О. Е. Конструирование исследовательской установки для электрообработки на базе электродинамического привода // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (30). 234 с.

© Фадеев А. А., Шестаков И. Я., Кирбижекова В. В., 2019

АДАПТАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ПОЛОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ЖРД

А. А. Зуев, А. А. Арнгольд, В. О. Фальков, А. А. Кишкин

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

Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: dla2011@inbox.ru

Рассмотрена модель распределения температурного и динамического пространственных пограничных слоев с конвективной составляющей. Модель позволила определить толщины потерь энергии, потери импульса и вытеснения, необходимые для записи закона теплообмена и определения локальных коэффициентов теплоотдачи в граничных условиях полостей вращения турбин ТНА ЖРД. Полученные аналитические выражения для локальных коэффициентов теплоотдачи хорошо согласуются с результатами исследования других авторов.

Ключевые слова: локальный коэффициент теплоотдачи, уравнение энергии, толщина потери энергии, температурный пространственный пограничный слой.

Учет особенностей теплоотдачи в проточных частях турбонасосных агрегатов (ТНА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является актуальной задачей. В настоящее время учет особенностей течения с теплоотдачей при реализации потенциального и вихревого вращательного течения в проточных частях в основном осуществляется следующими методами: использованием эмпирических уравнений, численными и аналитическими методами решения дифференциальных уравнений в частных производных [1].

Высокие температуры рабочего тела приводят к температурным деформациям, в том числе и дисков турбин [2]. При проектировании проточных частей узлов и агрегатов ТНА ЖРД необходимо учитывать изменение температуры потока рабочего тела по длине рабочего канала, так как параметр вязкости является функцией температуры и определяет режим течения и как следствие потери, в частности дисковое трение и гидродинамические потери в проточной части. Моделирование энергетических параметров ТНА ЖРД, представляет актуальную научно-техническую задачу. Вопросы оптимизации параметров рабочего процесса и математическая модель ДУ рассмотрены в работе В. А. Григорьева [3], где проведен анализ моделей и раскрыты преимущества и недостатки для различных этапов проектирования.

Предложена модель распределения динамического и температурного пространственных пограничных слоев с конвективной с оставляющей для турбулентного течения продуктов сгорания в полостях вращения газовых турбин ЖРД. Для продуктов сгорания критерий Прандтля меньше единицы ($Pr < 1$), толщина динамического пограничного слоя находится ниже толщины температурного пограничного слоя. Принято, что в границе динамического пограничного слоя изменение температуры и толщины потери энергии происходит за счет переноса динамической скорости, а за его границей – только за счет теплопроводности. Данное предположение хорошо согласуется с выводами многих авторов [4–6]. Термическое сопротивление присутствует по всей толщине температурного пограничного слоя. В границах динамического пограничного слоя

термическое сопротивление обусловлено турбулентным переносом тепла, а вне границ динамического пограничного слоя теплопроводностью [6]. Модель распределения динамического и температурного пространственных пограничных слоев с конвективной составляющей, необходима для аналитического определения локального коэффициента теплоотдачи в полостях вращения турбин ЖРД.

Основным объектом исследования, где реализуется потенциальное и вихревое вращательное течение, являются элементы проточных частей газовых турбин ЖРД: подводящее и отводящее устройство, полости между статором и рабочим колесом [4].

Получено интегральное соотношение уравнения энергии температурного пространственного пограничного слоя, позволяющего вести интегрирование по поверхности любой формы, необходимое для определения толщины потери энергии. Выражения для определения толщин потери энергии температурного пространственного пограничного слоя необходимы для определения локальных коэффициентов теплоотдачи для характерных случаев течения с учетом теплообмена.

Аналитическим путем получены выражения для определения локального коэффициента теплоотдачи в виде критерия Стантона для прямолинейного равномерного течения потока, вращательного течения по закону твердого тела и вращательного течения свободного вихря степенного профиля распределения параметров динамического и температурного пограничного слоя для случая $Pr < 1$.

Локальный коэффициент теплоотдачи в виде критерия Стантона для прямолинейного равномерного турбулентного течения

$$St = \frac{1}{Pr^{\frac{m+1}{m+3}}} \left(\frac{\left(\frac{xm}{(m+1)(m+2)} - \frac{\lambda(x-1)^2}{2x} \right) (m+1)}{\alpha_{\text{л}}^{m-1} (m+3) Re_U} \right)^{\frac{2}{m+3}},$$

где m – степень турбулизации профиля динамической скорости пространственного пограничного слоя; $x = \frac{\delta}{\delta_t} = \sqrt[3]{Pr}$ отношение толщин динамического и температурного

пограничных слоев; λ – коэффициент теплопроводности; $\alpha_{\text{л}} = 12,5496 Pr^{\frac{1}{18}}$ – коэффициент ламинарного подслоя турбулентного профиля распределения скорости (полученный с учетом двухслойной модели турбулентности с вязким ламинарным подслоем); Re – критерий Рейнольдса.

Локальный коэффициент теплоотдачи в виде критерия Стантона для турбулентного вращательного течения по закону твердого тела

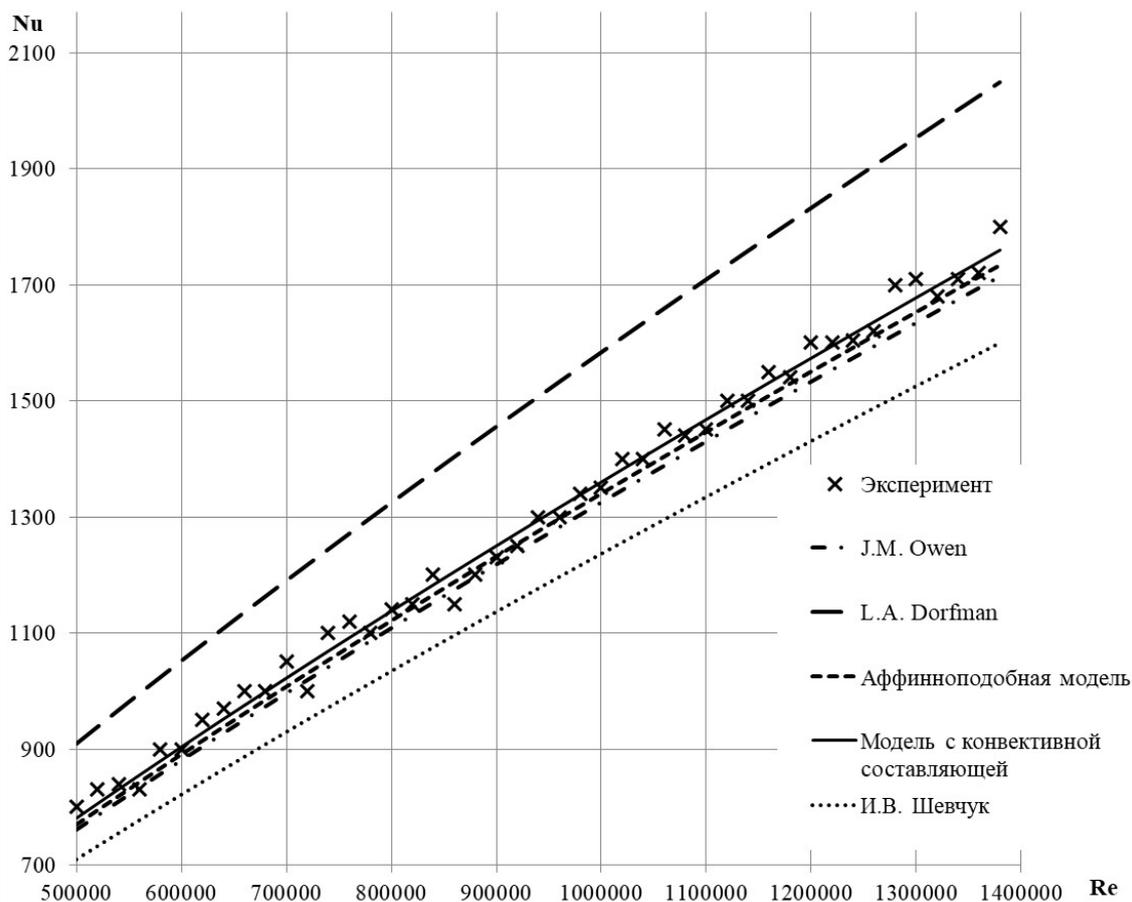
$$St = \frac{1}{Pr^{\frac{m+1}{m+3}}} \left(\frac{2J\varepsilon}{\alpha_{\text{л}}^{m-1} Re (m+3)} \right)^{\frac{2}{m+3}} \left(\frac{xm}{(m+1)(m+2)} - \frac{\lambda(x-1)^2}{2x} \right)^{\frac{2(m+3)-4}{(m+1)(m+3)}},$$

где ε – тангенс угла скоса донной линии тока; J – относительная характерная толщина.

Локальный коэффициент теплоотдачи в виде критерия Стантона для вращательного течения свободного вихря

$$St = \frac{1}{Pr^{\frac{m+1}{m+3}}} \left(\frac{2J\varepsilon}{\alpha_{\text{л}}^{m-1} Re} \left(\frac{xm}{(m+1)(m+2)} - \frac{\lambda(x-1)^2}{2x} \right) \right)^{\frac{2}{m+3}}.$$

Полученные аналитические выражения хорошо согласуются с данными других авторов и необходимы для инженерных расчетов при проектировании проточных частей ТНА ЖРД, что видно по рисунку.



Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи турбулентного вращательного течения при $Pr = 0,7$

Библиографические ссылки

1. Войткунский Я. И., Фаддеев Ю. И., Федяевский К. К. Гидромеханика Л. : Судостроение, 1982. 456 с.
2. Amr Elhefny, Guozhu Liang, Stress and deformation of rocket gas turbine disc under different loads using finite element modelling, Propulsion and Power Research. 2013, Vol. 2, Issue 1, P. 38–49.
3. Григорьев В. А., Загребельный А. О., Кузнецов С. П. К вопросу оценки массы силовой установки в задаче оптимизации параметров рабочего процесса авиационного турбовинтового двигателя // Вестник Моск. авиац. ин-та. 2015. Т. 22, № 3. С. 103–106.
4. Кишкин А. А., Черненко Д. В., Черненко Е. В. Уравнение импульсов трехмерного пограничного слоя // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Новочеркасск. 2007. № 4. С. 35–41.
5. Романенко П. Н. Тепломассообмен и трение при градиентном течении жидкостей. М. : Энергия, 1971. 568 с.
6. Кейс В. М. Конвективный тепло- и массообмен : пер. с англ. М. : Энергия, 1972. 448 с.

© Зуев А. А., Арнольд А. А., Фальков В. О., Кишкин А. А., 2019

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В. Ю. Журавлев

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

Представлены методика проведения ускоренных термоциклических испытаний и результаты испытания изделия.

Ключевые слова: ускоренные испытания термоциклические испытания, форсированные испытания.

Для обеспечения надежной работы конструкций, эксплуатируемых длительное время в условиях переменных тепловых режимов, необходимо проведение исследований на воздействие температурного фактора. Наиболее эффективным способом исследования процессов протяженных во времени выступают методы ускоренных испытаний.

Для проведения исследования использована комбинация методов сокращенных и форсированных испытаний, основанных на принципах учащения рабочих циклов и усечения спектра нагрузок. Коэффициент ускорения условий работы превышал значение 300.

Для испытаний использована термокамера Weiss, модель WT3-18070.

Термоиспытания проводились с возможностью задавать требуемые значения циклов, значения температур и изменения выдержки между циклами в соответствии с ГОСТ 30630.2.1–2013.

Перед проведением термоциклических испытаний изделие было подвергнуто однократным термоиспытаниям с заданным диапазоном температур и временем выдержки при достижении необходимой температуры. Применена следующая последовательность изменения температур в эксперименте:

- 1) температура от комнатной увеличивалась до +50 °С с шагом 0,5 °/мин;
- 2) изделие выдерживалось при температуре +50 °С 2 часа;
- 3) температура снижалась от +50 °С до –20 °С с шагом 0,5 °/мин;
- 4) изделие выдерживалось при температуре –20 °С 2 часа;
- 5) температура от –20 °С увеличивалась до комнатной с шагом 0,5 °/мин;
- 6) изделие выдерживалось при комнатной температуре 0,5 часа.

Проведя термоиспытания, после выдержки 0,5 часа, изделие проверялось на функционирование. Отклонение от нормального режима работы составило 4 %. Через 2 часа после термоиспытания отклонение от нормального режима работы изделия не выявлено.

После однократного термоиспытания и проверки работоспособности изделия были подготовлены и проведены термоциклические испытания.

Условия проведения термоциклических испытаний:

– цикл: от комнатной температуры до +50 °С с шагом 0,5 °/мин, выдержка – 2 часа, от +50 °С до –20 °С с шагом 0,5 °/мин, выдержка – 2 часа, от –20 °С до +50 °С с шагом 0,5 °/мин;

– давление в термической камере не должно быть выше 1000 ($\pm 5\%$) бар при влажности 40 % ($\pm 5\%$);

– выдержка изделия после испытаний – 2 часа.

Входные параметры для термической камеры представлены в таблице.

Значения параметров термоциклирования

Значение температуры, °С, от	Значение температуры, °С, до	Скорость изменения температуры, °С/мин	Примечание
+20	+50	0,5	Выдержка – 2 часа
+50	–20	0,5	Выдержка – 2 часа
–20	+50	0,5	Выдержка – 2 часа
+50	–20	0,5	Выдержка – 2 часа
–20	+50	0,5	Выдержка – 2 часа
+50	–20	0,5	Выдержка – 2 часа
–20	+50	0,5	Выдержка – 2 часа
+50	+20	0,5	Выдержка – 2 часа

График термоциклирования представлен на рисунке.



График термоциклирования

В результате проведенных испытаний внешний вид изделия не изменился. Через 2 часа после термоциклических испытаний после разборки изделия и визуального осмотра комплектующих из пластмасс видимых изменений формы не обнаружено. При испытании изделия после сборки отклонение от нормального режима работы не выявлено. Образец выдержал термоиспытания.

Анализ результатов термоциклических испытаний показал – при работе климатической камеры во время мониторинга работы системы ошибок не было.

Проведя анализ полученных результатов, сделан вывод, что конструкция механической и оптической части изделия остается работоспособной при скорости изменения температуры 0,5 °С/мин в диапазоне от –20 °С до +50 °С.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 30630.2.1–2013. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

2. РД 50-424–83. Методические указания. Надежность в технике. Ускоренные испытания. Основные положения. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. Колпаков А. О термоциклах и термоциклировании // Силовая электроника. 2006. № 2. С. 6–11.

© Журавлев В. Ю., 2019

НАДЕЖНОСТЬ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ ВАНТОВЫХ МОСТОВ С УЧЕТОМ ИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

А. А. Ничипуренко
Научный руководитель – И. Я. Богданов

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

Рассмотрены вопросы, касающиеся надежности опорных частей вантовых мостов с учетом их температурных деформаций. Проанализировано действие температуры на состояние конструкций, рассмотрена возможная работа вантового моста в суровых условиях Сибири на основе характеристик Русского моста.

Ключевые слова: Вантовый мост, опорные части вантовых мостов, температурные деформации.

Развитие строительной отрасли, и в частности дорожной, способствовали стремительному развитию вантовых сооружений. Вантовые мосты сейчас «олицетворяют наше время» в крупномасштабном мостостроении, демонстрируя новизну и современную инженерную мысль. В вантовых мостах нагрузки на пролетные строения от собственного веса и подвижного транспорта передаются высоким пилонам через систему вант (тросов), которые представляют собой металлические канаты, выполненные либо в виде переплетения высокопрочной проволоки, либо в виде параллельных пучков из неё. Первые применяются в небольших вантах для легких мостов, так как в них часть прочности вант тратится на гашение напряжений, вызванных спиральной свивкой. Вторые более предпочтительны, так как полностью используют прочность всех пучков, входящих в вант [1].

Замена железобетонных несущих конструкций стальными вантами делает мостовые сооружения более экономичными. Известно, что в железобетонных элементах растягивающие напряжения воспринимает в большинстве своем металлическая арматура, а сжимающие – бетон, а так как ванты работают, в основном, на растяжение, то в них задействована вся площадь поперечного сечения. Использование высокопрочной стали в тросах позволяет добиться существенного уменьшения расхода строительного материала, предназначенного для восприятия сжимающих напряжений.

Вантовые мосты особенно эффективны при преодолении широких водных преград и горных ущелий. Использование традиционных балочных, арочных и других схем мостов, а также их комбинаций требует большого количества промежуточных опор, что является очень затратным. Вантовые и подвесные мосты позволяют устраивать перекрытия большой протяженности с малым количеством промежуточных опор.

Таким образом, вантовые конструкции дают возможность реализовывать визуально «парящие» сооружения, которые, помимо эстетической значимости, имеют и экономические выгоды, так как уменьшается количество промежуточных опор и объем строительных материалов, по сравнению с другими схемами мостовых переходов.

Возведение мостов с большими пролетами является актуальным для полноводных судоходных рек, к которым относятся великие сибирские реки, такие как Енисей, Лена, Обь и другие. Если учесть тот фактор, что на участках нижнего течения их русла имеют достаточно большие размеры, и в устьях рек действуют морские порты, то применение

там вантовых мостов становится целесообразным [2]. Водосборные бассейны сибирских рек расположены в регионах с суровым климатом. Из-за особенностей их течения – с юга на север – размеры речных долин, глубины и объемы стока воды возрастают по мере приближения к арктическим районам. Однако именно в северных регионах наиболее существенной становится проблема температурных деформаций мостов, в том числе и вантовых.

Известно, что с увеличением длины элементов увеличиваются и линейные удлинения в результате температурного воздействия [3]. Большинство мостов испытывают эти деформации только в плоскости балок. Однако для вантовых сооружений температурные деформации проявляются еще и в направлении вант. В результате воздействия отрицательной температуры укорачивается и пролет моста, и вант, что деформирует систему в двух направлениях одновременно.

Наибольшие деформации происходят в окрестности крайней точки подвесной части вантового моста. Часть перемещения вдоль оси вант компенсируется изгибом подвесного пролета, однако это лишь небольшая часть и перемещение в вертикальном направлении все же произойдет. А при возведении большепролетных мостов в суровых климатических условиях такие перемещения могут принимать достаточно большие значения.

Проведем оценку температурных деформаций сооружения, подобного мосту, соединившему остров Русский с материком во Владивостоке, для суровых климатических условий Сибири.

Линейная температурная деформация $\Delta l_{\Delta t}$ определяется по известной формуле:

$$\Delta l_{\Delta t} = l \cdot \alpha \cdot \Delta t, \quad (1)$$

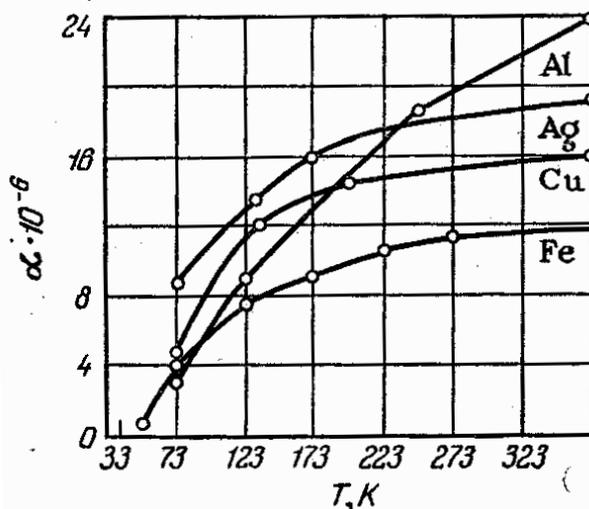
где l – начальный размер элемента, м; α – коэффициент линейного расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; Δt – изменение температуры, $^{\circ}\text{C}$.

Начальный размер элемента обычно определяют при расчетной температуре. На стадии проектирования в ее качестве обычно принимают среднюю температуру при эксплуатации элемента. Также возможно измерение при реальной температуре – это делается для того, чтоб узнать на уже готовой конструкции конкретные линейные деформации, которые произойдут при изменении температуры на определенное количество градусов.

Коэффициент линейного расширения (далее – КЛР) зависит от материала. На стадии проектирования используют табличные значения материалов, однако для ответственной конструкции нужно производить лабораторные испытания образцов. Ведь сам КЛР также зависит и от строения материала, технологий производства, цвета материала и многих других факторов и может серьезно отличаться от табличных значений. КЛР чистого железа составляет $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ при температуре близкой к $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако чистое железо не используется в строительстве – для придания нужных свойств используют стали с примесями. При температуре от $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ КЛР стали в среднем составляет от $10 \cdot 10^{-6}$ до $18 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. При отрицательных температурах значение КЛР может серьезно измениться. Зависимость коэффициента линейного расширения металлов от температуры показана на рисунке [4].

Из рисунка видно, что зависимость нелинейная, и при температурах близких к абсолютному нулю, значения КЛР будут стремиться к 0 K^{-1} . Исследуемый участок температуры для северных регионов находится в интервале от $-65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При пересчете на шкалу Кельвина диапазон составит от 208 до 313 К. Так как на данном участке изменения относительно небольшие, приближенно нелинейную зависимость можно заменить линейной и для расчетов брать усреднённое значение.

На рассматриваемом участке температур линия зависимости имеет относительно небольшой разброс показателя КЛР, что для простых расчетов может быть достаточно. Для высокоточных элементов и для элементов, имеющих большую длину вычисление деформации должно вестись с учетом изменяющегося КЛР при различных температурах.



Зависимость коэффициента линейного расширения α (K^{-1}) металлов от температуры T (К)

Изменение температуры в случае укорочения длины элемента подразумевает уменьшение температуры. В данной формуле знак изменения температуры и означает вид деформации элемента. (если Δt со знаком «-», то и элемент будет укорачиваться, а если Δt со знаком «+», то элемент удлиняется).

Подвесная часть вантового моста на остров Русский имеет длину 1872 м. Самый большой его пролет имеет длину ванта 578,08 м [5]. Если взять усредненный КЛР для углеродистой стали в $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и диапазон температур для северных регионов Красноярского края ($-65 \text{ } ^\circ\text{C} - 40 \text{ } ^\circ\text{C}$), то по формуле (1) деформация ванта составит 0,71 м со знаком «минус». Это означает, что крайняя подвесная часть моста переместится на 0,71 м в направлении ванта (сожмется). Вертикальная проекция данного перемещения составляет 0,46 м, а горизонтальная 0,54 м. Сама подвесная часть моста лишь висит на вантах и не имеет прямого упора в горизонтальном направлении. Из-за этого деформируются (сжиматься) будет вся подвесная часть моста.

Температурные деформации подвесной части моста также рассчитаем по формуле (1). Изменение длины составит 2,3 м снова со знаком «минус». Горизонтальное перемещение крайней точки подвесной части составит 1,15 м. Проекция горизонтального перемещения компенсируется большим перемещением подвесной части, а вот вертикальное перемещение не компенсируется. Данный расчет сильно упрощен и не учитывает множество других факторов, однако он уже показывает, что перемещения будут довольно большими, а вертикальное перемещение будет достаточно серьезным.

Работа вантовых мостов при отрицательных температурах еще недостаточно изучена. Одной из главных проблем таких конструкции при низких температурах, как видно из оценочных расчетов, становится устройство опорных частей. Они представляют собой различные конструкции, которые воспринимают нагрузки от пролетных строений и передают их на сами опоры. Сами пролетные строения в период эксплуатации перемещаются, поэтому необходимо устройство шарнирной опорной части, иначе напряжения от перемещений будут восприниматься самим материалом моста.

Большинство опорных частей мостов балочного или арочного исполнения предполагают либо поворот пролетного строения при прогибе, либо поворот и горизонтальное перемещение. Для компенсации таких перемещений часто используют качающиеся опорные части, либо скользящие. Однако для больших вантовых мостов они не подходят, так как крайняя подвесная часть моста имеет еще и вертикальное перемещение. Для таких условий опорная часть должна предполагать эти перемещения. Опора должна быть подвижной в горизонтальном и вертикальном направлении одновременно.

Вертикальные перемещения вантового моста как раз не позволяют использовать шарнирных или скользящих опор традиционного исполнения. Сама подвесная часть моста не нуждается в опоре – весь ее вес воспринимается вантами. Однако технически крайние части необходимо закрепить, но при этом позволить горизонтальные и вертикальные перемещения. Также есть одно дополнительное условие для опорной части – для вантовых мостов довольно опасной нагрузкой являются его колебания. Поэтому опора должна демпфировать эти колебания.

Проблема температурных деформаций будет со временем проявляться все серьезней и серьезней. Конструкции будут грандиозней, масштабней, что в любом случае приведет к увеличению размеров элементов. Сама проблема температурных деформаций будет уже заметна не только в северных регионах, однако именно в них данная проблема будет становиться довольно серьезной при проектировании и выходить на передний план. Развитие дорожной отрасли также требует новых масштабных проектов для решения проблем. И вантовые мосты могут решить некоторые эти проблемы. Однако нужно особенно ответственно подходить к вопросу проектирования таких конструкций – ведь температурные деформации будут существеннее, и не учитывать их просто нельзя.

Библиографические ссылки

1. Конструкции вантовых пролетных строений [Электронный ресурс]. URL: <http://vse-lekcii.ru/mosty-i-tonneli/metallicheskie-mosty/konstrukcii-vantovyh-proletnyh-stroenij> (дата обращения: 14.03.2019).

2. Сибирские реки и судоходство по Северному морскому пути [Электронный ресурс]. URL: https://studwood.ru/1095824/geografiya/sibirskie_reki_sudohodstvo_severno-mu_morskomu_puti дата обращения: 08.03.2019).

3. Формула линейного расширения [Электронный ресурс]. URL: http://sernam.ru/book_phis_t1.php?id=200 (дата обращения: 11.03.2019).

4. Ильинский А. А. Транспорт и хранение промышленных сжиженных газов. М. : Химия, 1976. 160 с.

5. Строительство моста на остров Русский через пролив Босфор Восточный во Владивостоке [Электронный ресурс]. 2011. URL: <http://www.rusmost.ru/about/> (дата обращения: 09.03.2019).

© Ничипуренко А. А., 2019

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ КАК СПОСОБ СОХРАНЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

В. В. Серватинский¹, О. Д. Балабаева²

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: ¹vservatinsky@list.ru, ²olga666.26@mail.ru

Предлагаются методы формирования интеллектуальных транспортных систем, как способов сохранения надежности автомобильных дорог. В качестве ведущей системы выбраны автоматизированные комплексы по контролю за метеорологическими и эксплуатационно-техническими показателями на автомобильных дорогах. Рассмотрены принципы работы автоматизированных дорожных метеорологических станций, геотехнического мониторинга и систем весового и габаритного контроля, а также, возможность их реализации в настоящее время.

Ключевые слова: надежность, интеллектуальные транспортные системы, кооперативное регулирование, автоматизированные системы, метеорологические станции, геотехнический мониторинг, системы весового и габаритного контроля.

Стремительный рост городов и автомобильного парка России ставит перед собой проблему повышения качества жизни в мегаполисах и аграрных районах. Развитая транспортно-дорожная сеть является одним из ключевых факторов, влияющих на экономические производственные возможности страны, так как обеспечивает мобильность населения, импорт и экспорт, как продовольствия, так и материальных (природных) ресурсов.

Для обеспечения бесперебойной работы транспортно-дорожного комплекса в течение заданного срока службы, важным является сохранение работоспособности автомобильных дорог, а то есть надежности.

Надежность автомобильной дороги характеризует себя, как вероятностная способность сохранять и обеспечивать среднегодовую скорость транспортного потока близкую к оптимальной, и допустимый уровень обслуживания транспортного движения в течение нормативного срока службы дорожных одежд.

Цифровизация современного общества не стоит на месте, развитие цифровой информации идет во всех сферах, в том числе, и в транспортно-дорожной отрасли. Наиболее актуальным решением проблем сохранения надежности автомобильных дорог является активное интегрирование интеллектуальных транспортных систем (ИТС).

Интеллектуальные транспортные системы представляют собой сложный комплекс подсистем, направленных на внедрение современных технологий информации и коммуникации в транспортную инфраструктуру с целью повышения безопасности и качества дорожного и транспортного регулирования [1]. Системы позволяют обеспечивать сбор, обработку и хранение требуемой информации, с целью комплексного анализа существующей и прогнозируемой ситуации по эксплуатации автомобильных дорог [2].

Разновидность применения интеллектуальных транспортных систем варьируется от средств транспортной телематики, таких программно-аппаратных комплексов, как системы спутникового мониторинга (GPS, GLONASS), до непосредственного внедрения средств интеллектуального обеспечения на самой автомобильной дороге, такие

системы, как весовой габаритный контроль, дорожные метеорологические станции и так далее [3].

В современной России личный транспорт стал легкодоступным, большинство семей имеет в своем распоряжении от одного автомобиля и более, с каждым годом с ростом населения растет и количество транспортных средств, в то время как расчетный срок службы уже действующей автомобильной дороги запроектирован, исходя из существующих, на тот момент, данных об интенсивности движения, на основании технико-экономического расчета по реализующемуся объему грузовых и пассажирских перевозок в год. В связи с этим идет активное рассмотрение и применение подсистем интеллектуального обеспечения, отвечающих за кооперативное, директивное и косвенной управление транспортно-дорожным комплексом на автоматизированном контроле. То есть разрабатываются системы, как повсеместного, так и локального применения, отвечающие за контроль дорожно-транспортной ситуации в режиме реального времени с выявлением потенциальных рисков, моделированием ситуации и с возможностью вывода необходимой своевременной информации для участников дорожного движения на средства транспортной телематики, либо периферийное оборудование (табло и знаки переменной информации), установленное на автомобильной дороге.

В связи с ростом интенсивности движения транспортных средств, проблема надежности и вероятности отказа дорожных одежд автомобильных дорог, а именно изменение прочностного состояния раньше расчетного срока службы, с каждым годом становится актуальнее. Отказ проявляется в ухудшении ровности и увеличении колеяности дорожного полотна, а также снижении сцепных качеств, что делает движение транспортных средств по такой автомобильной дороге небезопасным.

Для повышения эффективности транспортного процесса и снижения возрастающей нагрузки на дорожную конструкцию, применяются следующие сервисные домены в составе ИТС:

- системы весового и габаритного контроля (СВГК);
- автоматизированные дорожные метеорологические станции (АДМС);
- видеонаблюдение за автомобильной дорогой;
- фото- и видеофиксация нарушений правил дорожного движения (ПДД);
- автоматизированные электронные системы взимания дорожных сборов с водителей транспортных средств на платных автомобильных дорогах;
- выявление инцидентов дорожно-транспортных происшествий в режиме реального времени;
- навигационно-информационное обеспечение участников дорожного движения;
- предоставление услуг сервиса пользователям транспортной системы на бесплатной и платной основе.

Помимо распространенных доменов, упомянутых выше, необходима система автоматизированного геотехнического мониторинга автомобильных дорог [5], позволяющего моделировать ситуацию не только с натурных наблюдений, но и с учетом деформационных изменений грунтов основания дорожной конструкции.

Сохранение надежности автомобильной дороги в нормативном состоянии осуществляется при своевременном выполнении средних работ по содержанию, которые оттягивают нижний предельно допустимый уровень надежности, приводящий к отказу и необходимости в капитальном ремонте. Чаще всего, для анализа дорожной ситуации на краевых и федеральных трассах применяются следующие методы контроля:

- автоматизированные дорожные метеорологические станции;
- весовой и габаритный контроль;
- геотехнический визуальный и инструментальный мониторинг автомобильных дорог [4].

Безусловно, существующие методы контроля позволяют регулировать текущее транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог, хотя работы и ведутся систематически, но через определенные периоды времени. Соответственно, от момента диагностики, принятия проектных решений с назначением работ по ремонту и содержанию до реализации проекта, проходит значительное время, за которое автомобильная дорога принимает новые деформационные изменения. Проанализировав сложившуюся ситуацию, мы пришли к выводу, что необходимо формирование единой системы постоянного автоматизированного контроля технического состояния автомобильных дорог.

С целью повышения качества обслуживания автомобильных дорог, нами предлагается следующий комплекс по контролю за надежностью в рамках ИТС: автоматизированные дорожные метеорологические станции; автоматизированные системы весового и габаритного контроля (АСВГК); автоматизированный геотехнический мониторинг.

Для получения оперативной информации о метеорологических изменениях, на автомобильных дорогах внедряются автоматизированные дорожные метеорологические станции (АДМС). Такие станции имеют диспетчерское регулирование и координирование с выводом необходимой информации, для безопасного движения транспортных средств и участников дорожного движения, на знаки и табло переменной информации (ТПИ и ЗПИ).

Данные зафиксированные системами дорожного метеорологического обеспечения (СДМО) передаются, обрабатываются и хранятся в сервисной базе данных. Накопленная информация позволяет анализировать и делать необходимые выводы по эксплуатации автомобильной дороги. АДМС представляют собой комплекс датчиков, реагирующих на метеорологические изменения, камеры видеонаблюдения, необходимой для визуальной оценки автомобильной дороги, и программного обеспечения с соответствующим интерфейсом, что в совокупности составляет единую информационную систему, позволяющую контролировать возможные изменения на эксплуатируемой автомобильной дороге.

С целью отслеживания грузовых перевозок, на автомобильных дорогах устанавливаются системы весового и габаритного контроля. Существует два типа установок: передвижные и стационарные. Главными свойствами в составе ИТС обладают стационарные комплексы, так как выявление нарушений действующего законодательства в сфере перевозок крупногабаритных и/или тяжеловесных грузов производится автоматически, без участия постов государственной инспекции безопасного дорожного движения (ГИБДД) и патрулирования сотрудников дорожно-постовых служб (ДПС).

Автоматизированная система весового и габаритного контроля (АСВГК) взвешивает транспортные средства во время движения по автомобильной дороге и непосредственного прохождения под «рамкой» весового и габаритного контроля. Датчики измерения веса и габаритных параметров устанавливаются на П-образную металлическую платформу («рамку») высотой не менее 6 метров, оснащенную дорожными весами и комплексами фото- и видеофиксации, которые выявляют и констатируют нарушителей. Взвешивание транспортных средств происходит как в динамике, так и в статике. Система представляет собой последовательную взаимосвязь пункта предварительного контроля, центра обработки данных, стационарного поста весового и габаритного контроля и системы спутниковой передачи данных. Данные автоматически передаются в центр обработки информации, где информационная система определяет превышение весовых и габаритных параметров и осуществляет контроль наличия и соответствия необходимых разрешительных документов, а также осуществляется контроль по наличию неоплаченных в установленные сроки штрафов и других нарушений.

Существующее визуальное и инструментальное обследование не предоставляет возможности полноценно оценить техническое состояние автомобильной дороги на перспективные деформационные разрушения, для этого необходимо постоянное наблюдение и статистический анализ данных, которые сможет позволить только применение автоматизированных систем геотехнического мониторинга.

Система автоматизированного геотехнического мониторинга представляет собой непрерывные измерения и расчет ряда контролируемых параметров с момента возведения дорожной конструкции и в течение срока ее эксплуатации. Это позволяет в любой момент времени получить информацию о состоянии автомобильной дороги. Автоматизированные системы геотехнического мониторинга являются информационно-измерительной системой датчиков, встраиваемых в дорожное полотно, данные с которых передаются и обрабатываются на центральном сервере и необходимая запрограммированная информация выдается оператору, где далее происходит информирование пользователей транспортной системы [5].

Единая автоматизированная система, включающая в себя сбор информации о погодных условиях и состоянии дорожного покрытия, контроль большегрузных транспортных средств и непрерывный инструментальный технический мониторинг автомобильных дорог, способствует решению сразу нескольких задач:

- автоматизированный сбор информации в режиме реального времени в одну базу данных;

- автоматизированная обработка;

- координационная работа дорожно-транспортной ситуацией диспетчерским центром станет более оптимизированной, что позволит: своевременно информировать участников дорожного движения о ситуации на автомобильной дороге, рационализировать работы по ремонту и содержанию, контролировать нарушителей грузовых и крупногабаритных перевозок, путем взимания штрафов;

- моделирование различных ситуаций, как о текущем технико-эксплуатационном состоянии автомобильной дороги, так и уведомления о прогнозируемых деформационных изменениях.

Решение этих задач позволит предотвратить отказ дорожных одежд и сохранять надежность автомобильной дороги в пределах расчетного срока службы. Объединение этих систем представляется наиболее рациональным, так как все они взаимосвязываются между собой. Так, например, метеорологические условия влияют на ровность и сцепные качества покрытия, а перегруженные транспортные средства деформируют дорожное покрытие, и то и другое негативно сказывается на эксплуатационных свойствах дорожной конструкции и ухудшает надежность раньше расчетного срока службы, соответственно, применение геотехнического мониторинга позволяет своевременно диагностировать причиненный ущерб и назначать работы по ремонту и содержанию автомобильной дороги.

Такой аппаратно-программный комплекс по мониторингу транспортно-эксплуатационному и техническому состоянию автомобильных дорог, который включает в себя интегрирование АДМС, АСВГК и автоматизированный геотехнический мониторинг, возможен к реализации в настоящий момент времени. Проработка нормативно-методической базы, национальных стандартов и должное финансирование позволит реализовывать проекты на стратегически значимых дорогах федерального и муниципального значения.

Бесперебойная работа транспортно-дорожного комплекса и безопасность дорожного движения – главные стратегические задачи по оптимизации транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог. Формирование автоматизированных систем в составе ИТС позволяет реализовать эти задачи в оптимальных объемах.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 56829–2015. Интеллектуальные транспортные системы. Термины и определения [Электронный ресурс]. Введ. 01.06.2016. М. : Стандартиформ, 2016 // Профессиональные справочные системы «Техэксперт». URL: <http://www.cntd.ru> (дата обращения: 12.12.2018).

2. ГОСТ Р ИСО 14813-1–2011. Интеллектуальные транспортные системы. Схема построения архитектуры интеллектуальных транспортных систем. Часть 1. Сервисные домены в области интеллектуальных транспортных систем, сервисные группы и сервисы [Электронный ресурс]. Введ. 01.03.2012. М. : Стандартиформ, 2012 // Профессиональные справочные системы «Техэксперт». URL: <http://www.cntd.ru> (дата обращения: 12.12.2018).

3. Евстигнеев И. А. Интеллектуальные транспортные системы на автомобильных дорогах федерального значения России. М. : Перо, 2015. 164 с.

4. ОДМ 218.2.091–2017. Геотехнический мониторинг сооружений инженерной защиты автомобильных дорог [Электронный ресурс]. М. : Стандартиформ, 2017 // Профессиональные справочные системы «Техэксперт». URL: <http://www.cntd.ru> (дата обращения: 12.12.2018).

5. ПНСТ 261–2018. Интеллектуальные транспортные системы. Автоматизированный мониторинг искусственных сооружений автомобильных дорог и оползнеопасных геомассивов. Общие положения [Электронный ресурс]. М. : Стандартиформ, 2018 // Профессиональные справочные системы «Техэксперт». URL: <http://www.cntd.ru> (дата обращения: 12.12.2018).

© Серватинский В. В., Балабаева О. Д., 2019

ПРИМЕНЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОЧИХ КОЛЕС НАСОСОВ

И. А. Шклюдов, Н. А. Шепета

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: nashka116@mail.ru

Проведен сравнительный анализ способов нанесения покрытий, повышающих долговечность деталей. Рассмотрены особенности метода электрошлаковой наплавки порошковых композиционных материалов. Приведено исследование условий эксплуатации магистрального насоса, изучены свойства основного материала рабочего колеса, определены параметры технологического процесса нанесения защитного покрытия.

Ключевые слова: повышения долговечности деталей, композиционные материалы, электрошлаковая наплавка.

Снижение затрат при добыче и транспортировке нефти обеспечивается повышением производительности и надежности используемого оборудования. Вместе с нефтью на поверхность поднимаются механические примеси (частицы породы, цемента), растворенный в нефти газ, вода и минеральные соли в виде кристаллов нефти и раствора в воде. Минерализованная пластовая вода, находящаяся в нефти, является агрессивной средой с точки зрения коррозии трубопроводов и оборудования. Подготовка нефти к транспортировке на промыслах устраняет данные включения. При этом нефтетранспортирующее оборудование подвергается различным видам износа рабочих поверхностей.

Наиболее серьезные повреждения наблюдаются на рабочих колесах, валах, подшипниках и корпусах насосов как максимально нагруженных элементов оборудования. Влияние агрессивных сред приводит к уменьшению толщины лопастей рабочего колеса и ухудшению параметров работы всего агрегата.

В настоящее время для повышения долговечности деталей машин используются конструктивные, технологические, и эксплуатационные методы. Конструктивные методы предусматривают мероприятия, связанные с изменением конструкции машины для улучшения работоспособности сопрягающихся деталей в эксплуатации, экономичности, эффективности агрегата, а также подбором необходимых материалов и обеспечением прочности деталей и узлов машин.

К технологическим методам повышения долговечности деталей машин относятся мероприятия по улучшению свойств его материалов, применяемых в данной конструкции. Свойства детали начинают формироваться в процессе отливки, сварки, обработки давлением и механической обработки. Все последующие операции изготовления детали сводятся к улучшению свойств материала заготовки. Поэтому прежде чем назначать улучшающую обработку, необходимо убедиться в правильности выбора материала и метода получения заготовки детали. Дальнейшее повышение долговечности деталей машин при их изготовлении осуществляется путем применения методов термической и химико-термической обработки. Эти виды обработки позволяют значительно повысить прочность и износостойкость деталей. Так, после обычной закалки и соответ-

вующего отпуска прочность углеродистой стали можно повысить в 1,5–2 раза, легированной стали в 2–3 раза.

Большое распространение получили методы нанесения износостойких материалов на поверхности деталей машин и механизмов путем наплавки и напыления. В качестве мероприятий, повышающих коррозионную стойкость, что немаловажно для долговечности деталей, широко используются методы нанесения гальванических, лакокрасочных, пластмассовых эмалевых покрытий. Процесс нанесения защитных покрытий, как правило, является заключительным в технологическом комплексе операций по созданию деталей и узлов машины, от качества выполнения во многом зависит долговечность изделия.

К традиционным способам нанесения покрытий, повышающих долговечность деталей, можно отнести следующие.

Металлизация напылением на обрабатываемую поверхность расплавленного металла при помощи воздушной струи – широко применяется для нанесения на открытые, легкодоступные поверхности.

Горячий способ нанесения защитного покрытия является одним из самых старых и благодаря своей простоте наиболее распространенным в промышленности. Этот способ подразумевает окунание изделия в ванну с расплавленным металлом, например цинк, олово, алюминий, свинец и другие.

Диффузионный способ нанесения покрытий. Суть данного способа заключается в проникновении металлопокрытия в поверхностный слой основного металла под воздействием высокой температуры. Широкое распространение получили методы нанесения диффузионных покрытий, при которых компоненты поступают к поверхности подложки в виде паров элементов или их газообразных соединений. Данный метод является весьма дорогостоящим, так как для его применения необходимо наличие специальных вакуумных камер для защиты основного материала от воздействия окружающей среды и его нагрева

Электрошлаковая наплавка. Этот процесс основан на выделении тепла электрического разряда в ванне расплавленного флюса. Электрошлаковая наплавка используется для изготовления биметаллических деталей, а также для получения износостойких покрытий

Одним из видов покрытий, повышающих долговечность деталей машин и агрегатов в целом, являются порошковые композиционные материалы, которые обладают рядом преимуществ, таких, как довольно высокая прочность, значительная жесткость, малый удельный вес, сопротивление «старению материала», значительно меньшая подверженность износу. Одновременно композиционные материалы обладают также рядом недостатков: анизотропией вдоль волокон или поперек; большим удельным объемом; повышенной гигроскопичностью; токсичностью ряда материалов.

Для получения композиционных соединений легирующие элементы специально вводятся в сталь для получения необходимых свойств путем различных способов нанесения на поверхности деталей и узлов машин и агрегатов. Они улучшают механические, физические и химические свойства основного материала. Для сопротивления абразивному износу и коррозии выбраны элементы: хром, марганец, молибден, обладающие наилучшими свойствами по повышению долговечности покрытий и минимальной стоимостью.

Материалы, поступают в виде кусков и подвергаются дроблению и помолу, а также сушке и прокатке. Помол материалов удобно производить в мельницах. Готовые порошки отвешиваются по рецептуре и подвергаются сухому смешиванию. Полученная смесь поступает на участок заполнения проволоки. На определенной стадии

формирования в ленту засыпается дозированно-точное количество легирующих элементов (шихты).

Подготовка покрытия сводится к электролитической очистке с применением электрического тока от внешнего источника и относится к универсальным сильнодействующим способам, применяемым для очистки изделий из любых металлов, при условии хорошей сохранности предмета.

Наибольшее распространение получили следующие методы нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности деталей: металлизация напылением; горячий способ нанесения защитных покрытий; диффузионный способ; электрошлаковая наплавка.

Среди перечисленных способов можно выделить наиболее эффективный. Таким способом является способ повышения долговечности электрошлаковой наплавки порошковых композиционных материалов на рабочие поверхности, Примером может служить колесо магистрального насоса НМ1250-260 (см. рисунок).



Конструктивные элементы рабочего колеса

Нанесение композиционных материалов порошковой проволоки на рабочую поверхность в виде ленты с необходимым составом легирующих элементов марки ПП-Нп-18Х1Г1М для автоматической и полуавтоматической наплавки под флюсом и в среде защитных газов износостойкого слоя на детали осуществляется на основе расчета режимов наплавки. К расчетным параметрам наплавки ленты относятся: толщина и ширина наплавленного слоя, величина тока наплавки, напряжение дуги, скорость подачи проволоки, скорость наплавки.

Разработана технология повышения надежности и долговечности рабочего колеса магистрального насоса с применением порошковых композиционных материала, обоснована целесообразность применения данной технологии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведен анализ условий эксплуатации магистрального насоса, изучены свойств основного материала рабочего колеса; проанализированы в сравнении способы повышения долговечности материалов рабочих элементов машин нефтегазового комплекса; обоснован способ повышения долговечности, и принципы выбора легирующих элементов; разработана технология подготовки рабочей поверхности и нанесения композиционных материалов с выполнением соответствующих расчетов.

Данный способ является менее затратным, удобный для нанесения на изнашиваемую поверхность рабочего колеса магистрального насоса, а именно лопасти, не требует

дополнительных видов обработки, обладает высокой производительностью и возможность наплавки из различных металлов, сплавов и трудносвариваемых материалов.

Библиографические ссылки

1. Тялина Л. Н., Минаев А. М., Пручкин В. А. Новые композиционные материалы : учеб. пособие. Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. 80 с.
2. Фруммин И. И. Сварка порошковой проволокой. Киев, 1972. 215 с.

© Шепета Н. А., Шклюдов И. А., 2019

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕНГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОПЛИВНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ ЖРД

Е. А. Грачева

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

Рассматриваются методы, применяемые при контроле сварных соединений. Приведен анализ метода рентгенографического контроля, предложены способы повышения качества результатов.

Ключевые слова: рентгенографический контроль, сварные соединения, неразрушающий контроль.

Процесс изготовления конструкции топливной магистрали завершает присоединение вспомогательных элементов методом ручной аргонодуговой сварки. Образование сварного шва происходит за счет расплавления кромок основного металла и дополнительного вводимого присадочного металла при воздействии электрической дуги.

Таким образом, качество и надежность входных магистралей подачи топлива ракетного двигателя определяется механическими свойствами заготовок стального листа, качеством присадочного металла и характеристиками полученных сварных швов тонкостенной металлической конструкции. Контроль структуры и характеристик сварных швов представляет основную трудозатратную техническую задачу при обеспечении качества топливных магистралей при проведении выходного контроля [1].

Решение данной задачи на практике обеспечивается комбинированным применением рентгенографии, пневматических и гидравлических испытаний сварных конструкций.

Методология рентгенографического анализа применительно к несовершенствам структуры сварного шва обладает весьма высокой чувствительностью по отношению к размеру трещин, позволяет распознавать тип и места расположения дефектов сварных швов в топливной магистрали, в сравнении с другими методами контроля, такими как ультразвуковая дефектоскопия, капиллярная дефектоскопия и т. д. [2].

Основанный на принципах просвечивания контролируемого участка детали рентгеновскими или гамма-лучами, метод радиографического контроля сварных швов – один из самых точных. Как и все технологически сложные процессы, он имеет свои достоинства и недостатки.

Основными преимуществами подобного способа дефектоскопии принято считать [3]:

1. Возможность выявления скрытых дефектов, находящихся внутри сварного шва. Поскольку невидимые снаружи каверны и трещины снижают прочность готового изделия точно так же, как и те, которые находятся на поверхности, их необходимо своевременно обнаружить, что простым методикам часто не под силу.

2. Высокую точность полученных данных, позволяющих оценить размеры и характер дефекта, место его расположения. На основании полученной информации появ-

ляется возможность выявить причину возникновения брака и принять меры к её устранению.

3. Малое время, необходимое для проведения обследования и оценки данных. Это означает, что метод радиографического контроля сварных швов применим не только на ответственных участках работы, но и в массовом производстве.

4. Возможность документирования результатов. Проводящий технологический контроль специалист может подшить в паспорт готового изделия снимок с точными данными обследования.

Для того чтобы результаты радиографического контроля были достоверны, следует выполнить ряд условий.

1. С поверхности контролируемого шва удаляются окалина, шлак и другие загрязнения, из-за которых может быть искажена реальная картина.

2. Плотность потока излучения должна быть достаточной для того, чтобы сделать возможным регистрацию толщины контролируемого объекта.

3. На протяжении всего времени обследования плотность излучения должна быть стабильной и иметь постоянный характер.

4. Согласно требованиям ГОСТ, для каждого объекта контроля разрабатываются технологические карты [4].

Характеристики источника излучения подбираются в зависимости от типа исследуемого материала и его толщины. Только когда перечисленные требования соблюдены, можно полностью полагаться на полученные результаты.

Одновременно при проведении рентгенографического контроля необходимо учитывать необходимость применения мер защиты персонала от излучения, большой объем проводимых работ для тотального обследования сварных швов, необходимость получения набора снимков одного участка сварного шва с разных ракурсов при сложной конфигурации изделия, имеющего компактную конструкцию с большим количеством близко расположенных поверхностей.

Таким образом, при соблюдении всех условий применения рентгенографического контроля, можно сделать вывод, что данный метод имеет неоспоримые преимущества по точности позиционирования дефектов, но требует значительной затрат времени и обеспечения мер по защите персонала от излучения.

Библиографические ссылки

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей : учебник для студентов вузов / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин и др. : под общ. ред. проф. Г. Г. Гахуна. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.

2. Баженов М. Ф., Байчман С. Г., Карпачев Д. Г. Твердые сплавы : справ. М. : Металлургия, 1978. 184 с.

3. Сатюков В. А., Соколкин Ю. В. Технологическая механика топливных магистралей жидкостных ракетных двигателей. 2009. 144 с.

4. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

© Грачева Е. А., 2019

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

А. М. Огурцов, В. Ю. Журавлев

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

Дано сравнение рассмотренных традиционных и перспективных методов ультразвукового контроля качества изделий и конструкционных материалов.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, фазированные решетки, дифракционно-временной метод.

В настоящее время на предприятиях космической отрасли созданы и достаточно эффективно функционируют системы обеспечения качества выпускаемой продукции. Важную роль в обеспечении качества играют методы неразрушающего контроля для обнаружения неоднородностей и внутренних дефектов изделий. Ультразвуковой контроль (УЗК) один из наиболее распространенных физических методов. По сравнению с другими методами (УЗК) имеет ряд преимуществ: высокую чувствительность и производительность, возможность контроля при одностороннем доступе, относительно низкую стоимость оборудования, безопасность. В основе работы любого ультразвукового дефектоскопа лежат ультразвуковые колебания, которые, отражаясь от внутренних неоднородностей изделия, позволяют определить глубину дефектов, а также их координаты и размеры. Ультразвуковые дефектоскопы бывают двух видов: одноканальные и многоканальные, позволяющие делать прозвучивания нескольких зон или нескольких слоев изделия за один проход (поворот) и осуществлять регистрацию всего процесса контроля. В традиционных импульсных дефектоскопах используются эхо-метод, теневой и зеркально-теневой методы контроля, основанные на регистрации интенсивности и времени прихода отраженных от несплошностей сигналов излучаемых одним и принимаемых другим ультразвуковыми пьезоэлектрическими преобразователями.

Современные портативные дефектоскопы помимо обнаружения брака в металлах и их сплавах, пластмассе, композитных материалах, дереве, бетонных конструкциях, клеевых соединениях могут осуществить проверку сварных соединений, обнаружить места отклонения в размерах деталей, коррозионного и эрозийного поражения, наличие расслоений, микротрещин, воздушных пустот, нарушения химического состава сплавов. Они обладают универсальностью для контроля материалов с различными акустическими свойствами, способностью автоматической сигнализации обнаружения дефектов, возможностью накопления, обработки и визуализацией информации по различным параметрам. В настоящее время получает распространение ультразвуковой контроль фазированными решетками. Он основан на последовательном возбуждении множества элементов, из которых состоит преобразователь (матричная решетка). Обычно количество отдельных элементов варьируется от 16 до 256, каждый из которых возбуждается отдельно по запрограммированной схеме. Основным принципом фазированного ультразвукового контроля является возбуждение зондирующих импульсов с индивидуальным компьютерным управлением амплитудой сигнала и задержкой по времени для каждого элемента в многоэлементном пьезоэлектрическом преобразователе. Возбужде-

ние сразу нескольких элементов фазированного преобразователя позволяет генерировать сфокусированный ультразвуковой (УЗ) луч с возможностью динамически изменять параметры УЗ луча, такие как угол ввода, фокусное расстояние и размер фокусного пятна с помощью программного обеспечения. Для генерации УЗ волны в одной фазе посредством конструируемой интерференции, различные активные элементы фазированного преобразователя пульсируют в различное заданное время. Чем больше элементов, тем лучше характеристики фокусировки и управления лучом и тем больше охват сканирования и вероятность обнаружения дефектов. В то же время увеличивается стоимость приборного оснащения. Каждый элемент возбуждается отдельно, но их импульсы формируют один фронт волны. Результат традиционного УЗК выводится в виде А-скана. Метод фазированной решетки – это множество А-сканов, количество которых зависит от числа преобразователей в фазированном датчике. В дальнейшем это множество А-сканов преобразуется в S-скан. Электронное управление углом ввода УЗ-пучка и анализ отраженных эхосигналов позволяют в режиме реального времени формировать на экране дефектоскопа S-скан, в виде двумерного изображения сечения. S-скан не только предоставляет оператору наглядную информацию о расположении и координатах дефектов, но и позволяет измерять их реальные размеры, визуализировать структуру материала, выделяя цветом частоту амплитудных колебаний.

В основе принципа работы дефектоскопа лежит цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) с выводом на монитор томограмм, сфокусированных в точках сечения, для обеспечения наилучшего пространственного разрешения, максимальной чувствительности по всей визуализируемой площади и высокой точности контроля. Специализированное программное обеспечение ADM – позволяет передавать сохраненные данные из прибора на внешний компьютер для дальнейшей обработки результатов контроля, документирования в виде томограмм и эхо-сигналов с параметрами контроля и последующего архивирования. Метод фазированной решетки не противоречит принятым стандартам традиционного УЗК, так как является одним из способов генерирования ультразвуковых волн. Например, если нормативом предписан контроль датчиком с углом ввода 60° , это дает возможность использовать фазированную решетку, поскольку генерируя лучи под множеством углов, у контроллера есть возможность выбрать луч с нужным углом и другими регламентированными параметрами. Значительное увеличение объема полимерных композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов стимулирует разработку специальные алгоритмы реконструкции изображений дефектоскопов на основе фазированных решеток к контролю композитов и изделий из них. Контроль изделий из композитов существенно затруднен для обычной УЗ-дефектоскопии тем, что эти материалы, как правило, сильно анизотропные и имеют слоистую структуру.

В настоящее время для наиболее общих типов сканирования фазированными решетками (линейное, секторальное сканирование, динамическая фокусировка по глубине) ряд компаний разрабатывает автоматизированные диагностические комплексы. В последнее время интенсивно ведется разработка приборов диагностики изделий на основе ультразвукового дифракционно-временного метода – Time of Flight Diffraction (ToFD). Метод ToFD основан на взаимодействии ультразвуковых волн с краями несплошностей. Это взаимодействие приводит к излучению дифракционных волн в широком диапазоне углов. Обнаружение дифракционных волн позволяет установить наличие несплошности. Время прохождения регистрируемых сигналов является мерой оценки высоты несплошности, тем самым позволяя измерить дефект. Размер несплошности всегда определяется временем прохождения дифракционных сигналов. Амплитуда сигнала не используется для определения размера. После столкновения с дефектами, волна изменяет свое направление и время регистрации в приемнике, в бездефект-

ных структурах это время должно быть близко к эталонному. Обработывая принятые сигналы, на экране дефектоскопа создается наглядный образ дефекта. Для получения и приема продольных (боковых) волн, необходимо расположить два наклонных датчика с обеих сторон сварного шва, при этом необходимо, чтобы излучатель и приемник находились на одном уровне. В процессе контроля, продольная волна прямолинейно движется через исследуемый материал и возвращается в приемный ПЭП. При обследовании объектов большой толщины, иногда надо сделать несколько последовательных проходов, но в большинстве случаев достаточно достоверные результаты можно получить за один проход. Боковая волна (lateral wave): продольная волна, которая распространяется прямолинейно от излучающего до приёмного ПЭП в конфигурации ToFD.

Согласно анализу результатов полученных в результате применения дифракционно-временного метода и радиографии, метод TOFD позволяет провести измерения размеров дефекта и глубину его залегания в материале. В частности метод TOFD показал себя более чувствительным к таким дефектам как плоскостные трещины, точность позиционирования дефекта у него более чем трехкратно превосходит точность ультразвуковых дефектоскопов на фазированных решетках. Дифракционно-временной метод ToFD применим, как правило, для материалов с относительно низкими уровнями затухания и рассеяния ультразвуковых волн. В большинстве случаев метод применим для нелегированных и низколегированных углеродистых сталей и сварных соединений, но также возможно его применение для мелкозернистых аустенитных сталей и алюминия. Возможность достижения более высокой точности при проведении измерений, независимость обнаружения дефекта от его углового положения, высокая производительность контроля, так как сканирование проводится вдоль одной линии с контролем всего объема материала, 100 % воспроизводимость результатов контроля.

Библиографические ссылки

1. Технологические аспекты применения ультразвуковых дефектоскопов на фазированных решетках с роликовым датчиком / И. В. Антонов, С. С. Соколов, Е. В. Кузовников и др. // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 5-2. С. 241–246.
2. Коновалов Н. Н. Оценка показателей достоверности ультразвукового контроля сварных соединений // *Дефектоскопия*. 2003. № 9. С. 4–8.
3. Сыркин М. М. Повышение достоверности автоматизированного ультразвукового контроля // *Дефектоскопия*. 2003. № 2. С. 11–23.

© Журавлев В. Ю., Огурцов А. М., 2019

ПРОБЛЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ГОРОДСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ

Е. В. Горяева

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

Систематический мониторинг является основой управления состоянием автомобильных дорог и исходной базой для эффективного использования средств и материальных ресурсов, направляемых на реконструкцию, ремонт и содержание дорожной сети. В процессе диагностики и оценки состояния дорог определяют виды и состав основных работ и мероприятий по содержанию, ремонту и реконструкции с целью повышения их транспортно-эксплуатационного состояния до требуемого уровня. Улично-дорожная сеть составляет структурную основу современных городских поселений. Функционирование УДС должно обеспечивать потребность населения в транспортных услугах, поэтому транспортно-эксплуатационное состояние УДС характеризует качество оказываемой транспортной услуги. При неудовлетворительном состоянии автодороги так называемая «транспортная услуга» оказывается потребителю некачественно, особенно в регионах, на городских и поселковых дорогах. Нормативно-техническая база мониторинга автодорог обширна, объем работ соответствующий выполнению всех нормативных требований колоссальной и практически невыполним для дорог малых муниципальных образований с экономической точки зрения.

Диагностика автодорог, оценка технико-эксплуатационного состояния автодорог, улично-дорожная сеть (УДС), городские поселения (ГП), финансирование, содержание и ремонт УДС

Оценка технико-эксплуатационного состояния автодорог производится в процессе мониторинга, диагностики. Цель диагностики и оценки состояния автомобильных дорог состоит в получении полной, объективной и достоверной информации о транспортно-эксплуатационном состоянии дорог, условиях их работы и степени соответствия фактических потребительских свойств, параметров и характеристик требованиям движения. Систематический мониторинг является основой управления состоянием автомобильных дорог и исходной базой для эффективного использования средств и материальных ресурсов, направляемых на реконструкцию, ремонт и содержание дорожной сети. В процессе диагностики и оценки состояния дорог в процессе эксплуатации выявляют участки дорог, не отвечающие нормативным требованиям к их транспортно-эксплуатационному состоянию и, руководствуясь «Классификацией работ по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования» [1], определяют виды и состав основных работ и мероприятий по содержанию, ремонту и реконструкции с целью повышения их транспортно-эксплуатационного состояния до требуемого уровня.

Диагностика и оценка состояния автомобильных дорог и дорожных сооружений регламентируется ГОСТ 33388–2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению диагностики и паспортизации» [2] и ОДН 218.0.006–2002 [3] и производится систематически через установленные промежутки времени на протяжении всего срока службы дорог и дорожных сооружений. Общая оценка качества

и состояния автомобильных дорог производится по показателям потребительских свойств, обеспечиваемых фактическим уровнем эксплуатационного содержания, геометрическим и параметрам и, техническим и характеристиками, инженерным оборудованием и обустройством.

Улично-дорожная сеть в населённых пунктах формируется в виде непрерывной системы с учётом функционального назначения улиц и дорог, интенсивности транспортного, велосипедного и пешеходного движения. Основными элементами улично-дорожной сети являются скоростные дороги, магистральные улицы и дороги; улицы и дороги местного значения. Практическое значение УДС заключается в том, что ее функционирование должно обеспечивать потребность населения в транспортных услугах, поэтому можно сказать, что транспортно-эксплуатационное состояние УДС характеризует качество оказываемой транспортной услуги. При неудовлетворительном состоянии автодороги так называемая «транспортная услуга» оказывается потребителю некачественно, особенно в регионах, на городских и поселковых дорогах. Качество и состояние УДС в малых городских поселениях оставляет желать лучшего и на это есть несколько причин [4–8]:

1. Нехватка финансовых ресурсов на проведение работ по оценке технико-эксплуатационного состояния УДС ГП.

2. Дефицит финансовых ресурсов в бюджетах городских поселений на выполнение ремонтных мероприятий.

3. Недоремонт сети, крайне низкое технико-эксплуатационное состояние покрытий городских улиц, их низкие потребительские свойства, проблемы с безопасностью дорожного движения, инфраструктурные ограничения развитию экономики городских поселений.

Нормативно-техническая база мониторинга автодорог обширна, объем работ соответствующий выполнению всех нормативных требований колоссальной и практически невыполним для дорог малых муниципальных образований с экономической точки зрения.

Вся информация, собираемая при выполнении диагностики автомобильных дорог, не зависит от категории дороги и подразделяется на две группы:

- группа информации, получаемой из внешних информационных источников (технические паспорта, базы дорожных данных, проектная и рабочая документация и пр.);

- группа информации, собираемой при выполнении полевых работ по диагностике.

Перечень исходной информации и сведений, собираемых при выполнении диагностики автомобильных дорог: общие данные о дороге, геометрические параметры и характеристики, характеристики дорожной одежды и покрытия, сведения об искусственных дорожных сооружениях, обустройстве автомобильных дорог, объектах придорожного сервиса, объектах дорожной службы, характеристики транспортного потока и данные о дорожно-транспортных происшествиях на дороге, видеоматериалы. Кроме основной исходной информации, для различных управленческих задач и наполнения (актуализации) отраслевых информационных систем, автоматизированных баз дорожных данных, выполнения технической паспортизации и инвентаризации автомобильных дорог, а также сбора сведений для ведения государственной статистической отчетности, в процессе диагностики дорог может собираться еще и дополнительная информация: балансовая стоимость дороги, износ дороги и дорожных сооружений, сведения о ремонтах дороги за время эксплуатации (местоположение, сроки, объемы и виды ремонта), расположение (координаты при необходимости) коммуникаций в полосе отвода, их тип и габариты, сведения об опорной геодезической сети дороги (ОГС), их коор-

динаты в общемировой системе координат и кроки; состояние труб, состояние подземных и надземных пешеходных переходов, расположение (координаты при необходимости) населенных пунктов, через которые проходит дорога с указанием числа жителей, материалы специализированной съемки и т. д.

Таким образом, объем собираемой в процессе диагностики автодороги информации, в соответствии с нормативными актами, огромен и не все эти данные необходимы для принятия решения о виде и масштабности ремонта. Измеряемые параметры автодороги при диагностике определяются специализированным оборудованием по утвержденным методикам. Соответственно для проведения диагностики требуется использование множества приборов, значительные затраты труда и времени на сбор и обработку требуемой информации.

Обследование и диагностика автодорог – это целый комплекс мероприятий, на проведение которых необходимы значительные трудовые и материально-ресурсные затраты, а, следовательно, и соответствующее финансирование. Дорожная отрасль финансируется в виде субсидий из федерального бюджета и бюджетов субъектов РФ. При этом объем финансирования составляет не более 15–20 % от требуемого. Финансирование региональных дорог уменьшается с каждым годом. Регионам хронически не хватает денег даже на поддержание имеющейся дорожной сети [4]. Объем финансирования на содержание и ремонт улично-дорожной сети муниципальных образований, в сравнении с финансированием дорог федерального и регионального значения, несоизмерим.

Требуется упрощенная методика мониторинга дорог улично-дорожной сети малых муниципальных образований с определением ограниченного числа параметров автодороги, необходимых для принятия решения о необходимости и виде ремонта, а также с описанием оптимального механизма принятия решения об очередности проведения ремонтов с достижением максимального результата.

Методика должна учитывать следующие факторы.

- Действующую нормативно-техническую базу;
- современный уровень развития мобильных программно-аппаратных комплексов оценки и анализа пользовательских характеристик УДС;
- текущий уровень производительных сил дорожной отрасли в районе тяготения городского поселения, технологические возможности дорожно-ремонтных и дорожно-строительных организаций;
- особенности регионального ценообразования на выполнение дорожных работ и местные дорожно-строительные материалы;
- финансовые возможности бюджетов местных администраций по исполнению предусмотренных действующим законодательством полномочий в части технического учета, оценки технического состояния и поддержанию в нормативном состоянии УДС малых городских поселений.

В России вопрос дорог и транспорта всегда стоял очень остро. Изучая ситуацию в стране, связанную с дорожным строительством и развитием транспортной инфраструктуры, видно, что основной упор делается на развитие трасс федерального и международного значения, региональные дороги уходят на второй план. По этому поводу заместитель руководителя ФДА «Росавтодор» Игорь Астахов отмечает: «Доля федеральных трасс в нормативном состоянии увеличилась с 45 до 63,3 %. В этом сезоне уже 70 % федеральных дорог мы приведем в нормативное состояние. К концу 2018 года – всю федеральную сеть. На региональной дорожной сети ситуация меняется в лучшую сторону гораздо медленнее. С 2014 года доля дорог регионального значения, соответствующих нормативному состоянию увеличилась всего лишь на 1 %. Этот показатель составляет 38 %. При этом, требования к строительству везде одни и те же. Низкие темпы

развития региональных дорог объясняются тем, что сегодня финансируется только 12 % от нормативной потребности в работах по капитальному ремонту и ремонту территориальных трасс» [5].

Недоремонт УДС, низкая эффективность ремонтных мероприятий обусловлена рядом факторов. Первый фактор – это несоблюдение требований технологии производства работ, что вызывает преждевременные деформации земляного полотна и дорожной одежды. В верхней части насыпей зачастую применяют непригодные грунты. Во многих случаях не выполняются технические требования по обеспечению продольного и поперечного водоотводов [7]. Говоря о недостатках выполняемых работ по капитальному ремонту, надо особо отметить существующую практику ремонта дорожных одежд за счет наращивания слоев покрытия, когда, как известно, деформации происходят в более глубоких слоях автодороги в основании. Зачастую это связано с мерзлотными явлениями, которые недостаточно учитываются как в практике проектирования автодорог, так и в практике планирования ремонтных работ.

Подводя итог всему вышесказанному, можно сказать, что большинство проблем, связанных с диагностикой, содержанием и ремонтом улично-дорожных сетей малых городских поселений связано так и ли иначе с недостаточным финансированием и жесткими нормативными требованиями, не учитывающими реальной социально-экономической ситуации в регионах и возможности местных бюджетов.

Библиографические ссылки

1. Об утверждении Классификации работ по капитальному ремонту, ремонту и содержанию автомобильных дорог (с изм. на 13 ноября 2018 г.) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902397028> (дата обращения: 12.12.2018).
2. ГОСТ 33388–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению диагностики и паспортизации. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. ОДН 218.0.006–2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог (взамен ВСН 6-90) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200030728> (дата обращения: 12.12.2018).
4. Ваганов А. Поручение Путина удвоить строительство дорог не выполняется [Электронный ресурс] // Ведомости. 19.03.2015. URL: https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2015/03/19/poruchenie-putina-stroit-vdvoe-bolshe-dorog-vse-menee-realisticjno?from=newsletter-editorchoice&utm_source=newsletter&utm_medium=content&utm_campaign=editor-choice&utm_term=news3 (дата обращения: 12.12.2018).
5. Донин С. Курирование беспилотного транспорта начнется уже в 2018 году // Дорожное строительство. 2016. № 2. С. 16–19.
6. Боровик В. С., Скоробогатченко Д. А. Качество и нормативы, или как сократить расходы на ремонт и содержание автомобильных дорог? // Автомобильные дороги. 2001. № 12. С. 72–73.
7. О внесении изменений в Транспортную стратегию Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденную распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/557414726> (дата обращения: 12.12.2018).
8. Коробицын Т. Г. Особенности и проблемы финансирования автодорожного строительства в Российской Федерации // Молодой ученый. 2011. Т. 1, № 4. С. 158–161. URL: <https://moluch.ru/archive/27/2926/> (дата обращения: 12.12.2018).

УДК 681.51

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Е. Г. Баранова, Д. К. Лобанов, С. В. Харлашина*

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

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

*E-mail: Kharlashina.v@mail.ru

Одной из основных систем любого космического аппарата является система электропитания, любые сбои в работе которой приводят к нарушению функционирования других систем, а при ее отказе – к завершению срока активного существования космического аппарата.

Ключевые слова: устройство, испытание, электропитание, исследование, модель.

С учетом важности системы электропитания космического аппарата популяризируется вопрос о наземных испытаниях системы, выявлении её работоспособности. В связи с этим в авторском коллективе была разработана идея, позволившая смоделировать нагрузочное устройство для испытания системы электропитания космического аппарата.

Испытание системы электропитания заключается в снятии импедансно-частотной характеристики, от которой зависит устойчивость контура «система электропитания – бортовая нагрузка». Для обеспечения устойчивости этого контура необходимо знать импедансно-частотную характеристику как нагрузки, так и системы электропитания [1; 2]. Система электропитания, как правило, является источником напряжения с низким внутренним сопротивлением и малой индуктивностью, что вызывает сложности при измерении импедансно-частотной характеристики. Для измерения импедансно-частотной характеристики системы электропитания с низким импедансом необходимо наводить колебания по току высокой амплитуды (до 15–20 А).

Кроме того, во время наземных испытаний проводятся испытания на электромагнитную совместимость, для чего необходимо имитировать на шинах системы электропитания помеховую обстановку [3].

Решить эти задачи можно использованием нагрузочного устройства, структура которого представлена на рис. 1. В данной работе выполнено моделирование нагрузочного устройства непрерывного типа (рис. 2), позволяющего снимать импедансно-частотную характеристику системы электропитания в полосе частот до 100 кГц

Имитационное моделирование (рис. 3, 4.) показало, что нагрузочное устройство может наводить гармонические сигналы амплитудой до 10А и частотой до 100 кГц, позволяющие измерить размах напряжения на выходных клеммах СЭП.

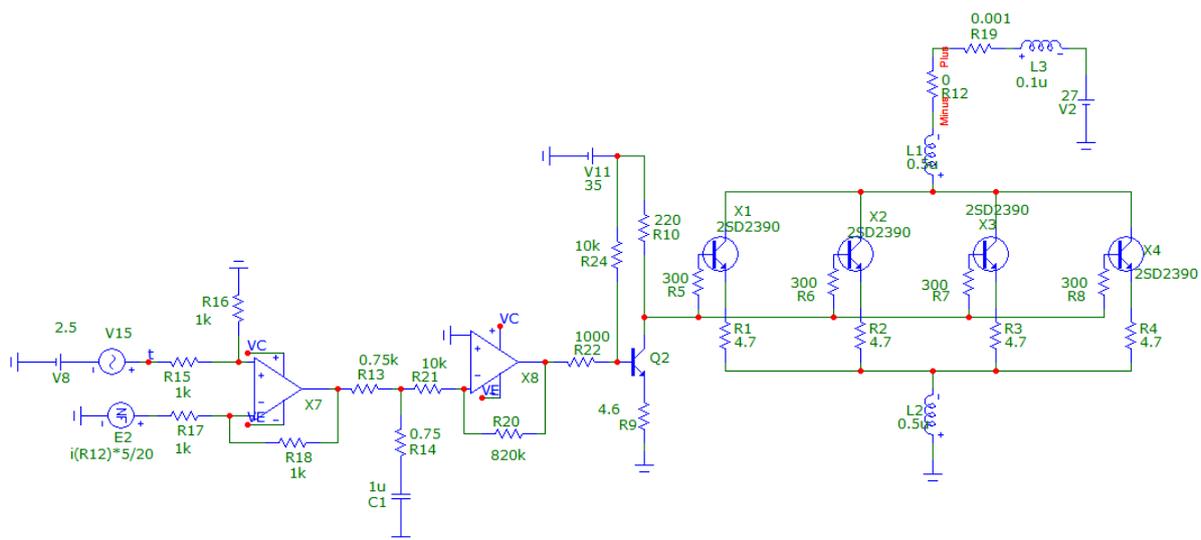


Рис. 1. Структура нагрузочного устройства

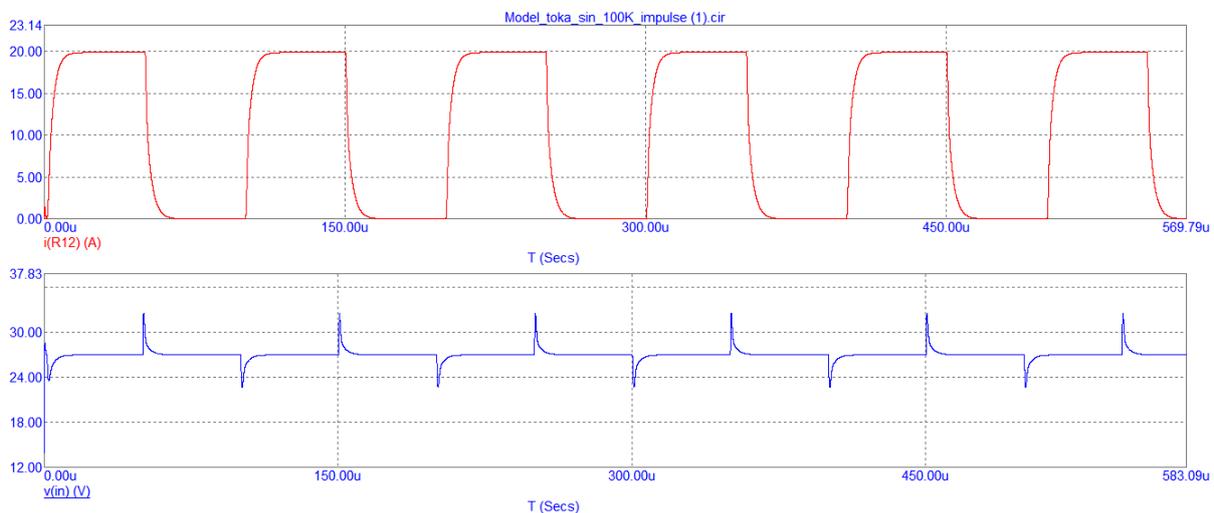


Рис. 2. Импедансно-частотная характеристика системы электропитания

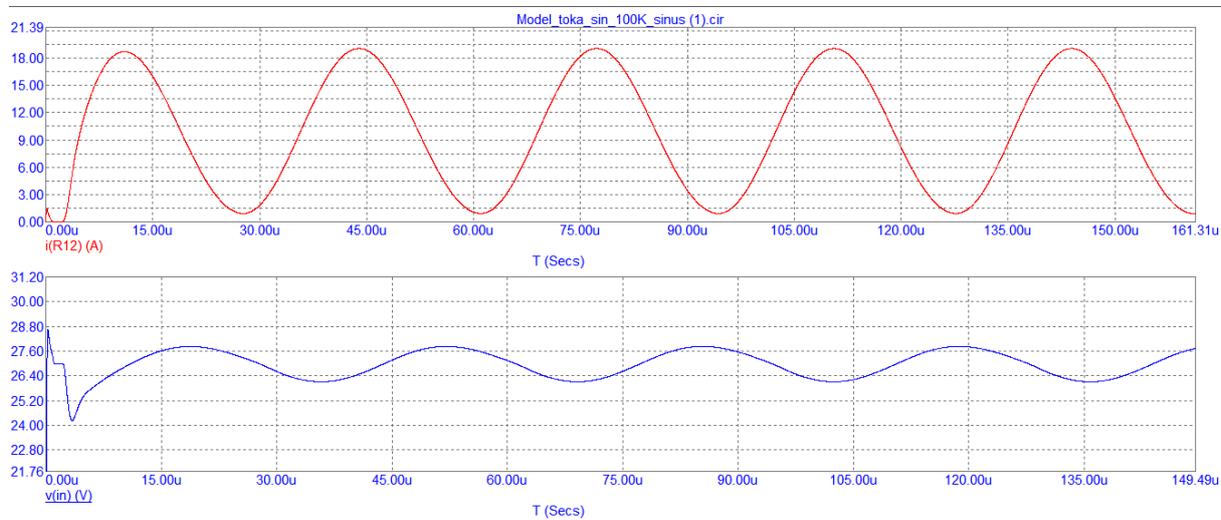


Рис. 3. Гармонический сигнал с частотой 30 кГц

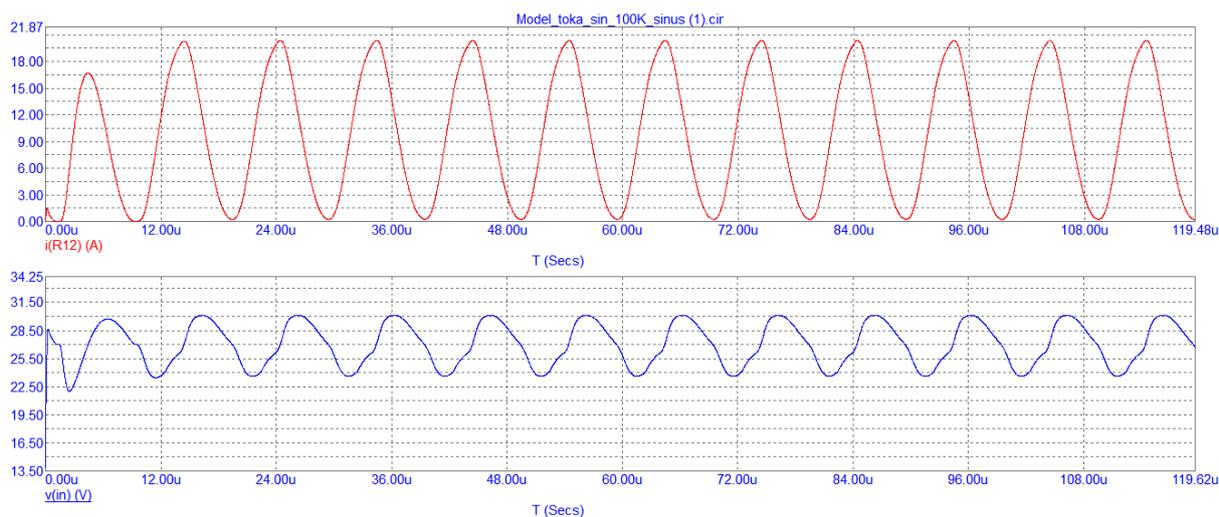


Рис. 4. Гармонический сигнал с частотой 100 кГц

В результате проделанной работы нами были достигнуты желаемые результаты. Получившаяся модель нагрузочного устройства позволяет без каких-либо трудностей наводить колебания по току в нужном частотном диапазоне, вследствие чего реализуется испытание системы электропитания космического аппарата путем снятия импедансно-частотной характеристики.

Библиографические ссылки

1. Лобанов Д. К., Мизрах Е. А. Определение устойчивости вторичных источников питания по импедансным частотным характеристикам // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. (11–14 ноября 2014 г., Красноярск) : в 3 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 192–193.
2. Краснобаев Ю. В., Пожаркова И. Н. Определение допустимых значений выходного импеданса автономной системы электропитания // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 3 (16). С. 91–96.
3. ГОСТ Р 51317.4.6–99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями. Требования и методы испытаний. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

© Баранова Е. Г., Лобанов Д. К., Харлашина С. В., 2019

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ИМПЕДАНС АККУМУЛЯТОРА

Е. Д. Толстенков
Научный руководитель – А. Т. Лелеков

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ted1708@yandex.ru

Описаны принцип работы аккумуляторов, распространение звуковых колебаний в твердых телах. Высказано предположение о влиянии звука на внутреннее сопротивление аккумулятора. Разработана схема эксперимента для подтверждения или опровержения сделанного предположения.

Ключевые слова: аккумуляторы, звук, импеданс.

Электрический аккумулятор – это химический источник электрической энергии, который можно использовать неоднократно за счет обратимости внутренних химических процессов. Поэтому, в отличие от одноразовых батареек, аккумуляторы могут вновь накапливать энергию при подключении их к внешнему источнику.

В основе работы химических источников тока лежит окислительно-восстановительная реакция. Это реакция, при протекании которой происходит изменение степени окисления участвующих в реакции компонентов. В ходе реакции одни вещества отдают электроны, повышая свою степень окисления, а другие присоединяют, понижая степень окисления. Вещества, отдающие электроны, называют восстановителями, а вещества, присоединяющие электроны, окислителями. Число электронов, отдаваемых восстановителем, равно числу электронов, присоединяемых окислителем.

Литий-ионный аккумулятор состоит из двух электродов и разделяющего их сепаратора. Отрицательный электрод изготавливается из углеродных материалов. В качестве положительного электрода может использоваться оксид лития [1]. Сепаратор используется для предупреждения короткого замыкания электродов. Переносчиком заряда в литий-ионном аккумуляторе является положительный ион лития, имеющий способность внедряться в кристаллическую решетку других материалов.

При разряде литий-ионного аккумулятора происходит деинтеркаляция (извлечение) ионов лития из углеродного материала на отрицательном электроде и интеркаляция ионов лития в оксид на положительном электроде. При заряде аккумулятора эти процессы протекают в обратном направлении [2]. То есть процессы сводятся к переносу ионов лития с одного электрода на другой, а активный нуль-валентный литий в реакциях не участвует.

Литий-ионные аккумуляторы производятся в цилиндрическом и призматическом вариантах. В цилиндрическом аккумуляторе пакет электродов и сепаратора сворачивается в рулон. В призматическом аккумуляторе прямоугольные пластины электродов, разделенные сепаратором, складываются друг на друга.

Любой реальный аккумулятор характеризуется величиной внутреннего сопротивления. Эта величина характеризует отличие реального источника от идеального и ограничивает мощность, которую источник может отдать в нагрузку. Внутреннее сопротив-

ление зависит от множества факторов, как внешних, так и внутренних, например, от тока нагрузки, температуры внутри аккумулятора, его емкости.

В качестве одного из внешних факторов можно рассматривать звуковые колебания. Звук представляет собой колебания частиц упругой среды. В качестве этой среды может выступать не только газ или жидкость, но и твердое тело. При этом, как правило, в твердых телах звук распространяется быстрее, чем в жидкостях или газах. Поскольку твердые тела обладают упругостью формы, то есть оказывают сопротивление при попытке изменить их форму, в твердых телах могут распространяться не только продольные волны, но и поперечные [3]. Колебания частиц среды при распространении поперечных волн происходят в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны. То есть при распространении поперечных волн в твердом теле его частицы попеременно сдвигаются в разные стороны от линии распространения волны.

Это значит, что при воздействии звука на аккумулятор могут наблюдаться как колебания расстояния между пластинами, так и колебания площади соприкосновения участвующих в реакции веществ. Предполагается, что эти колебания могут привести к изменению внутреннего сопротивления (импеданса) аккумулятора, а значит, и к изменению мощности, отдаваемой в нагрузку. Для проверки этого предположения предлагается провести эксперимент, схема которого показана на рисунке.

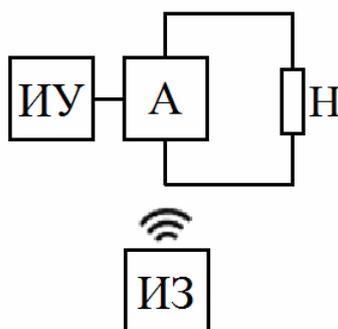


Схема эксперимента:
ИУ – измерительное устройство; А – аккумулятор;
Н – нагрузка; ИЗ – излучатель звука

Для проведения эксперимента понадобятся аккумулятор, измерительное устройство, излучатель звука и нагрузка. К аккумулятору подключается нагрузка и устройство для измерения внутреннего сопротивления аккумулятора. В процессе работы аккумулятора излучатель звука формирует звуковые колебания различной частоты и амплитуды. Эти колебания воздействуют на аккумулятор и, предположительно, вызывают изменение внутреннего сопротивления аккумулятора, что фиксирует измерительное устройство.

Библиографические ссылки

1. Nitta N., Wu F., Lee J. T., Yushin G. Li-ion battery materials: present and future // *Materials Today*. 2015, Vol. 18 (5), P. 252–264.
2. Кедринский И. А., Яковлев В. Г. Li-ионные аккумуляторы : науч.-популяр. изд. Красноярск : Платина, 2002. 268 с.
3. Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны в воде, воздухе и твердых телах. М. : Физматгиз, 1960. 560 с.

© Толстенков Е. Д., 2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

И. П. Солодилов, Е. Д. Зиборов
Научный руководитель – Е. А. Мизрах

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

Приведены теоретические и экспериментальные сведения по исследованию частотных характеристик имитационной модели стабилизатора напряжения с приложенными графическими и схематическими материалами.

Ключевые слова: стабилизатор напряжения, имитационная модель, частотные характеристики.

Стабилизаторы напряжения (СН) постоянного тока широко применяются в электронной технике, где важно соответствие динамических характеристик СН предъявляемым требованиям. Динамические свойства СН определяются его частотной передаточной функцией по управлению и импедансной частотной характеристикой.

Объект исследования представляет собой непрерывный компенсационный стабилизатор напряжения и предназначенный для поддержания выходного напряжения с ошибкой стабилизации до 0,2 % и диапазоном регулирования от 80 до 110 В, при изменении тока нагрузки до 4 А.

Задачей данной работы является отработка методики проверки характеристик устройства на соответствие их техническим требованиям с помощью имитационной модели и исследования ее частотных характеристик.

Имитационная модель стабилизатора напряжения была построена в пакете Micro-Cap 10 (рис. 1). В имитационной модели используются модели реальных компонентов, а также учитываются паразитные индуктивности.

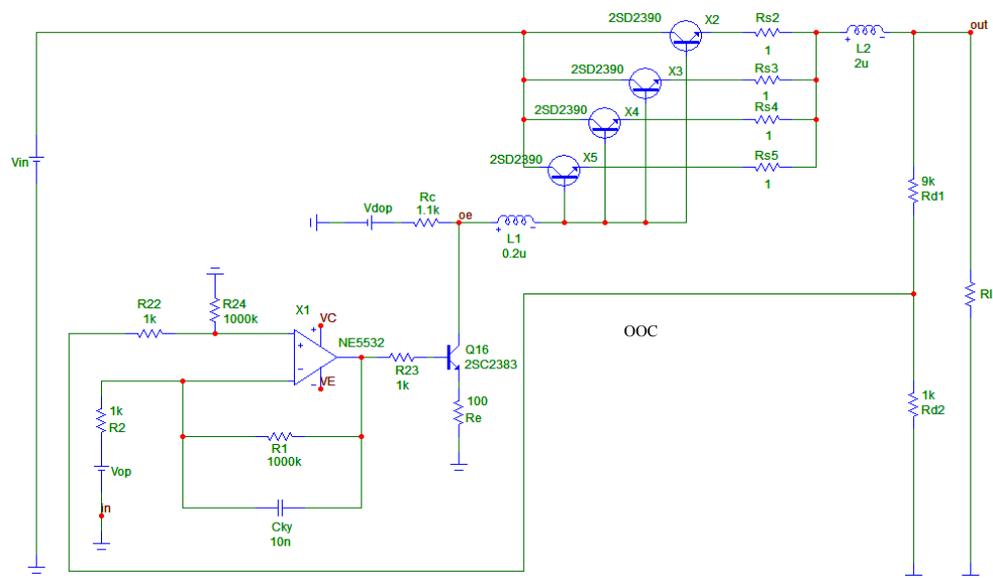


Рис. 1. Имитационная модель стабилизатора напряжения

Исследование частотных характеристик проводилось как для разомкнутой системы (РК), так и для замкнутой (ЗК). На рис. 2 показаны логарифмическая амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики разомкнутой системы, для построения которых в имитационной модели разорвана ООС, а последовательно источнику V_{op} включен генератор синусоидального сигнала. Выражения для построения частотных характеристик:

$$L(\omega) = 20 \cdot \log \left(\left| \frac{V_{out}(j\omega)}{V_{in}(j\omega)} \right| \right), \quad (1)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\arg \left(\frac{V_{out}(j\omega)}{V_{in}(j\omega)} \right)}{\text{deg}}. \quad (2)$$

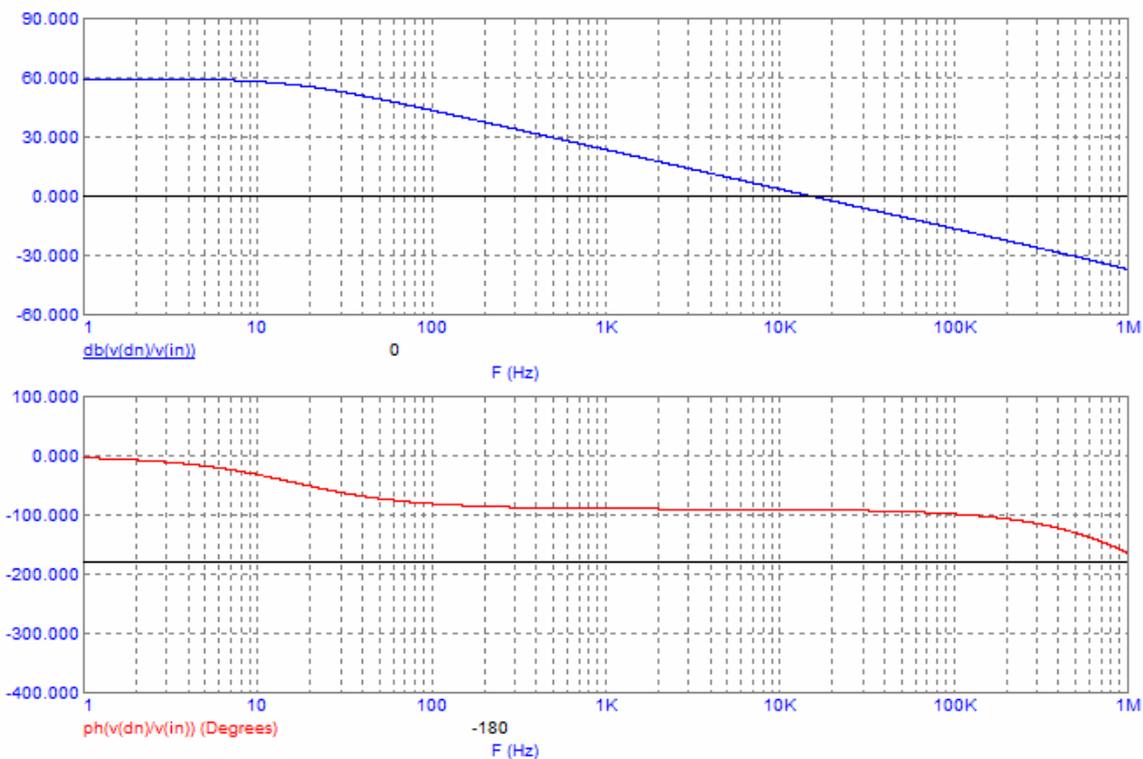


Рис. 2. ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутой системы

По частотным характеристикам разомкнутой системы была проведена оценка устойчивости устройства, а также определена ошибка стабилизации.

Запас по фазе: 88.9 градусов (определяется при $\varphi(\omega) = -180^\circ$ и на частоте, где $L(\omega) = 0$).

Ошибка стабилизации: 0,106 % из выражения (3), где K_{us} – коэффициент усиления РК.

$$\sigma = \frac{1}{1 + K_{us}}. \quad (3)$$

Для оценки выходного импеданса была построена импедансная частотная характеристика замкнутой системы – ИЧХ (рис. 3).

Импеданс: при 10 Гц – 0,4 мОм, при 10 кГц – 0,141 Ом, при 100 кГц – 0.661 Ом, при 1 МГц – 9.441 Ом.

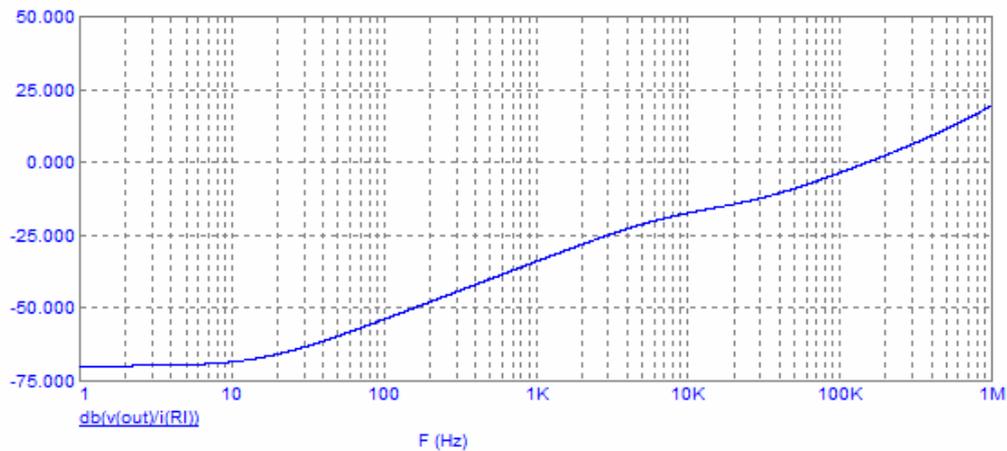


Рис. 3. ИЧХ замкнутой системы

Выражение для нахождения ИЧХ:

$$Z(\omega) = 20 \cdot \log \left(\left| \frac{V_{out}(j\omega)}{V_{in}(j\omega)} \right| \right). \quad (4)$$

Для оценки качества переходных процессов была построена вещественная частотная характеристика замкнутой системы – ВЧХ (рис. 4).

$$U(\omega) = \operatorname{Re} \left(\frac{V_{out}(j\omega)}{V_{in}(j\omega)} \right). \quad (5)$$

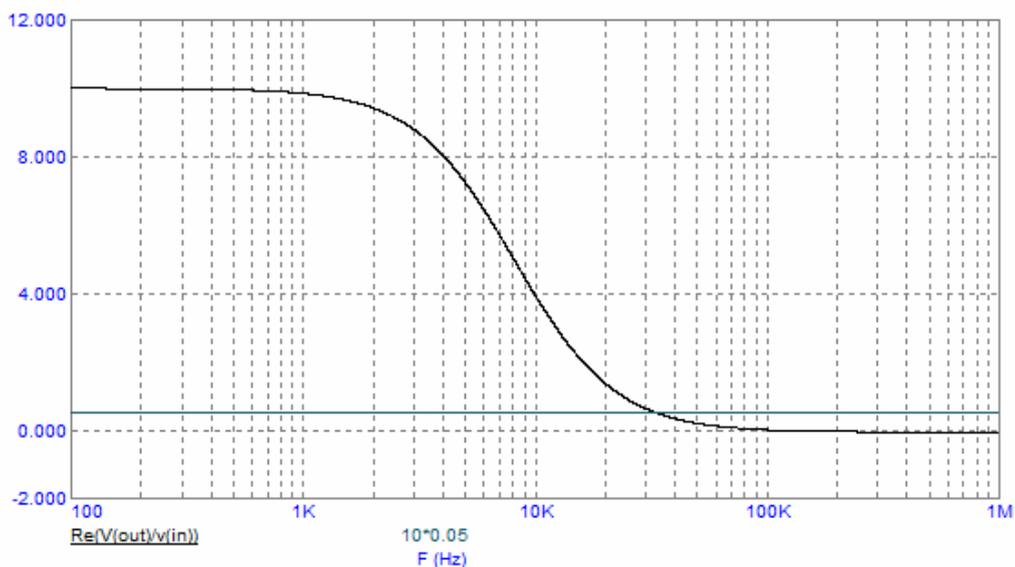


Рис. 4. ВЧХ замкнутой системы

Для ВЧХ такого вида перерегулирование не превышает 18 %. Время регулирования было посчитано из следующих соотношений:

$$P(\omega_n) = 0,05P(0), \quad (6)$$

$$\omega_n = 2\pi \cdot 30 \cdot 10^3, \quad (7)$$

$$\frac{\pi}{\omega_n} < T_p < \frac{4\pi}{\omega_n}. \quad (8)$$

Время регулирования лежит в пределах:

$$T_p = 14,7...58,8 \text{ мкс.}$$

В результате проведенной работы была выработана методика проверки характеристик устройства стабилизации напряжения.

Библиографические ссылки

1. Мизрах Е. А. Теория автоматического управления: линейные непрерывные системы : учеб. пособие. 2-е изд. / Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1997. 184 с.
2. Robert W. Erickson. Fundamentals of Power Electronics 2004. Kluwer Academic Publishers, 2004. 1326 с.
3. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М. : Техносфера, 2005. 632 с.
4. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры : справ. / Г. С. Найвельт, К. Б. Мазель, Ч. И. Хусаинов и др. ; под ред. Г. С. Найвельта. М. : Радио и связь, 1985. 576 с.

© Солодилов И. П., Зиборов Е. Д., 2019

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Капитонов¹, С. И. Козлов²

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ¹out66@mail.ru, ²s.kozlov@gmail.ru

Представлен обзор методов обеспечения надежности современных космических аппаратов. Описаны принципы и пути обеспечения надежности систем, входящих в состав космических аппаратов, на различных этапах их проектирования, отработки и эксплуатации, а также условия перехода от одного этапа к другому.

Ключевые слова: система, космический аппарат, надежность, вероятность безотказной работы, ресурс, срок эксплуатации, анализ, испытания.

Выполнение космическим аппаратом (далее – КА) целевой задачи с требуемыми характеристиками в течение всего срока активного существования является одной из ключевых задач современного спутникостроения. Надежность КА в целом определяется надежностью входящих в его состав систем. Надежность систем, в свою очередь, определяется надежностью составляющей их аппаратуры (приборов).

Каждому этапу создания систем КА присущи свои методы обеспечения надежности со своими контрольными точками выполнения мероприятий.

На этапе разработки рабочей конструкторской документации (РКД) должны быть проведены следующие работы в части обеспечения надежности:

- функциональный анализ (на уровне приборов и системы в целом) – проводится с целью определения влияния потери отдельных технических функций приборов на их работоспособность и работоспособность системы в целом, на уровне их функциональных схем;

- анализ надежности (на уровне приборов и системы в целом) – проводится с целью определения вероятности безотказной работы в течение заданного времени (срока эксплуатации);

- анализ видов, последствий и критичности отказов (на уровне приборов и системы в целом) – проводится с целью определения возможных видов отказов в пределах выполняемых функций и оценки влияния конкретного вида возможного отказа на заданные характеристики;

- анализ нагрузок на комплектующие (на уровне приборов) – проводится с целью определения соответствия коэффициентов электрических и тепловых нагрузок на электрорадиоизделия, входящих в состав приборов, предъявляемым требованиям. Проводится по результатам анализа рабочих режимов электрорадиоизделий, примененных в приборах;

- анализ худшего случая (на уровне приборов) – проводится с целью подтверждения того, что характеристики приборов соответствуют предъявляемым требованиям при наихудших условиях работы на конец срока эксплуатации;

- анализ обеспечения ресурса и сохраняемости (на уровне приборов) – проводится с целью выявления элементов, критичных по ресурсу и сохраняемости, заданных

в требованиях на разработку, и определения составных частей прибора, требующих проведения испытаний (ускоренных) на ресурс и сохраняемость;

– анализ перерывов (на уровне системы) – проводится с целью:

а) выявления событий, связанных с полной или частичной потерей целевых функций системы и КА в целом;

б) определение элементов системы, отказы и неисправности которых приводят к возникновению этих событий;

в) определение мер по минимизации возникновения перерывов в работе системы и КА в целом.

– выбор наиболее надежных комплектующих, материалов, элементов и узлов (на уровне приборов)

На этапе наземной отработки должны быть проведены следующие работы в части обеспечения надежности:

– испытания по подтверждению работоспособности и выполнения целевой задачи с требуемыми характеристиками в нормальных (на уровне приборов, систем и КА в целом);

– испытания по подтверждению требуемых уровней стойкости к внешним воздействующим факторам (на уровне составных частей приборов и приборов, систем и КА в целом);

– проведение ресурсных испытаний (ускоренных) и испытаний на сохраняемость (на уровне приборов);

– испытания по подтверждению электромагнитной совместимости аппаратуры (на уровне приборов, систем и КА в целом);

– имитация работы в реальных условиях (на уровне приборов, систем и КА в целом);

– отработка возникновения внештатных ситуаций (на уровне приборов, систем и КА в целом).

На этапе летных испытаний должны быть проведены проверки штатного функционирования (на уровне систем и КА в целом).

Контрольные точки выполнения мероприятий по обеспечению надежности:

– этап разработки рабочей документации – завершение выпуска РД;

– этап наземной отработки:

а) результаты автономных испытаний приборов;

б) результаты испытаний приборов в составе системы;

в) результаты автономных испытаний системы;

г) результаты испытаний системы в составе КА;

д) готовность КА к лётным испытаниям;

– этап лётных испытаний.

Условия перехода между этапами (допуск к переходу к следующему этапу) реализации мероприятий по обеспечению надежности:

– этап разработки рабочей документации – положительные результаты расчетов и анализов с рекомендациями по экспериментальному подтверждению предъявляемых требований;

– этап наземной отработки – положительные результаты всех видов наземных испытаний. Выпуск итогового отчета по результатам испытаний с заключением о готовности КА к лётным испытаниям;

– этап лётных испытаний – выпуск отчета по результатам лётных испытаний.

Библиографические ссылки

1. Матюшев Р. А., Патраев В. Е., Кочура С. Г. Вопросы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования // Решетневские чтения. 2009. С. 27–28.
2. Кирилин А. Н., Куренков В. И., Стратилатов Н. Р. Влияние надежности бортовых систем космических аппаратов дзз на показатели периодичности съёмки // Вестник Самар. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. С. П. Королева (нац. исслед. ун-та). 2013. № 4.
3. Золотов А. А., Титов М. И. Обеспечение надежности транспортных аппаратов космических систем. М. : Машиностроение, 1988. 215 с.
4. Севастьянов Н. Н., Андреев А. И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации : учеб. пособие. Томск : Изд. дом Томск. гос. ун-та, 2015. 266 с.
5. Максимов Ю. В., Патраев В. Е., Тололо В. А. Модель надежности космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2005. С. 144–147.

© Капитонов А. А., Козлов С. И., 2019

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЛЕРА НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА В СРЕДЕ MATLAB

А. А. Дружинин, А. В. Пучков, А. В. Иванов

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Sandru95@icloud.com

Описана проблематика проведения испытаний сложной аппаратуры и нахождения дефектов аппаратуры в ходе испытаний. Предложен испытательный тестовый комплекс на основе математического пакета Matlab и контроллера нечеткого вывода. Приведен пример приложения такого комплекса в сфере испытаний и находжений неисправностей электропривода.

Ключевые слова: испытательный тестовый комплекс, экспертное заключение, цифровая обработка сигналов, контроллер нечеткого вывода, электропривод.

Введение

Любая проектируемая, производимая аппаратура в целом, так и составные узлы аппаратуры нуждаются в испытаниях для подтверждения или опровержения характеристик, заложенных при проектировании, а также для нахождения ошибок и неисправностей в готовом устройстве. Одним из возможных способов проведения подобных испытаний является сравнение различных сигналов и характеристик, характеризующих работу прибора с их эталонными аналогами, задаваемыми при проектировании.

Испытательная работа по выдаче заключения о правильности работы устройства, а также нахождение неисправности в устройстве может выполняться инженером или группой инженеров, являющихся специалистами в соответствующей области. Однако современные устройства имеют множество различных характеристик и сигналов, характеризующих их работу, а также множество возможных неисправностей, в связи с чем, значительно возрастает сложность и время проведения подобной работы. В результате, появляется необходимость в быстрых автоматизированных тестах, целью которых является сделать заключение об общем соответствии характеристик устройства заданным при проектировании, а также выявить ряд причин возможных неисправностей при несоответствии характеристик. В данной работе изложены основные идеи и принципы функционирования испытательного тестового комплекса, способного выполнять следующие задачи:

- сбор данных об устройстве;
- цифровая обработка данных;
- выдача экспертного заключения.

Состав и принципы работы испытательного тестового комплекса

Исходя из задач предлагаемого испытательного комплекса, он должен состоять из следующих функциональных узлов:

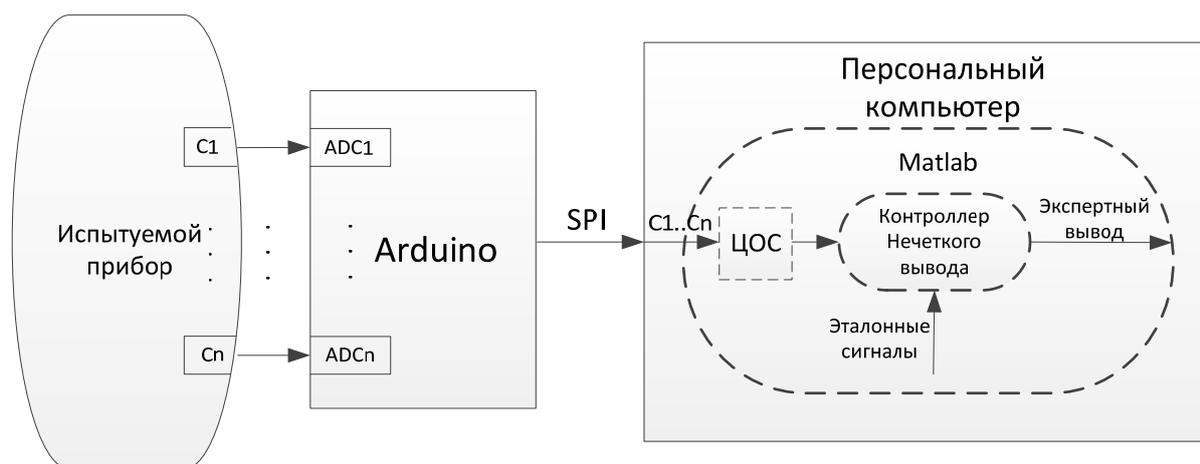
1. Устройство сбора данных. Данный узел предлагается выполнить на основе АЦП микроконтроллера. Микроконтроллер позволяет также хранить и передавать данные. Выбор был остановлен на платформе Arduino на базе микроконтроллера Atmega.

2. Устройство обработки сигналов. В качестве устройства обработки сигналов выбран персональный компьютер. На сегодняшний день существует множество пакетов программ, позволяющих выполнять обработку сигнала по различным алгоритмам, но наиболее мощным инструментом в этой области, который бы позволил также отслеживать изменение сигнала на каждом этапе алгоритма и получать его визуализацию в виде графика является пакет Matlab, который и был выбран для испытательного тестового комплекса.

3. Устройство выдачи заключения. Ключевой задачей является выдача заключения о работе устройства и причинах возможных неисправностей на основе собранной информации об устройстве и эталонных сигналах. Для инженера эта задача является тривиальной, так как он может оценить на основе опыта и знаний отклонение величин сигналов разработанного устройства от эталонных и связать это с работоспособностью устройства и причинами возможных неисправностей. Он может дать экспертную оценку. На сегодняшний день уже существуют методы и алгоритмы, которые могут имитировать принятия экспертных решений, это контроллеры нечеткого вывода, основанные на нечеткой логике [1].

Было принято решение выполнить описанную задачу при помощи контроллера нечеткого вывода, разработанного в среде Matlab приложением Fuzzy logic toolbox.

Таким образом, функциональная схема испытательного тестового комплекса представлена на рисунке.



Функциональная схема испытательного тестового комплекса

Сплошной линией обозначена аппаратная часть, пунктирной линией обозначена программная часть.

Сигналы $C_1 \dots C_n$ испытуемого прибора оцифровываются $ADC_1 \dots ADC_n$ АЦП платформы Arduino и передаются посредством SPI интерфейса на персональный компьютер в среду математического моделирования Matlab где есть специализированный пакет для работы с платформой Arduino. Полученные данные проходят необходимую цифровую обработку сигнала (ЦОС) и подаются в контроллер нечеткого вывода, как и эталонные сигналы. Контроллер нечеткого вывода выдает экспертное заключение о соответствии прибора проектируемому, и о причинах возможной неисправности.

Область применения испытательного тестового комплекса

Комплекс диагностики на основе среды моделирования МАТЛАБ можно использовать в качестве поиска неисправностей электропривода. Обнаружение дефектов

в работающем электродвигателе на ранней стадии значительно снизит расходы на ремонт электродвигателя и увеличит срок его службы.

В последнее время широко развиваются методы диагностики, основанные на измерении потребляемого тока, с последующим выполнением спектрального анализа полученного сигнала [2]. Это позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов двигателя. Физический принцип, положенный в основу этого метода заключается в изменении магнитного потока в зазоре электрической машины при возмущении электрической и/или механической части электродвигателя и связанного с ним устройства. А изменение магнитного потока влечет за собой изменение потребляемого тока. Частотный спектр потребляемого тока помогает выявить частоты, на которых происходило изменение, после чего с большой долей вероятности можно классифицировать вид возникшей неисправности.

При помощи спектрального анализа обнаруживаются короткие замыкания того или иного количества фаз статора, неправильные связи обмоток двигателя, поломки стержней ротора или торцевых колец, неисправности воздушного зазора в двигателе, и отказы редуктора или подшипников. Все вышеупомянутые дефекты возникают в связи со скачками напряжения воздушного зазора и тока в двигателе.

Недостатки спектрального анализа:

- возможность получения неверных результатов из-за появления ложных гармоник сигнала при различных помехах электрической сети с подключенным к ней ЭД;
- сложность обработки и анализа результатов измерений.

Применение рассмотренного в статье комплекса диагностики, инструментов частотного анализа и нечеткой логики MATLAB SIMULINK может решить приведенные недостатки. Методы нечеткой логики [3] позволят сформировать условия, при помощи которых можно с легкостью оценить и обработать результаты спектрального анализа. Условия будут определяться на основе опыта эксперта. Нечеткая логика дает возможность эффективно определять причину и виды повреждения электродвигателей, ЦОС позволяет работать с зашумленными данными, избавляя от необходимости применения промежуточных электронных фильтров от помех.

Таким образом, дальнейшее исследование заключается в тестировании и моделировании комплекса диагностики с применением новых решений, которые позволят улучшить сферу диагностики электропривода и решить выявленные проблемы.

Библиографические ссылки

1. Заде Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. М. : Знание, 1974. 49 с.
2. Петухов В., Соколов В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1.
3. Altug S., Mo-Yuen C., Joel Trussell H. Fuzzy Inference Systems Implemented on Neural Architectures for Motor Fault Detection and Diagnosis // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1999. Vol. 46, № 6.

© Дружинин А. А., Пучков А. В., Иванов А. В., 2019

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ ПРОВЕДЕНИЮ ИСПЫТАНИЙ

В. Г. Сидоров

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

Рассматривается применение платформы Arduino и функции программного обеспечения для испытания и диагностики изделий.

Ключевые слова: Arduino, проведение испытаний, прототипирование.

За последнее время список профессий сократился процентов на 15-20, а информационные технологии позволили сократить количество сотрудников средней компании более чем на четверть. Компьютеры – это будущее, которое настало. Но для создания светлого будущего они должны работать без сбоев. За это отвечают IT-специалисты. В круг их задач, в том числе входит поддержание работоспособности программного обеспечения (ПО) и автоматизированных систем.

Как правило, IT-специалистов готовят специализированные учебные заведения, в которых они изучают предметы и дисциплины направленные на формирование компетенций связанных с работой в IT-индустрии. Студенты получают как теоретическую основу, так и практические навыки создания программных продуктов. Однако компетенции осваиваемые студентами, обучающимися по направлению подготовки «Информатика и вычислительная техника» востребованы и другими направлениями, связанными с техническими отраслями промышленности. Студенты смежных направлений и специальностей занимаются также создание программных продуктов для функционирования различного рода устройств и систем, построенных с применением современных микроконтроллеров, микропроцессоров и т. п. устройств. Однако, как правильно заниматься созданием, отладкой и испытанием программных продуктов, а также знакомиться с другими этапами цикла разработки программного обеспечения – студентам соседних направлений и специальностей приходится самостоятельно [1].

Рассмотрим один из этапов цикла разработки программного обеспечения – этап испытания программы управления механизмом ориентации на источник излучения (рис. 1).

Специалисты, занимающиеся разработкой программных продуктов, после формирования технического предложения и разработки эскизного и технического проектов подходят к стадии, в которой необходимо четко определить, как будет решаться вопрос о соответствии разработанного программного обеспечения и системы в целом – всем требованиям, описанным в проектной документации. Как будет определяться степень ее надежности, а также, уровень соответствия ПО и системы своему назначению. Для этого при проведении испытаний применяется документ «Программа и методика испытаний» [2; 3].

Разрабатываемые студентами программные продукты, как правило, применяются в небольших проектах и имеют небольшое количество показателей и критериев оценивания. Для проведения испытаний управления механизмом ориентации на источник излучения создана программа на базе LabVIEW проверки сопряжения аппаратной

части с компьютером. Аппаратная часть выполнена на базе платформы Arduino. Простота использования, доступность и ряд других факторов позволяют широко использовать данную платформу для прототипирования различного рода систем. Фрагмент передней панели данной программы приведен на рис. 2.

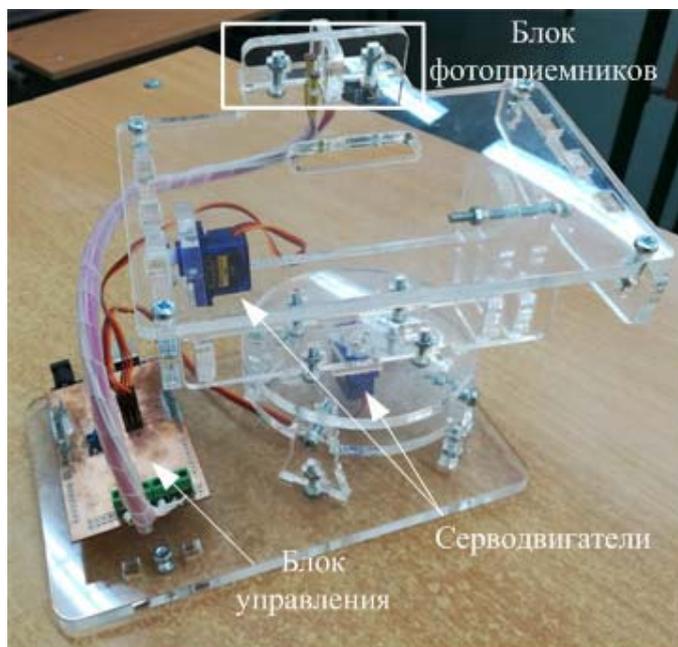


Рис. 1. Система ориентации на источник излучения света

На передней панели расположены элементы сопряжения платформы и периферийных устройств (датчиков блока фотоприемников и сервоприводов), а также элементы контроля и управления механизмами. Созданная программа выполняет следующие функции:

- выбор порта подключения платформы Arduino;
- установка портов подключения периферийных устройств;
- отображение поступающей информации с фотоприемников;
- управление углами поворота сервоприводов.

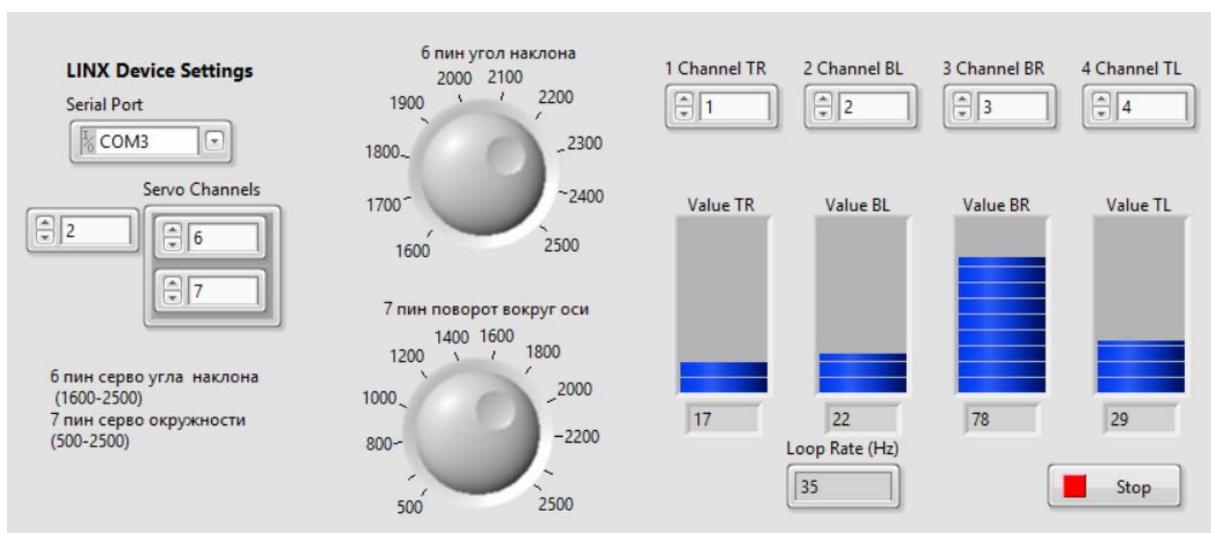


Рис. 2. Фрагмент панели программы для проведения испытаний

После подключения и настройки, программа позволяет в режиме реального времени отслеживать данные поступающие с фотоприемников и передаваемые на сервоприводы, тем самым диагностируя состояние системы ориентации. Пользователь проводит проверку соответствия освещенного фотоприемника с указанным в программе, проверяет углы поворота вертикально и горизонтально установленных сервоприводов, фиксирует полученные результаты.

На данный момент, ведется доработка и отладка работы программы проведения испытаний, вводятся дополнительные модули. Разрабатываются аналогичные программы на базе платформы Arduino для других систем и устройств [1].

Библиографические ссылки

1. Сидоров В. Г., Ткачева Т. В., Шкловец М. А. Автоматизированный лабораторный комплекс // Решетневские чтения : материалы XX Юбил. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генер. конструктор. ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева (09–12 ноября 2016 г., Красноярск) : в 2 ч. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Ч. 2. С. 539–541.

2. ГОСТ 19.301–79 ЕСПД. Программа и методика испытаний. М. : Изд-во стандартов, 1979. 3 с.

3. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1982. 24 с.

© Сидоров В. Г., 2019

УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ДУГООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Н. В. Штабель, Л. А. Самотик, Е. А. Мизрах

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

Рассмотрены причины дугообразования при испытаниях и эксплуатации системы электропитания космического аппарата, современные методы определения дугообразования, защитные устройства и стандарты, обеспечивающие защиту от возникновения дуги в сетях постоянного тока.

Ключевые слова: дугообразование, наземные испытания, система электропитания, сопротивление изоляции, устройство защиты, солнечная энергетика, искрение

Характерным трендом развития систем электропитания космических аппаратов (СЭП КА) в последние 20 лет является повышение номинального выходного напряжения, которое в настоящее время в большинстве случаев составляет 100 В [1]. Повышение напряжения СЭП влечет за собой применение высоковольтных аккумуляторных батарей (АБ) и солнечных батарей (СБ), что, в свою очередь, приводит к появлению большого числа точек с высоким потенциалом относительно шины «минус» СЭП.

Особенностью современных СЭП КА является связь шины «минус» с корпусом СЭП. Подключение шины «минус» к корпусу позволяет устранить разность потенциалов между корпусом КА и токоведущими шинами СЭП. Это особенно критично при нахождении спутника на орбите, где на корпусе КА возможно накопление потенциала с последующим пробоем сопротивления изоляции токоведущих шин и элементов СЭП. В ходе наземных испытаний шина «минус» также присоединяется к корпусу СЭП, при этом появление любой несанкционированной связи между токоведущими элементами СЭП с плюсовым потенциалом и корпусом вызывает появление токов утечки, короткого замыкания или дугового разряда.

При нахождении КА на орбите периодически могут возникать разряды между диэлектрическими поверхностями КА и корпусом, в частности эта проблема характерна для солнечных панелей. Для отработки влияния разрядов на аппаратуру и работу СЭП КА в ходе наземных испытаний производятся тестовые разряды высоким напряжением на корпус СЭП, что также может повлечь за собой пробой элементов СЭП или изоляции и последующее возникновение дугового разряда.

Все вышеперечисленные проблемы могут существенно осложнить и замедлить проведение наземных испытаний СЭП КА и даже привести к отказу различных подсистем СЭП КА. Для недопущения возникновения отказов в настоящее время применяются следующие конструктивные методы:

- двойная изоляция плюсовых проводников;
- соблюдение необходимых зазоров в монтажной схеме СЭП;
- герметизация ЭРИ, отказ которых может сопровождаться разрушением и созданием ионизированного облака (предохранители, конденсаторы);
- появление в составе КА блоков защиты (БЗ) от КЗ в кабельной сети.

Также применяются методические меры, которые призваны снизить вероятность отказов:

- демонтаж связи между шиной «минус» и корпусом КА при любых сборочных работах и работах, связанных с переборкой электрической схемы испытаний;
- обеспечение разрыва кабельной сети (КС) в плюсовых и минусовых силовых цепях АБ, установленных на КА, при работе КА от АБ;
- контроль сопротивления изоляции после сборочных работ, перед началом испытаний и периодически (с разрывом перемычки с корпусом) во время испытаний;
- введение в практику вакуумных испытаний проверку на наличие/отсутствия в приборах коронного разряда.

В настоящее время на рабочих местах испытаний СЭП КА используются различные защитные устройства, призванные обеспечить защиту оборудования от снижения сопротивления изоляции [2] или КЗ на корпус.

В частности, на рабочем месте для лабораторно-отрабочных испытаний СЭП КА применяется устройство контроля сопротивления изоляции УКИЗ, которое обеспечивает контроль изоляции каждой из линий СЭП КА в диапазоне 1...1000 кОм, что позволяет предупредить оператора при возникновении токов утечки с плюсовых шин на корпус. Также в состав УКИЗ входит прерыватель тока короткого замыкания [3], который обеспечивает быстродействующую защиту (менее 20 мкс) при замыкании любой из плюсовых шин СЭП КА на корпус.

Однако применяемые устройства ограниченно пригодны для определения дугообразования. Так, УКИЗ с ПТКЗ имеет возможность определить дугообразование с плюсовой шины СЭП КА на корпус, так как этот случай практически эквивалентен снижению сопротивления изоляции и сопровождается протеканием токов большой величины в корпус СЭП. В то же время случай дугообразования непосредственно между плюсовой и минусовой шинами СЭП (на линиях СБ, АБ, выходной шине СЭП) остается неохваченным и не поддается измерению имеющимися в УКИЗ датчиками, так как в этом случае ток дуги протекает по тому же пути, что и ток штатной нагрузки линии, и задача различения нормальной работы линии и горения дуги в этом случае требует дополнительного анализа и аппаратного обеспечения.

В настоящее время в мире активно внедряется использование устройств защиты от дугообразования в сетях постоянного тока для систем солнечной энергетики. Это связано с повышенным риском образования дуги как в солнечных панелях, так и в инверторах, преобразующих постоянный ток СБ в пригодный для бытового применения переменный ток. В США требование использования устройств защиты от дугового пробоя (УЗДП) началось в 2014 году, а в западной Европе в 2012 году, также активно ведется издание стандартов, позволяющих регулировать и унифицировать все подобные устройства, их функционал и методики испытаний [4; 5]. Это связано с ростом выработки солнечной энергии и увеличением количества случаев пожаров, связанных с искрением и дугообразованием.

Определение дугообразования представляет из себя сложный процесс, требующий большого количества вычислений. Подавляющее большинство методов определения дугообразования основывается на анализе токопотребления защищаемой линии. Анализ может осуществляться:

- во временной области (нетребовательный к вычислительной мощности, дает большое количество ложных срабатываний);
- в частотной области (требует сложных вычислений, широко исследован, наиболее часто применяется);
- с помощью искусственного интеллекта и нечеткой логики (нет разработанных методик, плохо изучены).

Среди приведенных методов на текущий момент наиболее актуален метод исследования сигнала датчика тока в частотной области, который основан на особенностях горения дуги, которая представляет из себя случайный процесс с достаточно равномер-

ным распределением энергии в частотной области 1...100 кГц. Измерение спектральной плотности в данном диапазоне частот позволяет с достаточной достоверностью определить факт горения дуги на линии.

Наибольшую сложность представляет из себя защита от ложных срабатываний, так как на спектр сигнала помимо дуги могут оказывать влияние и другие процессы, такие как резкое уменьшение мощности нагрузки, резкий наброс (увеличение) мощности нагрузки, емкостная связь между инверторами разных производителей, шум на линии от DC/DC преобразователей, шумы по постоянному току от безтрансформаторных инверторов.

Все вышеперечисленные случаи характеризуются выбросами на спектре и в зависимости от алгоритма обработки сигнала в устройстве защиты могут вызвать ложное срабатывание, что подтверждается проведенными исследованиями на соответствие стандартам [6]. Ошибки работы устройств могут иметь различный характер, а именно ложные срабатывания, несрабатывание в некоторых случаях возникновения дуги, некорректная работа при наличии инверторов на линии.

Проведенный анализ показывает, что создание устройства защиты от дугообразования для применения при испытаниях СЭП КА актуально и имеет широкую теоретическую базу, однако для надежной защиты и отсутствия ложных срабатываний необходимо проведение исследований с различными типами СЭП и нагрузок. Применение устройства защиты от дугообразования позволит исключить появление аварийных ситуаций и выхода испытываемого оборудования из строя. Также устройство защиты от дугообразования может применяться в смежных отраслях техники, в частности в автомобилях и системах солнечной энергетики.

Библиографические ссылки

1. Мизрах Е. А., Пойманов Д. Н., Балакирев Р. В., Ткачѳв С. Б. Автоматизированная система имитации электрических характеристик систем электропитания космических аппаратов [Электронный ресурс] // Вестник СибГАУ. 2016. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannaya-sistema-imitatsii-elektricheskikh-harakteristik-sistem-elektropitaniya-kosmicheskikh-apparatov> (дата обращения: 04.02.2019).

2. Штабель Н. В., Мизрах Е. А., Ушаков А. В. Система контроля токов утечки и сопротивления изоляции для системы электропитания космического аппарата [Электронный ресурс] // Решетневские чтения. 2016. № 20. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-kontrolya-tokov-utechki-i-soprotivleniya-izolyatsii-dlya-sistemy-elektropitaniya-kosmicheskogo-apparata> (дата обращения: 04.03.2019).

3. Фоос Р. Л., Штабель Н. В. Экспериментальное исследование макета прерывателя тока короткого замыкания для сетей постоянного тока [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-maketa-preryvatelya-toka-korotkogo-zamykaniya-dlya-setey-postoyannogo-toka1-3> (дата обращения: 04.03.2019).

4. UL 1699. Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters [Электронный ресурс]. URL: https://standardscatalog.ul.com/standards/en/standard_1699_3 (дата обращения: 01.02.2019).

5. ARTICLE 690 Solar Photovoltaic (PV) Systems [Электронный ресурс]. URL: http://www.energy.gov/bb/web/component/docman/doc_download/71-article-690-solar-photovoltaic-pv-systems (дата обращения: 01.02.2019).

6. Arc-fault unwanted tripping survey with UL 1699B-listed products [Электронный ресурс]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7356427&isnumber=7355590> (дата обращения: 01.02.2019).

© Штабель Н.В., Самотик Л.А., Мизрах Е.А. 2019

РАЗРАБОТКА ПРИБОРА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

В. Д. Дерябкин, Е. М. Мекаева
Научный руководитель – Г. М. Гринберг

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

Рассмотрено место и значение бортовой кабельной сети в составе летательного аппарата, значение проведения тестирования изготовленных кабелей и характеристики выпускаемого в настоящее время для этих целей оборудования. Предложено свое решение прибора для тестирования изготовленных кабелей.

Ключевые слова: бортовая кабельная сеть, тестирование кабелей, прибор для тестирования.

Любой летательный аппарат (ракета, космический аппарат, самолет, вертолет и др.) в своем составе имеет бортовое оборудование, представляющее собой «совокупность агрегатов, приборов, машин, систем, комплексов и других технических средств, устанавливаемых на борту летательного аппарата (ЛА) для обеспечения управляемого полёта, жизнедеятельности экипажа и пассажиров, решения целевых задач в соответствии с назначением ЛА. Бортовое оборудование служит для измерения, преобразования, передачи, обработки информации, её отображения на индикаторах, управления ЛА и его системами, контроля за состоянием ЛА и параметрами его движения, связи экипажа с наземными системами и другими ЛА» [1].

Усложнение ЛА приводит к увеличению имеющегося на его борту количества электронных устройств, средств связи, навигации, автоматизированных систем, внедрение цифровых электронных систем управления, что, в свою очередь, приводит к усложнению бортовых кабельных сетей ЛА, являющихся «совокупностью кабелей, предназначенных для объединения приборов в единую систему, обеспечивающую выполнение посредством применения изделия поставленных задач в заданных условиях» [2].

Кабельная сеть состоит из кабелей – «электрических устройств, изготовленных любым способом (набранных из проводов или кабелей), имеющих на концах устройство для подключения к приборам [2].

В настоящее время при создании аэрокосмической техники главной «ахиллесовой пятой» остается кабельная система. От качества кабелей и кабельной сети зависит надежность работы бортовых электронных систем. Поэтому после завершения процесса изготовления кабелей они подвергается обязательному электрическому контролю на предмет корректности выполнения соединений.

Проверка и приемка готовой кабельной продукции осуществляется с помощью специальных приборов и на специальном оборудовании. При производстве демонстрационных образцов готовые кабели могут быть проверены подручными средствами, например, мультиметром. Однако при производстве более значительных объемов продукции уже требуются автоматизированные средства тестирования.

На текущий момент на рынке представлено множество различных устройств проверки кабелей с разнообразными функциональными возможностями и в различном ценовом диапазоне [3]. Такие устройства, начиная от портативных тестеров заканчивая специальными стендами, существенно ускоряют проведение таких работ.

Рассматривая функциональные возможности предлагаемого на рынке проверочного оборудования, можно заметить, что он избыточен для многих целевых задач, поскольку такое оборудование рассчитано на работу в широком диапазоне узкоспециализированных задач (например, проверка кабельных сетей, содержащих в себе силовые компоненты, радиоантенны, цифровые цепи в виде дифференциальных пар, различные экраны). А в портативных моделях отсутствуют такие важные функции как тестирования логических цепей по шаблону, возможность тестирования кабелей с количеством разъемов более двух, а также отсутствие опции составления программы контроля процесса тестирования.

В результате проведенного анализа авторами было принято решение о разработке собственного прибора для тестирования соединительных кабелей, основными достоинствами которого были бы:

- низкая цена;
- возможность проверять цифровые кабельные сети, включающие в себя до 50 контактов на электрический соединитель;
- возможность проверять цепи, имеющие до 10 дифференциальных пар;
- возможность проверять кабели, имеющие до 10 электрических соединителей;
- возможность установки испытателем требуемой схемы кабеля и вводить необходимую программу тестирования из имеющегося перечня.

В качестве основы прибора был выбран микроконтроллер stm32f405rgt6. Прибор имеет 10 стандартных разъемов MP-50, к каждому из которых может подключаться кабель-переходник, позволяющий задействовать только требуемый функционал. Схема проверяемого кабеля считывается с подключаемых к прибору карт памяти. Число схем проверяемых кабелей в зависимости от их сложности в одной карте памяти может достигать нескольких сотен.

Схемы проверяемых кабелей подготавливаются в отдельном редакторе и загружаются в карту памяти, как готовое решение. В самом редакторе имеется система детектирования ошибок разрабатываемого кабеля. Схема кабеля описывается языком на основе XML, что позволяет редактировать разрабатываемую схему без помощи дополнительных средств. По окончании проведения тестирования имеется возможность посмотреть результат на имеющемся для этого на приборе дисплее, а также сохранить результат тестирования на карту памяти для дальнейшей обработки и использования.

В качестве проверяемых интерфейсов поддерживается CAN, RS485, RS232, интерфейсы на основе TTL логики (SPI, i2C). Параметры данных интерфейсов также настраиваются. Имеется возможность задавать комбинационные тесты с использованием выбранных интерфейсов. Помимо интерфейсов поддерживается возможность проверки цепей питания до 36 вольт. Для этой цели в устройстве предусмотрен DC-DC преобразователь с выходным напряжением от 5 до 36 вольт.

Таким образом, разработанный прибор имеет необходимый набор опций для тестирования кабелей. Дополнительно имеется возможность полнофункционального тестирования цифровых цепей и цепей низковольтного питания (до 36 вольт).

Библиографические ссылки

1. Авиация: Энциклопедия / гл. ред. Г. П. Свищев / Центр. аэрогидродинам. ин-т им. Н. Е. Жуковского. М. : Больш. рос. энцикл., 1994. 736 с.

2. ГОСТ Р 56530–2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Совместимость космической техники электромагнитная. Общие требования к бортовой кабельной сети космической техники. М. : Стандартинформ, 2016. 11 с.

3. Тесты тестеров. Изменения на российском рынке тестеров проводного монтажа жгутов и кабелей [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dipaul.ru/pressroom/testy-testerov-perezagruzka/> (дата обращения: 11.03.2019).

© Дерябкин В. Д., Мекаева Е. М., 2019

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Е. В. Пашенко, Т. Г. Орешенко

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

Рассмотрены основные проблемы, возникающие при проведении испытаний турбо-насосных агрегатов, а также методы испытаний и их действенность с учетом объема выпускаемой партии оборудования.

Ключевые слова: испытания, турбонасосный агрегат, отказы, контроль качества.

Серийное производство ТНА – сложный процесс, в котором наряду с производственно-технологическими действуют морально-психологические и другие факторы. Техничко-экономический прогресс и культура производства – основные показатели качества товарной продукции. С учетом этого бесспорным является факт, что качество и надежность изделий зависят не только от степени их конструктивного совершенства, завершенности стендовой отработки, но не в меньшей мере от качества и стабильности технологических процессов изготовления, внедрения передовых методов производства, управления, текущего, поэтапного, предупредительного и приемо-сдаточного контроля.

Каждый этап серийного производства характеризуется проведением соответствующих испытаний на основе физических и статистических методов выборочного и сплошного видов контроля.

Статистические исследования [1] показали, что при стендовых испытаниях ТНА в целом ряде случаев отказы объясняются технологическими факторами. Их удельный вес составляет около 30% от общего числа неблагоприятных исходов. Причем названную цифру в некотором роде следует считать условной, так как при анализе причин аварийного состояния не всегда можно четко разделить отказы на конструктивные, производственные и эксплуатационные. Особенно это относится к случаям, когда причины однозначно не установлены или объясняются как следствие нескольких гипотез.

Если отказ объясняется только производственными причинами и произошел в пределах допусков, установленных технической документацией, он может объясняться лишь ее несовершенством. Такие отказы считают обусловленными технологическими факторами первого рода. В отличие от них существуют технологические факторы второго рода, обусловленные отступлениями от производственных процессов, в ряде случаев они объясняются грубыми его нарушениями. Технологические факторы второго рода зависят от случайных причин. Процесс их появления хаотический.

Технологические факторы первого рода практически неотделимы от конструкции. Поэтому связанные с ними вопросы обеспечения высоких уровней надежности зависят от степени завершенности конструкторской отработки изделия и технической документации, от степени отлаженности производства. Если технологические факторы первого рода присущи конструкции и документации, то факторы второго рода характеризуют лишь конкретное производство. Естественно, в этих условиях могут быть определены конкретные меры, не допускающие или снижающие вероятность появления брака и тем самым обеспечивающие высокий уровень качества. В целом это может быть достигнуто

отсутствием брака среди товарных изделий, с одной стороны, и благодаря стабильности основных параметров, с другой. Последнее чаще всего объясняется технологическими факторами первого рода.

В промышленности применяется целый ряд физических и статистических методов контроля качества изготовления деталей, контроля герметичности полостей и соединений [2; 3]. К физическим методам относятся ферромагнитный, люминесцентный, цветная дефектоскопия, просвечивание рентгеновскими и гамма-лучами, ультразвуковой и, наконец, визуальный осмотр деталей специальными оптическими и осветительными приборами. Указанные методы позволяют проверять качество изготовления деталей без их разрушения и способствуют выявлению скрытых дефектов, связанных с нарушением поверхностей и внутренней сплошности металлов. Каждый метод имеет свои особенности, определяющие область его применения. Так, например, ферромагнитный метод может применяться только для контроля качества деталей, изготовленных из ферромагнитных сплавов. Наиболее универсальным в этом отношении может быть назван метод рентгеновского контроля, с помощью которого проверяется качество сварных швов, оболочек, сплошность литых корпусов и т. п.

Контроль герметичности замкнутых объемов может осуществляться методами погружения емкостей, находящихся под давлением, в ванну с водой; обмыливанием стыков; газовыми течеискателями и т. п.

В процессе серийного производства физические методы неразрушающих видов контроля позволяют получать основной объем информации о качестве товарных изделий. Этим методам подвергаются не только отдельные элементы, но и системы.

Несмотря на всю их действенность, методы физического контроля все же являются косвенными. Они не исключают и не могут заменить типовые испытания по проверке работоспособности и оценке стабильности основных параметров. Как показывает опыт, наиболее действенным был и остается сплошной контроль, остальные виды по эффективности лишь в разной мере могут к нему приближаться. Как следует из статистического анализа, для мелкосерийного изготовления, которое существует в ракетной и космической технике, методы выборочного контроля не всегда действенны. В случае малых партий отсутствуют статистически обоснованные планы и объемы выборки.

Библиографические ссылки

1. Яременко О. В. Испытания насосов. М. : Машиностроение, 1976.
2. Яцуненко В. Г., Назаров В. П., Коломенцев А. И. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т ; Моск. авиац. ин-т. Красноярск, 2016. 248 с.
3. Назаров В. П., Назарова Л. П., Краев М. В. Технология сборки и испытаний насосов жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / под общ. ред. проф. М. В. Краева ; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1993. 102 с.

© Пащенко Е. В., Орешенко Т. Г., 2019

УДК 629.78

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Д. В. Метелкин, А. С. Белых
Научный руководитель – М. Д. Евтифьев

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

На материалах из открытых источников исследуется ультразвуковой метод контроля, в применении его для ракетно-космических изделий на современном уровне контроля.

Ключевые слова: контроль, качество, ультразвуковой метод контроля, ракетно-космическая техника, преобразователи, дефекты, ультразвук, изделия, методы, неразрушающий контроль.

Ультразвуковая дефектоскопия – метод, предложенный С. Я. Соколовым в 1928 году и основанный на исследовании процесса распространения ультразвуковых колебаний с частотой 0,5–25 МГц в контролируемых изделиях с помощью специального оборудования – ультразвукового преобразователя и дефектоскопа [1]. Является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля.

Методы ультразвуковой дефектоскопии позволяют производить контроль сварных соединений, баков высокого давления, трубопроводов, топливных магистралей. В настоящее время ультразвуковой контроль является обязательной процедурой при изготовлении и эксплуатации многих ответственных изделий.

Методы ультразвукового контроля подразделяют на две группы: методы, основанные на излучении в контролируемое изделие волн от внешнего источника и их приеме, и методы, основанные на приеме упругих волн, возникающих в самом контролируемом изделии. Методы первой группы называют активными, второй – пассивными.

Эхоимпульсный метод (метод эхолокации) заключается в прозвучивании изделия короткими импульсами ультразвуковых колебаний и регистрации эхосигналов, отраженных от дефекта и идущих к приемнику. Признаком дефекта является появление эхосигнала на экране дефектоскопа. При этом чем больше дефект, тем больше амплитуда эхосигнала. Этот метод наиболее широко распространен из-за простоты реализации, возможности одностороннего доступа к изделию, независимости результатов контроля от конфигурации и состояния противоположной (донной) поверхности, а также из-за высокой точности в определении координат дефектов. Основным недостатком метода является наличие значительной «мертвой» зоны в металле под пьезоэлектрический преобразователь.

Теневой метод реализуется путем сквозного прохождения ультразвука через изделие. При этом используют два соосно размещенных пьезоэлектрических преобразо-

вателя, а о наличии дефектов судят по пропаданию или уменьшению амплитуды сквозного сигнала. Чем больше размер дефекта, тем меньше амплитуда прошедшего сигнала. Недостатками метода являются необходимость двустороннего доступа к изделию, использование сложной механической системы соосного фиксирования пьезоэлектрического преобразователя и низкая чувствительность. К преимуществам следует отнести слабую зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта, высокую помехоустойчивость и отсутствие «мертвой» зоны.

Зеркально-теневой метод является комбинацией описанных методов. В нем используют один пьезоэлектрический преобразователь или два, но размещенные на одной поверхности изделия. О наличии дефекта судят по ослаблению или пропаданию донного сигнала. Метод имеет следующие варианты реализации: с одним прямым пьезоэлектрическим преобразователем и регистрацией первого донного сигнала продольной волны; то же, но с регистрацией второго донного сигнала продольной волны; двумя наклонными пьезоэлектрическими преобразователями с регистрацией донного сигнала продольной или поперечной волны. Метод практически не имеет «мертвой» зоны, но применим только для изделий с эквидистантными поверхностями, его чувствительность зависит от состояния донной поверхности.

Эхосквозной метод (разновидность теневого метода) используют только при контроле листов и труб, для которых характерны полупрозрачные для ультразвуковых колебаний дефекты. При этом методе регистрируется сигнал, прошедший от излучателя через дефект и последовательно отраженный от противоположной (донной) поверхности изделия и дефекта и принятый приемником. Этот метод обладает высокой чувствительностью и помехоустойчивостью.

Эхозеркальный метод, реализуется с помощью двух наклонных пьезоэлектрических преобразователей, размещенных на одной поверхности изделия с одной стороны от дефекта так, что сигнал от одного пьезоэлектрического преобразователя зеркально отражается от дефекта и донной поверхности и принимается вторым пьезоэлектрическим преобразователем. Оба пьезоэлектрических преобразователя электрически соединены параллельно, что позволяет принимать как зеркальный, дважды переотраженный сигнал, так и обратно отраженные сигналы, а также определять тип вертикально ориентированных дефектов по их соотношению.

Дельта-метод основан на регистрации трансформированных на дефекте падающих на него поперечных волн от наклонного пьезоэлектрического преобразователя. Обычно регистрируют трансформированную продольную волну, а пьезоэлектрический преобразователь размещают на поверхности изделия над дефектом. Наибольшая чувствительность метода обеспечивается при угле ввода равным $57-59^\circ$. В этом случае угол падения на дефект близок к третьему критическому и коэффициент трансформации поперечной волны наибольший. Установлено, что чувствительность метода слабо зависит от азимутальной и вертикальной ориентации дефекта.

Импедансный метод предназначен для определения качества припайки или приклейки тонкостенной металлической или пластмассовой обшивки к твердой подложке и основан на анализе режима колебаний стержня (с пьезоэлементом), опирающегося на поверхность изделия. При наличии дефекта акустический импеданс данного участка поверхности уменьшается, что приводит к увеличению амплитуды колебаний стержня, уменьшению механического напряжения на его конце, изменению фазы колебаний и смещению частоты резонансных колебаний. Любой из этих признаков свидетельствует о наличии дефекта.

Если первая группа методов предусматривает локальное возбуждение ультразвука, то вторая группа предусматривает возбуждение ультразвука во всем изделии или по всей толщине под излучателем.

Метод свободных колебаний, или спектральный метод, основан на анализе спектра частот собственных колебаний изделия, вибрирующего после удара по нему. Анализ спектра производится или на слух, или с помощью специальной аппаратуры.

Резонансный метод дефектоскопии и толщинометрии основан на возбуждении и анализе резонансных колебаний в исследуемом объеме изделия. По резонансным частотам определяют толщину изделия. На наличие дефекта указывают заниженное по сравнению с номинальным значением толщины, ослабление или исчезновение резонансных пиков на осциллоскопическом индикаторе.

Из пассивных методов акустической дефектоскопии наиболее развиты метод акустической эмиссии и шумовибрационный. При контроле этими методами на изделии в разных местах размещают несколько пьезоприемников.

Метод акустической эмиссии основан на регистрации упругих волн, возникающих в момент образования или развития трещин, например в сосудах высокого давления при гидроиспытаниях. Число сигналов, регистрируемых в единицу времени (интенсивность эмиссии), характеризует интенсивность процесса трещинообразования. По времени прихода сигналов от одного источника к каждому приемнику можно определять координаты трещины.

Шумовибрационный метод позволяет проводить техническую диагностику, например, оценивать работоспособность двигателя, сравнивая спектр сигналов работающего механизма или его элементов с эталонными сигналами. Поскольку ультразвуковые волны в используемом на практике диапазоне частот не проходят через воздух, зазор между преобразователем и контролируемым изделием должен быть заполнен контактной жидкостью.

По способу создания акустического контакта различают следующие акустические методы: контактный, щелевой (менисковый), иммерсионный и бесконтактный.

При контактном способе акустический контакт создается за счет тонкого слоя жидкости или эластичного материала. При щелевом способе толщина слоя жидкости соизмерима с длиной волны, при иммерсионном толщина слоя жидкости во много раз больше длины волны.

Бесконтактный способ ввода ультразвука в изделие с формированием направленных пучков реализуется при использовании специальных электромагнитных акустических преобразователей, возбуждающих упругие колебания непосредственно в самом изделии, или при облучении поверхности изделия короткими импульсами лазерного излучения [2].

Для контроля изделий ракетно-космической техники используют специальные оборудования. В зависимости от области назначения различают ультразвуковые дефектоскопы общего и специального назначения; для ручного и автоматизированного контроля. Дефектоскопы общего назначения могут использоваться для контроля самой разнообразной продукции. Специализированные дефектоскопы создают для решения узкоцелевых задач. [2].

Для надежного обнаружения дефектов дефектоскопы должны иметь минимальную мертвую зону, гарантирующую обнаружение подповерхностных дефектов, высокую чувствительность для обнаружения мелких дефектов, большую глубинность и высокую разрешающую способность для раздельной идентификации двух близко расположенных по лучу дефектов. Дефектоскопы должны обязательно иметь устройства для измерения амплитуды эхосигнала.

Ультразвуковой дефектоскоп, предназначен для генерирования импульсов ультразвуковых колебаний, приема отраженных сигналов, преобразования этих сигналов в вид, удобный для наблюдения их на экране, а также для измерения координат дефектов и сравнения амплитуд сигналов.

Для достоверного контроля дефектоскоп должен обеспечивать следующее: для возбуждения и приема ультразвуковых колебаний используют электроакустические

преобразователи. Различают следующие основные виды преобразователей: прямые, излучающие в контролируемое изделие продольные волны нормально к поверхности, и наклонные, с помощью которых в изделии возбуждаются, нормальные и продольные волны. По конструкции преобразователи подразделяют на поперечные, поверхностные совмещенные, у которых один пьезоэлемент служит излучателем и приемником, и раздельно-совмещенные, имеющие два пьезоэлемента в одном общем корпусе.

В качестве приемно-излучающего элемента – собственно преобразователя – в большинстве случаев используют пьезопластины из керамики, цирконата-титаната свинца или титаната бария, обладающей пьезоэффектом.

Поверхности пьезоэлемента металлизированы и являются электродами. При подаче на них электрического напряжения пластина изменяет свою толщину вследствие так называемого обратного пьезоэлектрического эффекта. Если напряжение знакопеременно, то пластина колеблется в такт этим изменениям, создавая в окружающей среде упругие колебания. При этом пластина работает как излучатель. И, наоборот, если пьезоэлектрическая пластина воспримет импульс давления, то на ее обкладках вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта появятся заряды, величина которых может быть измерена. В этом случае пьезопластина работает как приемник.

Для обеспечения хорошего контакта между ультразвуковым преобразователем и контролируемой поверхностью, а также для предотвращения образования воздушного зазора, создающего помехи звуковому импульсу, необходимо использовать различные контактные жидкости или гели. Контактная жидкость должна иметь специальный химический состав, соответствующий диапазону температур той или иной контролируемой поверхности и ее структуре.

Как правило ультразвуковая дефектоскопия не может дать ответ на вопрос о реальных размерах дефекта, лишь о его отражательной способности в направлении приемника. Эти величины коррелируют, но не для всех типов дефектов. Кроме того, некоторые дефекты практически невозможно выявить ультразвуковым методом в силу их характера, формы или расположения в объекте контроля.

Выводы. Ультразвуковой контроль не разрушает и не повреждает исследуемый образец, что является его главным преимуществом. Возможно проводить контроль изделий из разнообразных материалов, как металлов, так и неметаллов. Кроме того, можно выделить высокую скорость исследования при низкой стоимости и опасности для человека и высокую мобильность ультразвукового дефектоскопа.

Практика отечественной и зарубежной ультразвуковой дефектоскопии показывает, что возможности ее весьма широки, однако, чтобы получить нужный эффект, следует к каждой конкретной задаче подходить с учетом всех данных о свойствах материала, технологии изготовления контролируемого изделия, характере и размерах возможных дефектов.

При таком подходе, даже с помощью обычных дефектоскопов промышленных типов, часто оказывается возможным решение задач, считавшихся до недавнего времени неразрешимыми [3].

Библиографические ссылки

1. Контроль качества сварки : учеб. пособие для машиностроит. вузов / В. Н. Волченко, А. К. Гурвич, А. Н. Майоров и др. М. : Машиностроение, 1975. 328 с.
2. Алешин Н. П., Щербинский В. Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. М. : Высш. шк., 1991. 271 с.
3. Шрайбер Д. С. Ультразвуковая дефектоскопия. М. : Металлургия, 1965.

© Метелкин Д. В., Белых А. С., 2019

НЕОБХОДИМОСТЬ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И НАДЗОРА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

В. В. Харченко

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: badu_93@mail.ru

Рассматриваются необходимость метрологического контроля при изготовлении продукции. Приведен анализ метода метрологического контроля.

Ключевые слова: метрологический контроль, точность измерений, метрологические службы.

Под метрологическим обеспечением понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Научной основой метрологического обеспечения является метрология – наука об измерениях; организационной основой является метрологическая служба России; техническими средствами являются: система средств измерений, эталонов, система передачи размеров единиц от эталона рабочим средствам измерений, система стандартных образцов, система стандартных справочных данных; правила и нормы по обеспечению единства измерений установлены в Законе РК «Об обеспечении единства измерений» и в нормативных документах Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) [1].

Можно выделить три главные функции метрологического обеспечения: учет продукции, исчисляющейся по массе, длине, объему, мощности, энергии; измерения физических величин, технических параметров, характеристик процессов, состава и свойств веществ, проводимые при научных исследованиях, испытаниях и контроле продукции, в медицине, сельском хозяйстве и других отраслях; измерения, проводимые для контроля и регулирования технологических процессов и для обеспечения нормального функционирования транспорта и связи [4].

Но на современном этапе проблема обеспечения высокого качества продукции находится в прямой зависимости от степени метрологического обслуживания производства, поскольку для повышения качества продукции необходим постоянный контроль качества с помощью средств измерений. Метрологическое обеспечение занимает очень важное место в управлении качеством продукции, так как повышение эффективности производства и качества продукции требует максимальной достоверности количественной информации о значениях параметров, характеризующих испытываемую продукцию. Такая информация используется для оценки соответствия продукции своему назначению и установленным требованиям.

Метрологическое обеспечение включает установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Нарушение единства измерений, недостаточная их точность, не всегда продуманная организация измерений приносят большие потери для страны в целом.

Учитывая этот факт, для обеспечения единства и требуемой точности измерений, осуществления метрологического контроля и надзора необходимо создание специаль-

ных метрологических служб. В соответствии с законом РК «Об обеспечении единства измерений» к государственному метрологическому контролю относятся утверждение типа средств измерений, их поверка и процедура лицензирования, а ко второму – процедуры проверок соблюдения метрологических правил и норм, требований закона, нормативных документов. От эффективности государственного метрологического контроля и надзора зависит достижение важнейшей цели – защита интересов граждан и государства в целом от отрицательных последствий, вызванных неправильными результатами измерений.

Метрологические службы предприятий особое внимание должны уделять состоянию измерений, соблюдению метрологических правил и норм при испытаниях и контроле качества выпускаемой продукции в целях определения соответствия обязательным требованиям государственных стандартов РК при выполнении предприятием работ по обязательной сертификации продукции и услуг. Крайне важно, чтобы руководитель метрологической службы на предприятии имел право запретить выпуск продукции, если нарушаются требования стандартов и единство измерений. Очевидно, что все эти мероприятия проводятся с единственной целью – обеспечить потребителей продукцией высокого уровня качества.

Некоторыми из множества направлений развития технической базы метрологического обеспечения ВВТ на период до 2015–2020 годов являются (по словам И. В. Лисун, начальник метрологической службы вооруженных сил Российской Федерации):

1. Модернизация существующих военных эталонов и создание новых в соответствии с потребностями эксплуатируемых и перспективных ВВТ, в том числе:

– высокоточного оружия (боевых разведывательных ударных комплексов воздушного, морского и наземного базирования) с системами наведения в оптическом (лазерном), инфракрасном и сверхвысокочастотном диапазонах длин волн, а также с системами, использующими навигационные технологии КНС ГЛОНАСС;

– цифровых систем связи и боевого управления, других информационно-коммуникационных военных технологий;

– цифровых карт, навигационной и геодезической аппаратуры военных потребителей КНС ГЛОНАСС, ее мониторинга и метрологического обеспечения;

– по проблеме заметности и повышения скрытности ВВТ;

– аппаратуры, обеспечивающей повышенную вероятность и дальность обнаружения ВВТ противника;

– технических средств по проблеме антитеррора и в других важных областях.

2. Серийный выпуск автоматизированных мобильных метрологических комплексов военного назначения.

3. Разработка и применение автоматизированных средств управления метрологическим обеспечением войск (сил) для различных уровней их организационного построения.

4. Освоение инструментальных методов оценки состояния и управления единством измерений в Вооруженных Силах РФ.

Решение проблем приборостроения требует внедрения новых промышленных технологий и инноваций, позволяющих создавать измерительную технику, соответствующую мировому уровню качества.

Библиографические ссылки

1. Об обеспечении единства измерений : федер. закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

2. Иванников Д. А., Фомичев Е. Н. Основы метрологии и организации метрологического контроля : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во «НГТУ», 2001. 248 с.
3. Вайсбанд М. Д., Проненко В. И. Техника выполнения метрологических работ. Киев : Техника, 1986.
4. Кузнецов В. А., Ялунина Г. В. Основы метрологии. М. : Стандарты, 1995.
5. Крылова Г. Д. Основы стандартизации, метрологии и сертификации. М. : Аудит : Юнити, 1998.

© Харченко В. В., 2019

ПРИМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. С. Белых, Д. В. Метелкин
Научный руководитель – М. Д. Евтифьев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: alexandrbelykh1996@mail.ru

Проводится анализ и описание капиллярного метода контроля при изготовлении изделий ракетно-космической техники, выявляются преимущества данного метода контроля по сравнению с другими методами.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, капиллярный метод, пенетрант, проникающая жидкость, контроль изделий.

В современной ракетно-космической отрасли к изготавливаемым изделиям предъявляются ряд требований, которые обеспечивают правильную работу, необходимый срок службы, надежность изделия. Для достижения этих свойств проводят контроль качества изделий на наличие дефектов. В связи с применением перспективных материалов, а также при изготовлении изделий сложных форм, большинство методов контроля не подходят для обнаружения дефектов.

Капиллярные методы широко применяются в неразрушающем контроле, при изготовлении деталей в ракетно-космической технике (РКТ), авиастроении, судостроении, энергетическом машиностроении и других отраслях. Для некоторых материалов и изделий этот метод является единственным способом определения пригодности деталей или установок к работе [1].

Капиллярный метод контроля основан на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полость несплошностей материала объекта контроля и регистрации образующихся индикаторных следов, визуально или с помощью преобразователя [2].

Полости реальных трещин, чаще всего являющихся тупиковыми, имеют форму узкого клина, вершина которого обращена внутрь материала. Попав в такую трещину, проникающая жидкость смачивает ее полость и продолжает проникать внутрь нее даже после полного удаления с поверхности объекта контроля. В этом случае проникающая жидкость образует в полости трещины два мениска с радиусами R_1 и R_2 кривизны, причем, $R_1 > R_2$ (рис. 1).

Эти мениски вызывают появление двух капиллярных давлений p_1 и p_2 , равнодействующая которых Δp направлена вглубь полости дефекта. Попав в полость дефекта, жидкость будет удерживаться там капиллярными силами [1].

Если на мениск, расположенный в устье трещин, наложить какое-либо пористое вещество, то оно исчезнет и вместо него образуется система малых менисков различных форм и большой кривизны, каждой из которых создает свое капиллярное давление. Равнодействующая Δp созданных менисками капиллярных давлений существенно превышает давление p_1 и действует в противоположном ему направлении. Под действием сумм давлений пенетрант из полости трещин поднимается на поверхность контролируемого объекта, несколько расплываясь над дефектным участком, и образует индикаторный след, который можно наблюдать невооруженным глазом или в лупу, с неболь-

шим увеличением (рис. 2). Вещества, втягивающие пенетрант из полостей дефектов, называют проявителями [1].

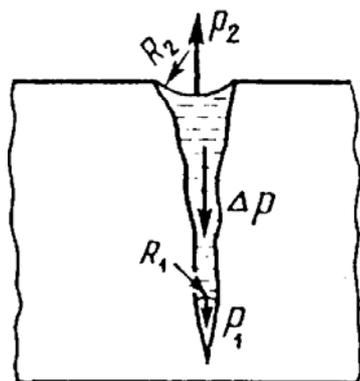


Рис. 1. Проникающая жидкость в полости трещины, образующая мениски

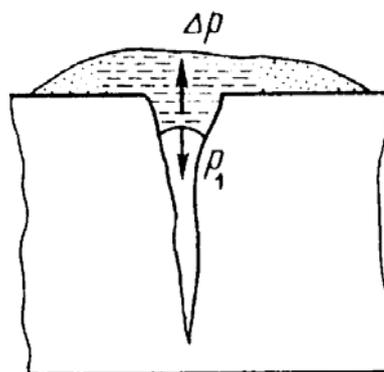


Рис. 2. Индикаторный след на дефектном участке

Капиллярные методы контроля (КМК) подразделяются на основные, использующие капиллярные явления, и комбинированные, основанные на сочетании двух и более различных по физической сущности методов контроля. [1]

К заполняющим жидкостям – пенетрантам предъявляют целый ряд требований. Хорошая смачиваемость поверхности объекта контроля – главное из них. Для этого пенетрант должен иметь достаточно высокое поверхностное натяжение и краевой угол, близкий к нулю при растекании по поверхности объекта контроля. Чаще всего в качестве основы пенетрантов используют такие вещества, как керосин, жидкие масла, спирты, бензол, скипидар, у которых поверхностное натяжение (2,5...3,5) 10–2 Н/м. Реже используют пенетранты на водяной основе с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для всех этих веществ $\cos\theta$ не менее 0,9. [3] Основными отечественными пенетрантами которые используются в промышленности являются серии: компаний «ЭЛИТЕСТ», «Клевер» и универсальный пенетрант ПС-42.

Второе требование к пенетрантам – низкая вязкость. Она нужна для сокращения времени пропитки. Третье важное требование – возможность и удобство обнаружения индикаций. По контрасту пенетранта КМК разделяют на ахроматический (яркостный), цветной, люминесцентный и люминесцентно-цветной [3].

Основные капиллярные методы классифицируют в зависимости от проникающего вещества или способа получения первичной информации.

В зависимости от типа, проникающего вещества различают два метода: проникающий раствор; метод фильтрующихся суспензий.

В зависимости от способа получения первичной информации различают методы дефектоскопии: яркостный – Я, цветной – Ц, люминесцентный – Л и люминесцентно-цветной – ЛЦ.

Процесс капиллярного контроля состоит из следующих основных операций (рис. 3):

а) очистка поверхности 1 и полости дефекта 2 от загрязнений, жира и т. д. путем их механического удаления и растворения. Этим обеспечивается хорошая смачиваемость всей поверхности объекта контроля индикаторной жидкостью и возможность проникновения ее в полость дефекта;

б) пропитка дефектов индикаторной жидкостью 3. Для этого она должна хорошо смачивать материал изделия и проникать в дефекты в результате действия капиллярных сил. По этому признаку метод называют капиллярным, а индикаторную жидкость – индикаторным пенетрантом или просто пенетрантом;

в) удаление с поверхности изделия излишков пенетранта, при этом пенетрант в полости дефектов сохраняется. Для удаления используют эффекты диспергирования и эмульгирования, применяют специальные жидкости – очистители;

г) обнаружение пенетранта в полости дефектов. Как отмечено выше, это делают чаще визуально, реже – с помощью специальных устройств – преобразователей. В первом случае на поверхности наносят специальные вещества – проявители 4, извлекающие пенетрант из полости дефектов за счет явлений сорбции или диффузии [3].

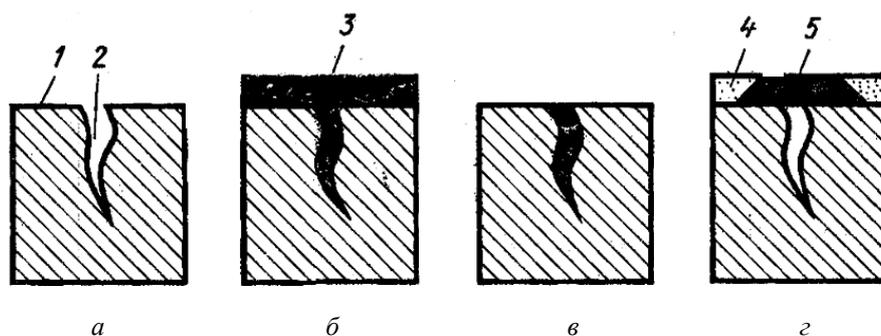


Рис. 3. Процесс капиллярного контроля

Пенетрант пропитывает весь слой проявителя (обычно довольно тонкий) и образует следы (индикации) 5 на его наружной поверхности. Эти индикации обнаруживают визуально. Различают яркостный или ахроматический метод, в котором индикации имеют более темный тон по сравнению с белым проявителем; цветной метод, когда пенетрант обладает ярким оранжевым или красным цветом и люминесцентный метод, когда пенетрант светится под действием ультрафиолетового облучения. Заключительная операция при КМК – очистка объекта контроля от проявителя. [3]

Капиллярным методом контролируют изделия:

- из чёрных и цветных металлов;
- ферромагнитных материалов;
- неметаллических материалов;
- перспективных материалов.

Капиллярным методом обнаруживают только выходящие на поверхность дефекты, полость которых не заполнена окислами или другими веществами. Чтобы пенетрант не вымывался из дефекта, глубина его должна быть значительно больше ширины раскрытия. К таким дефектам относятся трещины, непровары сварных швов, глубокие поры. Подавляющее большинство дефектов, обнаруживаемых при контроле капиллярным методом, может выявляться при обычном визуальном осмотре, особенно если изделие предварительно протравить (дефекты при этом чернеют) и применить средства увеличения. Однако преимущество капиллярных методов состоит в том, что при их применении угол зрения на дефект возрастает в 10...20 раз. Благодаря этому нет необходимости в тщательном осмотре поверхности и время контроля многократно уменьшается. Капиллярные методы находят широкое применение в ракетно-космической технике, энергетике, авиации, судостроении, химической промышленности. Ими контролируют основной металл и сварные соединения из сталей аустенитного класса (нержавеющих), титана, алюминия, магния и других цветных металлов. Общее время, необходимое для контроля относительно небольшого объекта типа турбинной лопатки, 0,5...1,4 ч в зависимости от применяемых дефектоскопических материалов и требований по чувствительности. Затраты времени в минутах распределяются следующим образом: подготовка к контролю 5...20, пропитка 10...30, удаление избытка пенетранта 3...5, проявление 5...25, осмотр 2...5, окончательная очистка 0...5. Обычно выдержку

при пропитке или проявлении одного изделия совмещают с контролем другого изделия, в результате чего среднее время контроля изделия сокращается в 5...10 раз [3].

В современных изделиях РКТ развиваются и применяются все более новые материалы, в том числе перспективные, а также изготавливаются изделия более сложных форм. Применение основных методов контроля менее эффективны, чем капиллярным методом, в этом случае данный метод является более эффективным благодаря своей универсальности, широкому диапазону материалов и сложности форм конструкции.

Библиографические ссылки

1. Калиниченко Н. П., Калиниченко А. Н. Капиллярный контроль : учеб. пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. Томск : Изд-во ТПУ, 2008. 292 с.
2. Боровиков А. С., Прохоренко П. П., Дежкунов Н. В. Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии. Минск : Наука и техника, 1983. 256 с.
3. Гурвич А. К., Ермолов И. Н., Сажин С. Г. Общие вопросы. Контроль проникающими веществами. М. : Высш. шк., 1992. 241 с.

© Белых А. С., Метелкин Д. В., 2019

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А. Г. Кузин

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kuzya802007@yandex.ru

Рассматриваются методы неразрушающего контроля и технической диагностики. Приведен анализ метода акустической эмиссии.

Ключевые слова: методы неразрушающего, точность измерений, метод акустической эмиссии.

Метод акустической эмиссии относится к акустическим методам неразрушающего контроля и технической диагностики. В основе метода лежит физическое явление излучения волн напряжений при быстрой локальной перестройке структуры материала. Явление акустической эмиссии наблюдается в широком диапазоне материалов, структур и процессов. Спектр сигналов акустической эмиссии лежит в звуковом и ультразвуковом диапазонах. Рабочий частотный диапазон аппаратуры может меняться в пределах от 10 кГц до 1 МГц в зависимости от типа, размеров, акустических свойств объекта, а также параметров шумов на объекте.

Порядок проведения АЭ диагностирования

АЭ диагностирование выполняют в процессе нагружения объекта до определенного заранее выбранного значения и в процессе выдержки нагрузки на заданных уровнях.

Нагружение осуществляют с использованием специального оборудования, обеспечивающего повышение нагрузки – внутреннего (внешнего) давления, усилия, веса, температуры и др.

Нагружение выполняют по заданному графику, который определяет скорость нагружения, время выдержек объекта под нагрузкой и значения нагрузок.

Выдержка при постоянной нагрузке обеспечивает снижение уровня шума и увеличение отношения сигнал/ шум. Повторное нагружение обеспечивает проверку выполнения/ нарушения эффекта Кайзера. При испытании толстостенных конструкций рекомендуется проводить регистрацию АЭ как на подъемах, так и на сбросах нагрузки для обнаружения эффекта раскрытия и закрытия трещин.

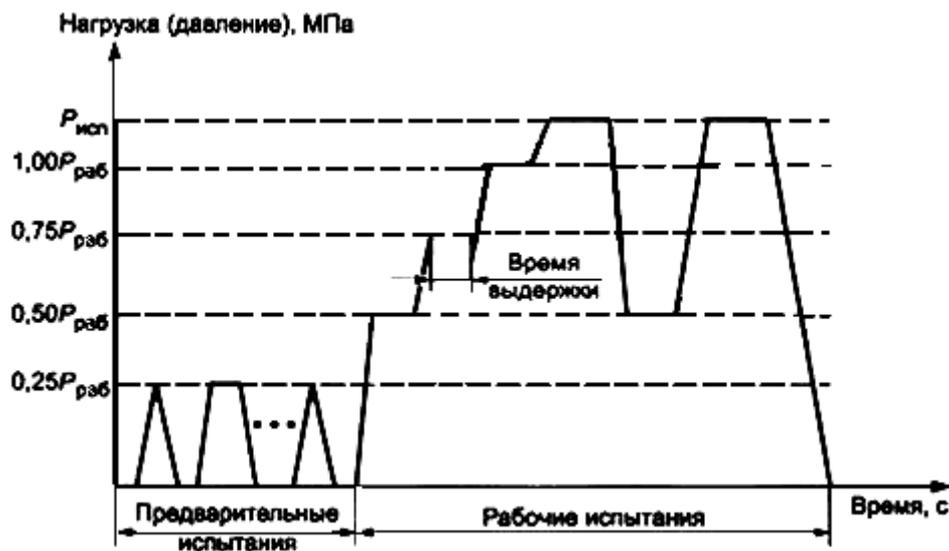
Пример типового графика нагружения приведен на рисунке.

При нагружении объекта следует стремиться к тому, чтобы напряженно-деформированное состояние (НДС) объекта при испытании максимально соответствовало НДС объекта в процессе эксплуатации. При анализе результатов контроля следует учитывать разницу в НДС.

Допускается отклонение от типового графика нагружения с приведением в отчете обоснования.

Назначение максимального значения нагрузки (давления испытаний) следует проводить с учетом характеристик материала, условий эксплуатации объекта контроля, температуры, а также предыстории его нагружения.

При нагружении объекта контроля (например, сосуда давления) внутренним давлением максимальное его значение P_{\max} (испытательное давление) должно превышать максимальное рабочее за последний год давление $P_{\text{раб}}$ (эксплуатационную нагрузку согласно технологическому регламенту) не менее чем на 5–10 %, но не превышать пробного, определяемого по соответствующим документам.



Типовой график нагружения

Нагружение объектов следует проводить плавно со скоростью, при которой не возникают помехи, превышающие допустимый уровень.

Рекомендуемые скорости повышения давления составляют

$$P_{\text{исп}} / 60 - P_{\text{исп}} / 20 \text{ (МПа/мин)}.$$

В качестве нагружающих сред могут быть использованы жидкие (гидроиспытания) и газообразные (пневмоиспытания) испытательные среды, а также рабочая среда объекта.

В случае проведения гидроиспытаний подачу нагружающей жидкости следует проводить через патрубок, расположенный в нижней части объекта, ниже уровня жидкости, заполняющей объект.

В период АЭ испытаний уровень фоновых шумов и акустических/ электромагнитных помех на объекте контроля должен быть максимально снижен. Для этого следует исключить хождение по площадкам обслуживания, передвижение автотранспорта, проведение сварочных и монтажных работ, работу подъемно-транспортных механизмов в местах, расположенных рядом с контролируемым объектом.

При испытаниях вновь изготовленных объектов, которые не проходили термообработки после сварки, возможна регистрация АЭ, вызванная выравниванием напряжений и не связанная с развитием дефектов. Поэтому проводят в обязательном порядке два нагружения. В процессе возрастания нагрузки при первом нагружении, как правило, во внимание принимают только сигналы, амплитуда которых превышает уровень порога более чем на 20 дБ, и сигналы, регистрируемые в течение выдержки.

Перед вторым нагружением сброс нагрузки после первого цикла должен быть от 50 до 100 % испытательной нагрузки.

В процессе нагружения рекомендуется непрерывно наблюдать на экране монитора обзорную картину АЭ источников испытываемого объекта, значения амплитуды АЭ

сигналов по всем каналам от времени и уровень шума (для своевременного обнаружения протечки).

Испытания прекращают досрочно в случаях, когда обнаруживается резкий рост активности источников или появление больших амплитуд сигналов АЭ для установления причины.

В случае обнаружения протечки испытания следует остановить для ее устранения.

Библиографические ссылки

1. ПБ 03-576–03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Госгортехнадзор России. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

2. РД 03-299–99. Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. РД 03-300–99. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

4. ПБ 03-593–03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. Госгортехнадзор России. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

5. ГОСТ Р 52727–2007 / ИЯР РНЦ «КИ», Самар. фил. ОАО «Оргэнергонефть», ФГУП «ОКБМ им. Африкантова», 2007.

© Кузин А. Г., 2019

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МИКРОТУРБИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

А. А. Кишкин

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

Приведен анализ ключевых особенностей энергетических испытаний микротурбин малой мощности. Приведено описание разработанных методик испытаний.

Ключевые слова: энергетические испытания, микротурбина малой мощности, методика испытаний.

Паровые и газовые турбины различного конструктивного исполнения в настоящее время являются неотъемлемой составляющей реализации процесса преобразования энергии потока вещества в механическую энергию. Технический уровень турбоустановок определяется рядом факторов, ключевыми из которых являются показатель эффективности (КПД), коэффициент быстроходности, степень парциальности, степень реактивности.

Определение данных показателей происходит в процессе энергетических испытаний турбомашин. В области испытаний турбомашин большой силовой энергетики в настоящее время накоплен значительный теоретический и практический опыт, разработаны стандартные методики испытаний.

Микротурбины малой мощности традиционно находят свое применение в ракетно-космической технике в составе силовых установок для приведения в действие компрессоров, насосов и генераторов электрического тока. Вследствие разнообразия схемных решений и специфики рабочего процесса турбин данного типа в настоящее время единых методик испытаний для них не определено. Данные испытания попадают в категорию специальных [1], характер и очередность испытаний определяются в зависимости от стадии проектирования, возможностей испытательных стендов [2]. Результаты данных испытаний используются для повышения эффективности и оптимальности конструкции, разработки мероприятий увеличения срока активного существования.

В рамках данной работы рассматривается вопрос анализа особенностей энергетических испытаний микротурбин малой мощности. Основой расчета и проектирования подобных энергетических установок является исследование рабочих процессов микротурбины. Основными элементами микротурбины, определяющими ее энергетическую эффективность (КПД) являются: подводящее устройство (направляющий аппарат), формирующее энергетику потока на входе в рабочее колесо; рабочее колесо турбины, преобразующее энергию потока в механическую энергию вращения вала.

Специфику турбин малой мощности определяют низкие расходы рабочего тела, наличие парциального подвода, малые относительные диаметры рабочего колеса, умеренная быстроходность [3]. Конструкция микротурбин определяет низкие значения эффективности рабочих процессов, что требует значительных теоретических и экспериментальных исследований, как подводящих устройств, так и рабочих колес, с целью разработки алгоритма и методики, позволяющих проводить оптимизацию конструкции,

при взаимном влиянии подводящего устройства и рабочего колеса на различных степенях реактивности.

В настоящее время спроектирован и изготовлен стенд для энергетических испытаний турбомашин малой мощности. Стенд оснащен системой измерений, позволяющей автоматически регистрировать параметры рабочего процесса в необходимом диапазоне расходов. Характерной особенностью стенда является система визуализации, позволяющая контролировать параметры потока и рабочего колеса при проведении испытаний.

Основным результатом проводимого в настоящее время комплексного исследования будут являться модели течения и экспериментальные результаты исследования коэффициентов потерь энергии, позволяющие в перспективе разработать алгоритм и программу многофакторной оптимизации при проектировании микротурбин данного типа.

Библиографические ссылки

1. Кубрак М. В., Леонов С. Н. Современные системы испытаний ракетно-космической техники [Электронный ресурс] // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. (08–11 нояб. 2017 г., Красноярск) : в 2 ч. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 343–345.

2. Гайнутдинов А. В., Каменюк О. В., Останина Н. Г., Толстопятов М. И. Особенности газодинамических испытаний осевых турбин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы X Всерос. науч.-практ. конф. (08–12 апреля 2014 г., Красноярск) : в 2 ч. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 47–48.

3. Барсков В. В., Рассохин В. А., Беседин С. Н., Тулубенский Е. В. Разработка методики испытаний малорасходных проточных частей турбины и компрессора // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. 2016. № 1 (49). С. 9–15.

© Кишкин А. А., 2019