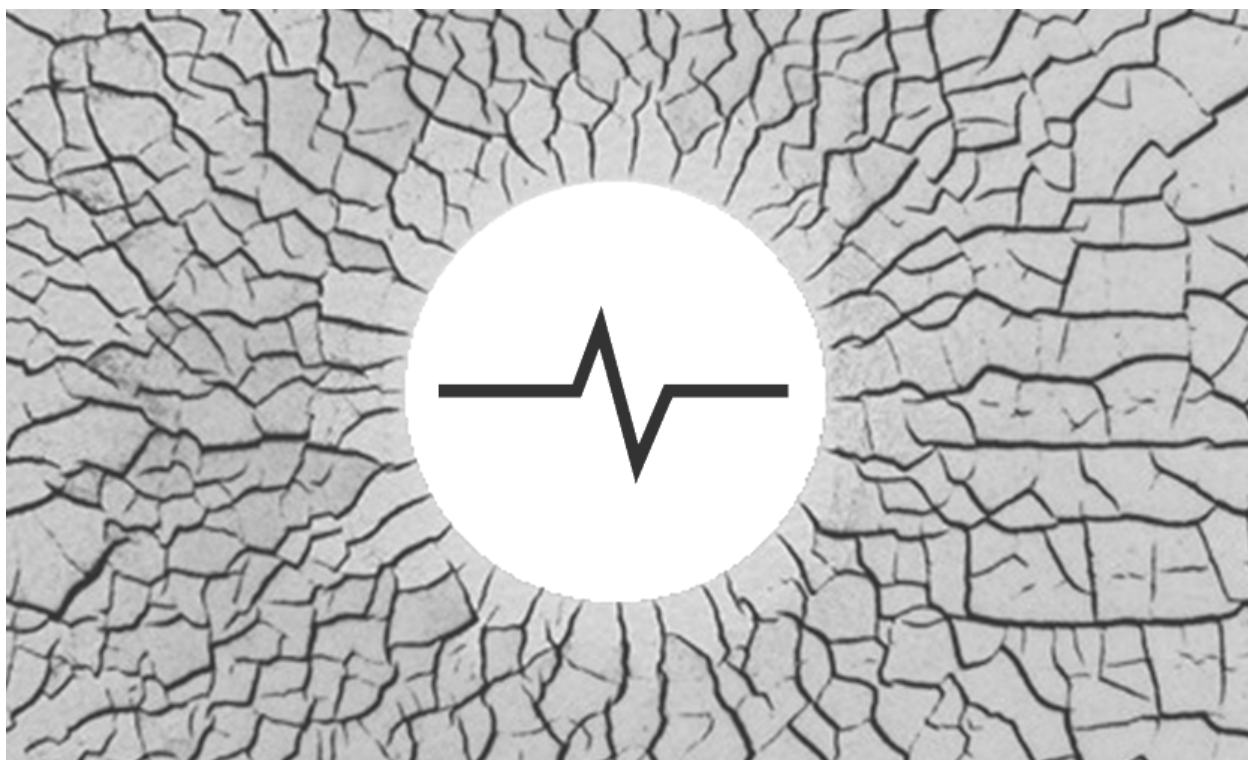




Сибирский государственный университет
науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



КРАСНОЯРСК 2020

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

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

*Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции
(26–28 февраля 2020 г., Красноярск)*

Электронное издание

Красноярск 2020

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2020

УДК 629.7
ББК 39.5
И88

Редакционная коллегия:

В. Ю. Журавлев, Г. М. Гринберг, Е. В. Сугак, В. Г. Яцененко

Под общей редакцией

кандидата технических наук, профессора В. П. Назарова

Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика [Электронный И88 ресурс] : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. (26–28 февраля 2020 г., Красноярск). – Электрон. текстовые дан. (1 файл, 4,6 МБ). – Систем. требования: Internet Explorer; Acrobat Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата .pdf) / под общ. ред. В. П. Назарова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2020. – Режим доступа: <https://www.sibsau.ru/scientific-publication/>, свободный. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-86433-815-5

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

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

**УДК 629.7
ББК 39.5**

ISBN 978-5-86433-815-5



Подписано к использованию: 06.04.2020. Объем 4,6 МБ. С 80/20.

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»

Кишкин А. А., Делков А. В., Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Луговой Е. Н. Сравнительный анализ методик обработки результатов измерений в контрольном сечении турбулентно-газового потока	6
Журавлев В. Ю. Методика уменьшения абсолютных и относительных погрешностей при обработке результатов измерений	13
Карабонцева Н. В., Карабонцева М. В. Современные измерительные средства производства	18
Орешенко Т. Г., Пащенко Е. В. Автоматизация процесса проведения гидравлических и пневматических испытаний на прочность и герметичность корпусных изделий	22
Максютин А. С. Современные технологические способы защиты электронных устройств от контрафактной продукции	25

Секция

«Контроль и диагностика технологических процессов машиностроения»

Сугак Е. В., Бразговка О. В. Повышение надежности и оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных технических объектов	31
Левко В. А., Пшенко Е. Б., Литовка О. В. Основные направления повышения надежности и производительности двухсторонней обработки абразивным потоком	37
Зиборов Е. Д., Солодилов И. П., Шангераев Э. М. Разработка системы автоматического контроля размеров	51
Сугак Е. В., Бразговка О. В. Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта оборудования с резервированием	55

Секция

«Испытания, контроль, надежность систем автоматического управления»

Штабель Н. В., Самотик Л. А., Мизрах Е. А. Повышение быстродействия феррозондового датчика малых токов	59
Мызникова В. А., Толстенков Е. Д., Чубарь А. Ф. Построение системы управления движением автономного объекта в среде SIMINTECH	63
Дружинин А. А., Пучков А. В., Гринберг Г. М. Программно-аппаратный комплекс для тестирования цифрового регулятора в контуре обратной связи импульсного преобразователя	71

Секция
«Контроль и испытания ракетно-космической техники»

Власенко А. В., Клешина И. А., Торгашин А. С., Бегишев А. М. Требования к надежности изделий ракетно-космической отрасли в процессе хранения	76
Иголкин А. А., Попков А. А., Филипов А. Г. Оценка условий перегрузок на установки приборов и агрегатов космических аппаратов	79
Евтифьев М. Д. Электрические испытания орбитального корабля «Буран». Как это было	84
Тимофеев В. В. Контроль кривизны параболического зеркала антенны космического аппарата при термовакуумных испытаниях	98
Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Луговой Е. Н., Шилкина М. О., Ермаков М. А. Методика проведения энергетических и частично балансовых испытаний микротурбин	102
Бегишев А. М., Журавлев В. Ю., Торгашин А. С. Влияние стендовых систем и конструкции силоизмерительного устройства на точность измерения тяги жидкостного ракетного двигателя	107
Талай Е. П., Канюка С. Е. Повышение качества измерений при испытании камеры жидкостного ракетного двигателя на герметичность методом бароаквариума	113
Торгашин А. С., Бегишев А. М., Власенко А. В., Клешина И. А. Оценка возможности применения акустического метода регистрации кавитации при испытании насоса ЖРД	117

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

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

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

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

УДК 629.7

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИЗМЕРЕНИЙ В КОНТРОЛЬНОМ СЕЧЕНИИ
ТУРБУЛЕНТНО-ГАЗОВОГО ПОТОКА**

А. А. Кишкин, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко, О. В. Шилкин, Е. Н. Луговой

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

Рассматриваются методы физического моделирования рабочих процессов в газовой среде микро турбомашин, встроенных в систему обеспечения теплового режима модулей космического летательного аппарата. Для решения задач физического моделирования необходима разработка и обоснование новых алгоритмов и методов регистрации основных термодинамических параметров p – давления; v ($1/\rho$) – удельный объем и T – температура. С целью оценки главного динамического параметра потока скорости c . В сравнительном анализе рассмотрены два варианта обработки результатов: с учетом поправки на сжимаемость воздуха в гидравлическом выражении; определение скорости через термодинамические параметры из уравнения энергии Бернулли. Принято решение о достоверности обоих вариантов.

Ключевые слова: число Маха, уравнение энергии, измеренная температура, коэффициент восстановления, уравнение энергии, динамический напор.

Современные системы терморегулирования (СТР) космических аппаратов (КА) представляют собой сложную техническую систему, состоящую из комплекса подсистем, выполняющих определенные функции и задачи. В связи с этим процесс проектирования систем терморегулирования КА представляет собой путь компромиссных решений между разнохарактерными по решаемым задачам направлениями общего процесса проектирования при выполнении единой цели создания оптимального проекта, что обуславливает необходимость использования специальных инструментов проектирования и расчета СТР и ее составных частей, существующих и перспективных.

В настоящей работе рассматриваются задачи моделирования и расчета энергетической системы в составе СТР КА с энергетической установкой на основе турбинной ступени для преобразования низкопотенциального тепла в энергию на основе паросилового цикла.

Методика обработки результатов экспериментальных исследований микротурбин.

Основные газодинамические и термодинамические соотношения

Уравнение энергии в механической форме [1], определяющей скоростной напор (скорость потока) при адиабатической трансформации газа

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{p^*}{\rho^*} = \frac{p}{\rho} \cdot \frac{k}{k-1} + \frac{c^2}{2}, \quad (1)$$

где p , p^* – полное и статическое измеряемые давления потока в точке, при известных p и p^* возможно определение скоростного напора.

Уравнение состояния для воздуха (модельного рабочего тела – идеального газа) в общем случае:

$$p \cdot \frac{1}{\rho} = RT, \quad (2)$$

Для случая уравнения (1) необходимо использовать два уравнения состояния

$$\frac{p^*}{\rho^*} = RT^*; \quad \frac{p}{\rho} = RT, \quad (3)$$

где T^* ; T – температуры торможения и статическая температура в точке измерения.

Следует учитывать, что термодинамическая температура может быть измерена только таким термоприемником, относительная скорость которого равна нулю. В ином случае (неподвижный относительно стенки канала) термометр будет показывать некоторую температуру $T_{ст}$, связь между которыми определяется из уравнения энергии в термодинамических параметрах [3]:

$$i^* = i + Cp \frac{c^2}{2}, \quad (4)$$

$$T^* = T + \frac{c^2}{2Cp},$$

где i – энтальпия.

Промежуточную температуру называют измеренной температурой.

$$T_{изм} = T + r \frac{c^2}{2Cp}, \quad (5)$$

где r – коэффициент восстановления, который зависит от физических свойств потока и геометрии обтекаемой поверхности.

$$r = r(Pr; k; M; Re). \quad (6)$$

Для продольно обтекаемой пластины при ламинарном пограничном слое:

$$r \approx \sqrt{P_n}; \quad (7)$$

при турбулентном слое:

$$r \approx \sqrt[3]{P_n}; \quad P_r = 0,72; \quad k = 1,4. \quad (8)$$

При поперечном обтекании проволоки газом при $Re < 3000$.

$$r = (0,355 + 2,14P_r)(k - 1), \quad (9)$$

$$Re = 3000, \quad r = 0,76, \quad (10)$$

$$Re > 20000; \quad M > 0,7; \quad r = 0,92. \quad (11)$$

Таким образом, из (5) с учетом (6...11) можно определить T . Связь между температурой торможения и статической температурой определяется:

$$T^* = T + \frac{c^2}{2Cp} = T \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right), \quad (12)$$

где число Маха

$$M = \frac{c}{a} = \frac{c}{\sqrt{kRT}} = \sqrt{\frac{2}{k-1}} \left(\left(\frac{p^*}{\rho} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right). \quad (13)$$

Относительная скорость

$$\lambda = \frac{C}{a_{кр}} = \frac{C}{\sqrt{\frac{2k}{(k+1)} RT^*}}. \quad (14)$$

Число M и λ связаны соотношением

$$M = \sqrt{\frac{2}{k+1}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{k-1}{k+2} \lambda^2}}. \quad (15)$$

Из уравнения энергии

$$i + \frac{c^2}{2} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2}. \quad (16)$$

С помощью уравнения адиабаты $pv^k = \text{const}$ и относительной скорости и скорости звука (13; 14) определяются необходимые безразмерные функции:

– относительная температура

$$\tau_f = \frac{T}{T^*} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 = \frac{1}{1 + \frac{k-1}{2} M^2}; \quad (17)$$

– относительное давление

$$\pi_f = \frac{p}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}}; \quad (18)$$

– относительная плотность

$$\varepsilon_f = \frac{\rho}{\rho^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}}; \quad (19)$$

– соотношение ((17), (18), (19))

$$\pi_f = \tau_f = \varepsilon_f;$$

– приведенная плотность потока масса – есть отношение плотности потока массы в произвольном сечении F к плотности потока массы в критическом сечении $F_{кр}$:

$$q_f = \frac{\rho c}{\rho_{кр} a_{кр}} = \frac{F_{ркр}}{F} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\left(\frac{k+1}{2(k-1)} \right)} \cdot \frac{M}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}; \quad (20)$$

– функция динамического напора, отношение динамического давления в сечении к полному давлению в том же сечении:

$$J_f = \frac{\rho c}{2P^*} = \frac{k}{k+1} \cdot \lambda^2 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{k}{2} \frac{M^2}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}}; \quad (21)$$

– из уравнения неразрывности $\dot{m} = \rho c F$, относительной скорости (14), относительной плотности (19) следует

$$\dot{m} = p \cdot c \cdot F = m \cdot \frac{P^* F \cdot qf}{\sqrt{T^*}}, \quad (22)$$

где $m = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{1}{R}}.$

Алгоритм – методика обработки результатов измерений в контрольном сечении с учетом сжимаемости ϵ .

Измеренные параметры [1]:

$P \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right)$ – статическое давление; $P^* \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right)$ – полное давление;

$T_{\text{изм}} (^{\circ}\text{K})$ – измеренная равновесная температура в сечении.

Расчетные параметры:

– число Маха (13);

– коэффициент восстановления (8); (11) $r = 0,9$

– статическая температура в сечении:

$$T = \frac{T_{\text{изм}}}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot r \cdot M^2}; \quad (23)$$

– относительная температура (17);

– температура торможения:

$$T^* = \frac{T}{\tau_f}; \quad (24)$$

– плотность газа в сечении:

$$p = \frac{P}{RT}. \quad (25)$$

Скорость в сечении по первому способу:

$$C_{(1)} = M \sqrt{kRT}. \quad (26)$$

Поправка на сжимаемость для воздуха:

$$(1 + \Delta\epsilon) = 1 + \frac{M^2}{4} + \frac{M^n}{40}. \quad (27)$$

Скорость в сечении второму способу:

$$C_{(2)} = \sqrt{\frac{2(P^* - P)}{p(1 + \Delta\epsilon)}}. \quad (28)$$

Примерный расчет:

$$R = 287,7 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right] - \text{воздух.}$$

Исходные данные: $P = 100\,000 \text{ Н/м}^2$; $P^* = 140\,000 \text{ Н/м}^2$; $T_{\text{изм}} = 293 \text{ К}^*$.

Расчетные данные:

- $M = 0,71$;
- $\pi_f = 0,714$;
- $r = 0,9$;
- $T = 268,7 \text{ [К]}^*$;
- $\tau_f = 0,916$;
- $T^* = 293,3 \text{ [К]}^*$;
- $P = 1,296 \text{ [кг/м}^3\text{]}^*$;
- $P^* = 1,776 \text{ [кг/м}^3\text{]}^*$;
- $C_{(1)} = 233,6 \text{ [м/с]}$ – по первому способу;
- $(1 + \Delta \varepsilon) = 1,382$;
- $C_{(21)} = 211 \text{ [м/с]}$ – по второму способу.

Расхождение:

$$\Delta \bar{C} = \frac{(C_1 - C_2) \cdot 2}{C_1 + C_2} = \frac{2(233 - 211)}{444,6} = 0,098. \quad (29)$$

Алгоритм – методика обработки результатов измерений в сечении с учетом уравнения энергии (Бернули) [3].

Исходные данные замеров:

$P \text{ [Н/м}^2\text{]}$ – статическое давление;

$P^* \text{ [Н/м}^2\text{]}$ – полное давление;

$T_{\text{изм}} = 293 \text{ (}^\circ\text{K)}$ – измеренная температура.

Расчетные параметры:

– число Маха (2.13)

$$M = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{P^*}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}; \quad (30)$$

– коэффициент восстановления температуры (8); (11)

$$r = 0,9; \quad (31)$$

– статическая температура в сечении

$$T = \frac{T_{\text{изм}}}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot r \cdot M^2}; \quad (32)$$

– относительная температура в сечении (17):

$$\tau_f = \frac{1}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2}; \quad (33)$$

– температура торможения

$$T^* = \frac{T}{\tau_f}; \quad (34)$$

– плотность газа

$$\rho = \frac{p}{RT}; \quad (35)$$

– скорость в сечении по первому способу:

$$\rho = \frac{p}{RT};$$

$$C_{(1)} = M \cdot \sqrt{kRT}; \quad (36)$$

– скорость в сечении по второму способу [1]

$$C_{(2)} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot RT \left[1 - \left(\frac{P^*}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}; \quad (37)$$

Примерный расчет: $R = 287,7$ [Дж/кг·К]; $k = 1,4$ воздух. Исходные данные $P = 100\,000$ [Н/м²]; $P^* = 140\,000$ [Н/м²]; $T_{\text{изм}} = 293$ [°K].

Расчетные данные:

- $M = 0,71$;
- $\pi_f = 0,714$;
- $r = 0,9$;
- $T = 268,7$ [°K];
- $\tau_f = 0,916$;
- $T^* = 293,3$ [°K];
- $p = 1,296$ [кг/м³];
- $P^* = 1,776$ [кг/м³];
- $C_{(1)} = 234$ [м/с] – по первому способу;
- $C_{(2)} = 233,6$ [м/с] – по второму способу.

Относительное отклонение скорости:

$$\Delta \bar{C} = \frac{(C_1 - C_2) \cdot 2}{C_1 + C_2} = \frac{2(234 - 233,6)}{467,6} = 0,004\,3; \quad (38)$$

Подстановка измеренных и расчетных параметрах в уравнении Энергии [2]:

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{P^*}{p^*} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P}{p} + \frac{C^2}{2},$$

дает следующий результат:

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{P^*}{p^*} = 294\,648 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right],$$

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{P}{p} + \frac{C^2}{2} = 297\,345 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right],$$

В исследуемом сечении производится измерение приемником полного давления трубка Пито, приемники давления соединены с датчиками давления ИКД 6 и приемником статического давления выполненного в стенке проточной части. Температура измеряется в плоскости этого же сечения, термисторами В57861-S 103 Е40 с базовым

сопротивлением 10 кОм. Регистрация параметров по вольтажу регистрируется системой LabVIEW 2012.

Сравнение результатов относительных отклонений скорости по выражению (29), (38) показывает, что метод обработки результатов, использующий выражение для определения скорости из уравнения энергии, дает более высокую точность и рекомендуется при энергетических испытаниях.

Библиографические ссылки

1. Галеркин Ю. Б., Рекстин Ф. С. Методы исследования центробежных копрессорных машин. Л. : Машиностроение, 1969. 304 с.

2. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2003. 336 с.

3. Круглов М. Г., Меднов А. А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания : учеб пособие для студ., обучающихся по спец. «Двигатели внутреннего сгорания». М. : Машиностроение, 1988. 360 с.

© Кишкин А. А., Делков А. В., Шевченко Ю. Н.,
Шилкин О. В., Луговой Е. Н., 2020

МЕТОДИКА УМЕНЬШЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

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

Представлена методика уменьшения погрешностей измерительных приборов при аппроксимации результатов эксперимента.

Ключевые слова: погрешности измерений, аппроксимация, метод наименьших квадратов.

При любом измерении неизбежно возникают ошибки (погрешности измерений), приводящие к отклонению измеренного значения x от истинного значения x_0 измеряемой величины X . Поэтому при записи результата измерений или вычислений принципиально важна оценка точности полученного числа.

Класс точности подавляющего числа приборов определяет максимальную абсолютную погрешность измерения – число, равное максимальной относительной погрешности в процентах, которую вносит прибор при измерении на пределе используемой шкалы. Максимальная абсолютная погрешность определяется выражением:

$$\Delta x_{\text{пр}} = \frac{\text{Предел измерения} \times \text{класс точности}}{100}.$$

Например, в эксперименте результат представляется в виде значения измеряемой величины и ее абсолютной погрешности:

$$X = (54,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} \text{ В при } \alpha = 0,95.$$

Такое представление означает, что истинное значение величины X с вероятностью 95 % находится в диапазоне от $54,1 \cdot 10^{-2}$ В до $54,5 \cdot 10^{-2}$ В. Абсолютная погрешность сама по себе ничего не говорит о точности измерения. Чтобы охарактеризовать точность измерения, вводят относительную погрешность: $\delta x = \frac{\Delta x}{x}$. При этом наименьшую

относительную погрешность прибор вносит в результат при измерении на пределе используемой шкалы. При меньших измеряемых значениях относительная погрешность увеличивается.

Для окончательной записи результата прямых равноточных измерений вычисляется погрешность измерений, учитывающая как случайную, так и систематическую погрешности измерения. Суммарную погрешность прямых измерений определяют по формуле $\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\alpha}^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2}$.

При изучении какого-либо процесса, зависящего от ряда параметров, исследуют функциональную зависимость каждого параметра x на исследуемую величину y . Возможны две задачи. В первой вид функции $y = f(x, A, B, C, \dots)$ бывает обычно известен из физических законов, а коэффициенты $A, B, C, \dots$ определяются по результатам эксперимента. Во второй задаче полученные результаты измерений представлены

в виде таблицы или графика значение x и y , требуется подобрать аналитическое выражение, приближенно отображающее эту функцию [1].

В общем виде задача решается аппроксимацией обобщённого полинома функции вида [2; 4]:

$$Y(x) = a_0\phi_0(x) + a_1\phi_1(x) + a_2\phi_2(x) + \dots + a_m\phi_m(x),$$

где a_0, a_1, a_m – постоянные коэффициенты; m – конечно,

$\phi_0(x), \phi_1(x), \phi_m(x)$, – заданные на некотором множестве дифференцируемые функции.

Чаще всего рассматриваются алгебраические полиномы (многочлены), для которых

$$\phi_0(x) = 1, \phi_1(x) = x, \phi_2(x) = x^2, \dots, \phi_m(x) = x^m,$$

$$Y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_mx^m.$$

Задача о приближении функции ставится следующим образом: данную функцию $f(x)$ требуется заменить полиномом $Y_m(x)$ порядка m так, чтобы отклонение функции $f(x)$ от полинома $Y_m(x)$ на заданном множестве было наименьшим. Полином $Y_m(x)$ называется интерполяционным.

При количестве измерений n задача решается при $n \geq m$ из условий:

$$y_0 = a_0 + a_1x_0 + a_2x_0^2 + \dots + a_mx_0^m$$

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + \dots + a_mx_1^m$$

$$y_2 = a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + \dots + a_mx_2^m$$

$$\dots\dots\dots$$

$$y_n = a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + \dots + a_mx_n^m.$$

При наличии погрешностей измерений x_i и y_i функция $Y_m(x)$ в точках i имеет отклонения от y_i :

$$a_0 + a_1x_0 + a_2x_0^2 + \dots + a_mx_0^m - y_0 = \varepsilon_0$$

$$a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + \dots + a_mx_1^m - y_1 = \varepsilon_1$$

$$a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + \dots + a_mx_2^m - y_2 = \varepsilon_2$$

$$\dots\dots\dots$$

$$a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + \dots + a_mx_n^m - y_n = \varepsilon_n.$$

Наилучшим значениям коэффициентов a_i полинома $Y(x)$ соответствует условию $\sum_{i=1}^n (Y(x_i) - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \Phi = \min$. Минимуму функции Φ соответствует решение системы уравнений $\frac{\partial \Phi}{\partial a_i} = 0$ относительно a_i .

Традиционно изложенный метод применяется при обработке результатов измерений разными приборами. При этом функция $\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \min$ равномерно минимизирует отклонения значений полинома от экспериментальных значений y_i вдоль всего диапазона x_i .

Средства измерений могут иметь погрешности аддитивного, мультипликативного или смешанного вида (рис. 1).

Проведение измерений приборами с различным механизмом преобразования физических величин при наличии погрешности мультипликативного или смешанного вида и последующая аппроксимация полученных результатов приводят к значительному возрастанию погрешностей полученной зависимости в начале диапазона измерений [3].

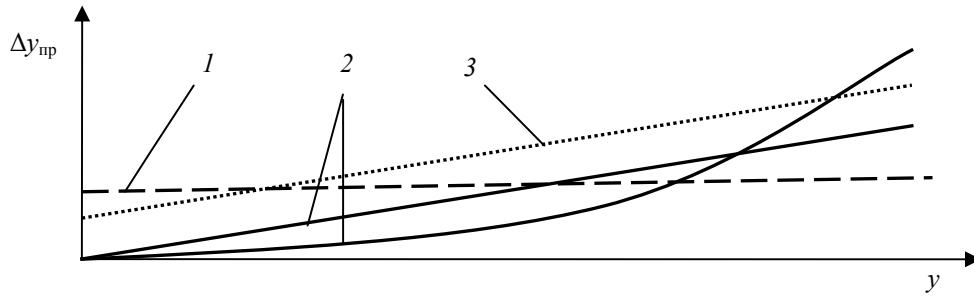


Рис. 1. Виды погрешностей приборов
1 – аддитивная; 2 – мультипликативная; 3 – смешанная

Перед проведением экспериментов проводится процедура градуировки средств измерений. При этом легко определяется вид погрешностей каждого средства измерений. В случае обнаружения погрешностей мультипликативного или смешанного вида при традиционной методике аппроксимации результатов измерений полученная функция имеет пропорциональные отклонения от измеренных величин по всему диапазону шкалы прибора. Это приводит к увеличению относительных и абсолютных погрешностей, превышающих класс точности прибора для значений первой половины диапазона параметров. Предлагается следующий алгоритм снижения погрешностей измерений в указанном диапазоне до уровня класса точности прибора.

Зная класс точности прибора, определяются максимальные абсолютная $\Delta y_{\text{пр}}$ и относительная $\delta_{\text{пр}}$ погрешности средства измерений.

Для произвольных значений y_i должны выполняться отношения $\delta_{\text{пр}} = \frac{\Delta y_{\text{пр}}}{y_{\text{пр}}} = \frac{\Delta y_i}{y_i} = \delta_i$ и можно вычислить $\Delta y_i = y_i \delta_{\text{пр}}$. Тогда относительно измерения n

должно выполняться отношение $\Delta y_i = y_i \frac{\Delta y_n}{y_n}$. Введя коэффициенты отношения абсолютных погрешностей $k_i = \frac{\Delta y_n}{\Delta y_i}$, можно определить весовые коэффициенты точности измерений $p_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i}$.

При этом выражение функции Φ принимает вид $\sum_{i=1}^n ((Y(x_i) - y_i) p_i)^2 = \Phi$.

Систему уравнений погрешностей можно представить в матричной форме. Для функций алгебраического полинома уравнения погрешностей принимают вид

$$\begin{vmatrix} \sum p_i & (\sum x_i p_i) & \dots & (\sum x_i^m p_i) \\ (\sum x_i p_i) & (\sum x_i^2 p_i) & \dots & (\sum x_i^{m+1} p_i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\sum x_i^m p_i) & (\sum x_i^{m+1} p_i) & \dots & (\sum x_i^{2m} p_i) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \sum (y_i p_i) \\ \sum (y_i x_i p_i) \\ \dots \\ \sum (y_i x_i^m p_i) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_3 \end{vmatrix} \quad \text{или} \quad X \cdot A - Y = \varepsilon.$$

Тогда выражение функции Φ в матричной форме можно преобразовать:

$$\Phi = \sum \varepsilon_i^2 = \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_m] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = (\mathbf{X} \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Y})^T \cdot (\mathbf{X} \cdot \mathbf{A} - \mathbf{Y}).$$

Условие минимума функции Φ определяется уравнением

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{A}} = 2 \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{A} - 2 \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y} = 0,$$

из которого можно найти матрицу $\mathbf{A}$ коэффициентов a_i : $\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}$.

В качестве примера проведена обработка результатов эксперимента двумя методами, с учетом и без учета весовых коэффициентов. Аппроксимация проводилась по линейной функции $Y = A + BX$.

Без учета весовых коэффициентов использовались известные формулы, полученные решением системы двух уравнений:

$$A = \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i - \sum X_i \sum X_i Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}; \quad B = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}.$$

С учетом весовых коэффициентов формулы преобразованы к виду

$$A = \frac{\sum (X_i^2 P_i^2) \sum (Y_i P_i^2) - \sum (X_i P_i^2) \sum (X_i Y_i P_i^2)}{\sum P_i^2 \sum (X_i^2 P_i^2) - (\sum X_i P_i^2)^2};$$

$$B = \frac{\sum P_i^2 \sum (X_i Y_i P_i^2) - \sum (X_i P_i^2) \sum (Y_i P_i^2)}{\sum P_i^2 \sum (X_i^2 P_i^2) - (\sum X_i P_i^2)^2}.$$

Результаты сравнительного расчета представлены на рис. 2.

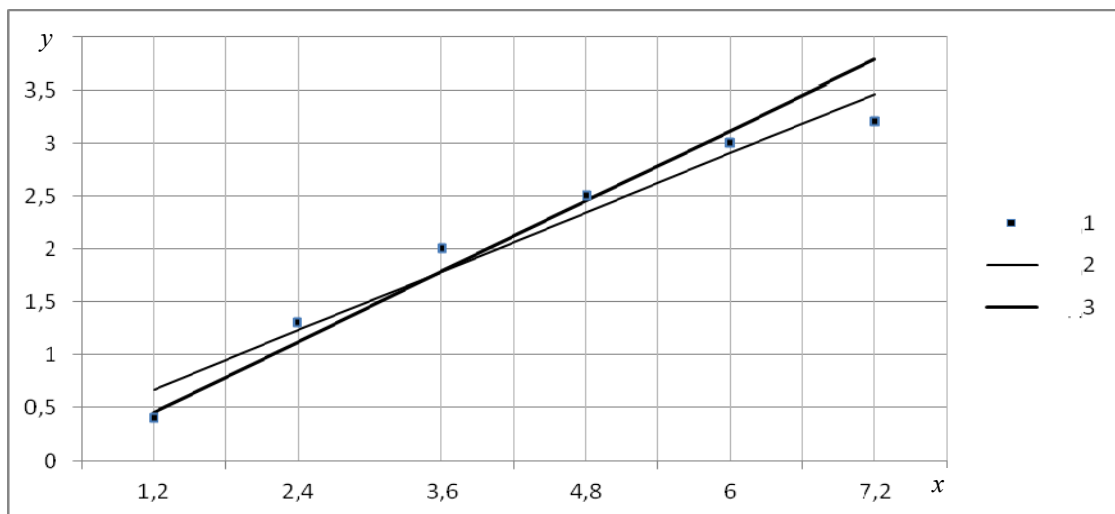


Рис. 2. Результаты сравнительного расчета:
1 – результаты эксперимента; 2 – график по результатам традиционного расчета;
3 – график по результатам предложенной методики

Исходные данные для большей наглядности взяты для нелинейной зависимости параметров. По традиционной и предложенной методикам получены следующие коэффициенты полинома: $Y_2(x) = 0,106\ 667 + 0,466\ 667x$; $Y_3(x) = -0,217\ 11 + 0,556\ 518x$. Как и ожидалось, график, полученный по предлагаемой методике, имеет суммарное отклонение от результатов эксперимента несколько больше чем график, полученный по традиционной методике. Но 70 % значений, примыкающих к началу шкалы имеют по предлагаемой методике суммарное отклонение почти вдвое меньше. Таким образом, абсолютные и относительные погрешности при малых значениях аргумента удалось значительно уменьшить при незначительном увеличении относительных погрешностей в конце шкалы измерений.

Библиографические ссылки

1. Губин В. И., Осташков В. Н. Статистические методы обработки экспериментальных данных : учеб. пособие. Тюмень : Изд-во «ТюмГНГУ», 2007. 202 с.
2. Романов В. Н. Точность средств измерений : учеб. пособие. СПб. : СЗТУ, 2003. 153 с.
3. Туз Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств. Киев : Вища шк., 1976. 256 с.
4. Шлыков Г. П. Теория измерений: уравнения, модели, оценивание точности : учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. 100 с.

© Журавлев В. Ю., 2020

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА

М. В. Карабонцева, Н. В. Карабонцева
Научный руководитель – 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: karabonceva@mail.ru

Актуальность выбранной темы обусловлена высоким уровнем контроля качества выпускаемых предприятием деталей с целью повышения качества конечного агрегата (узла).

Ключевые слова: измерение, контроль, параметр, координата, качество, проверка.

Изготовление сложнопрофильных элементов конструкций на машиностроительных предприятиях, где ведется массовое серийное производство, требует внедрения современных методов контроля и проведения измерений. Контроль качества деталей необходим для эффективного управления качеством конечного агрегата (узла). Модернизация технологических линий связана не только с приобретением новейшего оборудования, но и с переподготовкой персонала. В совокупности, данные меры направлены на повышение качества выпускаемых продуктов, снижение себестоимости, трудоемкости, минимизацию временных затрат на организацию контроля качества продукции и увеличение прибыли, а главным образом подразумевает минимизацию оборота дефектных деталей.

В аэрокосмической промышленности, как и в автомобилестроении и машиностроении, а также во многих других областях требуются координатно-измерительные машины (КИМ) с большим диапазоном измерений качества выпускаемой продукции.

КИМ – это средство, предназначенное для проведения координатных измерений в общем случае не менее чем по трем линейным и угловым координатам, причем хотя бы одна из координат должна быть линейной.

Машины обеспечены оптическими или контактными датчиками, которые выбираются оператором в зависимости от задачи измерения и степени контроля параметров и размеров выпускаемой продукции. Это обеспечивает оптимальное сочетание инструментов для решения разного рода задач измерения размеров.

Современные КИМ представлены широким модельным рядом, что позволяет выбрать машину в соответствии с решаемыми измерительными задачами, условиями эксплуатации (температура, давление, влажность, запыленность) и финансовыми возможностями предприятия. КИМ универсальна: контрольно-измерительные операции можно осуществлять как на этапе освоения производства, так и при серийном выпуске деталей. Также КИМ позволяет за один установ проконтролировать практически все нормируемые параметры как в лаборатории, с контролем температуры, влажности и стерильности, так и в цеховых условиях без возможности контроля данных параметров [1].

Различают крупногабаритные порталные КИМ мостового типа, стоечные КИМ и трекеры.

Машины мостового типа обеспечивают наивысшую точность и высокую производительность при контроле размерных параметров крупногабаритных деталей и отливок. Такие детали применяются, например, в авиастроительной и космической промышленности. Несмотря на увеличенную длину хода щуповой системы, обеспечивается дости-

жение высокой точности измерений и эксплуатационных параметров, которые обычно достижимы в сравнительно малых трех координатных измерительных машинах.

При применении КИМ мостового типа значительно улучшаются показатели по частоте зондирования, параметрам ускорения, максимальной скорости, а также другие рабочие характеристики при сканировании. Оборудованные высокопроизводительной лазерной сканирующей измерительной 3D-головкой и дополнительными запястьями робота с аналоговым сервоприводом эти машины способны обеспечивать быстрый сбор данных по миллионам измерительных точек на деталях сложной формы, и являются идеальными машинами для применения в производственных технологиях. Машина отличается применением конструкции с верхней соединительной балкой совместно с монолитным U-образным основанием для обеспечения наивысшей точности и высокой производительности. В результате этого минимизировано перемещение всех массивных элементов конструкции.

По оси X применена система со сдвоенным приводом перемещения, а также системы с датчиками контроля положения. Модели мостового типа также отличаются применением сканирующей измерительной системы. Измерительная головка в такой системе обеспечивает очень точные измерения даже при использовании длинного и тяжелого наконечника. Возможно применение сборных наконечников длиной до 800 мм и весом до 1000 г, что обеспечивает возможность контроля геометрических особенностей в глубоких внутренних зонах обрабатываемой детали.

Стоечные КИМ спроектированы для оптимального обеспечения требований при контроле размерных параметров и обследовании корпусных деталей при размещении оборудования в цеховых условиях. Машины отличаются высокими динамическими параметрами и высокой точностью. В них применены стабильная и точная механическая конструкция, встроенная система температурной компенсации, а также обеспечена возможность эксплуатации с широким разнообразием измерительных зондов, измерительных головок, запястьев робота и принадлежностей, а также реализована возможность применения пакета новейшего программного обеспечения, что, в целом, формирует высокоэффективную координатно-измерительную машину, что обеспечивает эффективное применение КИМ данного типа, в частности, в цеховых условиях, в метрологических лабораториях и в лабораториях контроля качества.

Машины стоечной модели представляют собой автоматическую измерительную систему с горизонтальной измерительной рукой, отличающуюся высоким качеством и спроектированы для оптимального оборудования измерительными средствами в целях реализации разнообразных метрологических приложений в производственных условиях. Это новейшая измерительная система, которая предоставляет непрерывный и эффективный доступ для обеспечения размерного контроля корпусных деталей. Она снабжена встроенными средствами для промышленных измерений с использованием измерительных технологий. А также с применением конструкций с одной или двумя горизонтальными измерительными руками. Открытая конструкция этой измерительной системы, которую можно монтировать заподлицо с настилом пола, а также использование в конструкции ходовых настилов – кожухов (по продольным осям) обеспечивают облегченный доступ в измерительную зону и упрощают условия для операций загрузки и выгрузки деталей, а также для программирования и автоматического размерного контроля.

Лазерный трекер – это измерительный прибор, использующий принцип слежения за отражателем посредством лазерного луча. Принцип работы лазерного трекера следующий: прибор выпускает лазерный луч, который попадает в центр углового отражателя, после чего он отражается и возвращается в объектив трекера, где его обрабатывает датчик дальномера.

Контроль геометрии крупногабаритных деталей измерительным трекером – это комплекс мер, позволяющих обнаружить даже минимальные отклонения геометрии объектов.

Современные модели координатно-измерительных машин позволяют:

- получать точные параметры даже со сложных объектов,
- работать в труднодоступных местах, непосредственно на производстве,
- осуществлять работы персоналом без дополнительных квалификаций.

С помощью лазерных трекеров можно проводить измерения крупных узлов техники и машин, оцифровывать поверхности разной сложности, проводить контроль изделий, калибровать станки и другие координатно-измерительные машины, сравнивать готовые конструкции с САД-моделями, калибровать роботов и т. д. [2]

Работа КИМ основана на координатных измерениях, т. е. на поочередном измерении координат определенного числа точек поверхности детали и последующих расчетах линейных и угловых размеров, отклонений размера, формы и расположения в соответствующих системах координат. Используются три основные системы координат: абсолютная системы координат машины (СКМ), относительная система координат машины (СКО) и система координат детали (СКД). СКМ образуют направляющие координатных перемещений и измерительные системы КИМ; начало СКМ выбирается произвольно. Направление осей СКО совпадает с направлением осей СКМ, а начало совмещается с центром или другой точкой калибратора (геометрического элемента, неподвижного во время измерения). СКО обеспечивает единство координатных данных при измерении несколькими чувствительными элементами КИМ, взаимодействующими с измеряемой поверхностью, в случае изменения их параметров или положения в СКМ.

Результаты измерения представляются в СКД, которая формируется путем измерения положения в СКМ выбранных базовых поверхностей детали. СКД может изменяться в процессе измерения. Все операции по расчету систем координат и трансформации значений координатных данных выполняются по программе автоматически, на основе данных измерений, вводимых в системы координат машины.

Измерения в динамическом режиме реализуются при ручном и автоматическом управлении, а в статическом – только при автоматическом управлении, за исключением КИМ с жесткими измерительными наконечниками, устанавливаемыми вместо ИГ. Такие наконечники используются в малогабаритных ручных КИМ невысокой точности. Управление подвижными узлами КИМ в автоматическом режиме осуществляется от ЭВМ, а в ручном – от специального пульта. ЭВМ, кроме управления измерительными органами КИМ, выполняет обработку данных измерения. Эта обработка включает следующие операции:

1. Определение координат и поправок отдельных измерительных наконечников измерительных головок. Необходимую информацию для этих расчетов получают измерением калибратора – аттестованной с высокой точностью образцовой детали (сферы или куба), сохраняющей в процессе измерения неизменное положение относительно СКМ. Выполнение данной операции необходимо после каждого изменения параметров или положения ИГ относительно узла КИМ, на котором она закреплена. Результаты вводятся в память ЭВМ и учитываются при расчетах геометрических параметров деталей.

2. Формирование систем координат детали, которые необходимы для правильной оценки результатов измерения, возможности переставлять деталь в процессе измерения, не теряя при этом единства измерений. СКД может быть сформирована относительно любых геометрических элементов детали, однозначно определяющих положение и ориентацию СКД в СКМ. Число СКД не ограничивается.

3. Выполнение расчетов геометрических параметров деталей. При этом учитываются координаты и параметры отдельных измерительных наконечников ИГ, производится трансформация результатов, связанная с образованием нескольких систем координат.

4. Выполнение статистической обработки результатов измерений.

5. Подготовка данных для автоматического управления с учетом уже выполненных операций и полученных результатов измерения.

6. Представление результатов измерения в необходимом объеме и в удобном для пользования виде [3–5].

Если необходимо измерить одну оригинальную деталь, и другие детали в дальнейшем поступать не будут, то измерение выполняется в полуавтоматическом режиме при диалоге с ЭВМ. В случае если необходимо измерять партию одинаковых деталей или деталей, которые периодически будут повторяться при изготовлении, то измерения производятся в автоматическом режиме. Для реализации этого режима должна быть составлена управляющая программа на конкретный типоразмер детали с конкретными требованиями к параметрам ее геометрической точности.

Универсальность КИМ как стационарных, так и мобильных достигается развитым программно-математическим обеспечением с большим набором модульных программ для измерения деталей с различными простыми и сложными поверхностями; системой измерительных головок касания с большим набором щупов различной конфигурации. Измерительные головки оснащаются наборами измерительных наконечников, обеспечивающих возможность контроля максимально большого числа геометрических параметров при одной установке детали, а также контроля диаметров отверстий, концентричности, межосевых расстояний и т. п.

Применение координатно-измерительных машин на производстве способствует решению многих метрологических задач, таких как: оперативное измерение геометрических размеров простых и сложных деталей, включая детали, измерение которых может вызвать затруднение и потребовать больших материальных и физических затрат. КИМ играют важную роль при производстве высокоточных деталей в аэрокосмической отрасли. И дальнейшее их развитие направлено на более высокий уровень контроля точности параметров выпускаемой продукции и автоматизацию контроля измерений.

Библиографические ссылки

1. Гапшис А. А. [и др.]. Координатные измерительные машины и их применение. М. : Машиностроение, 1988.

2. 3D CONTROL Координатно-измерительные машины (КИМ) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.uralincocentr.ru/pdf/KIM%202/krupnogabaritCARL%20ZEISS.pdf> (дата обращения: 07.02.2020).

3. Разработка информационно-измерительных и управляющих систем координатно-измерительных машин и измерительных роботов [Электронный ресурс] // Библиотека диссертаций и авторефератов DsLib.net. URL: <http://www.dslib.net/izmerit-sistemy/razrabotka-informacionno-izmeritelnyh-i-upravljajuwih-sistem-koordinatno.html> (дата обращения: 09.02.2020).

4. Братухин А. Г. Координатно-измерительные машины и комплексы [Электронный ресурс] // Наука и технологии в промышленности : науч.-техн. журн. URL: http://nt.ainrf.ru/NT_3_2011/036.pdf (дата обращения: 11.02.2020).

5. Васильева А. А., Абляз Т. Р. Исследование процесса измерения корпусных деталей на координатно-измерительной машине CARL ZEISS CONTRA G2 [Электронный ресурс] // Вестник Самар. гос. аэрокосмич. ун-та. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protseessa-izmereniya-korpusnyh-detaley-na-koordinatno-izmeritelnoy-mashine-carl-zeiss-contura-g2> (дата обращения: 14.02.2020).

© Карабонцева М. В., Карабонцева Н. В., 2020

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ КОРПУСНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Т. Г. Орешенко, Е. В. Пащенко

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 гидравлических и пневматических, а также порядок проведения испытаний. Показана необходимость автоматизации процесса с целью снижения рисков аварийных ситуаций.

Ключевые слова: испытания, корпусные изделия, отказы, контроль качества.

Темпы развития современной промышленности требуют внедрения новых технологий изготовления и испытаний. Так, увеличение количества производимого нефтегазоперерабатывающего, емкостного, теплообменного оборудования приводит и к увеличению загрузки испытательных стендов. Каждый этап серийного производства характеризуется проведением соответствующих испытаний на основе физических и статистических методов выборочного и сплошного видов контроля.

Гидравлические и пневматические испытания – наиболее часто используемые виды неразрушающего контроля, которые проводятся с целью проверки прочности и герметичности корпусных изделий такого оборудования.

Испытание на герметичность – операция, выполняемая для определения микронеплотностей в основном металле и неразъемных соединениях, и микротрещин в разъемных соединениях, находящихся под давлением контрольного газа, с последующим определением величины утечки.

Испытание на прочность – необходимая операция, выполняемая с целью контроля качества изготовления изделия, находящегося под давлением контрольной жидкости в течение времени [1].

Способы испытаний на герметичность и прочность различны: масс-спектрометрический, манометрический, пузырьковый, галогенный и многие другие. Они делятся по принципу регистрации пробного вещества, типу контрольно-измерительного оборудования и условиям реализации методов [2].

Испытания изделий на герметичность производят давлением воздуха или инертного газа. До этого они обязательно должны быть проверены на прочность. Если в процессе испытания воздухом окажется, что соединения корпуса недостаточно прочны, то может произойти их разрыв с разрушительными последствиями, поэтому для испытаний изделий на прочность применяют воду или контрольную жидкость. Использование жидкости при гидравлических испытаниях обусловлено почти полной ее несжимаемостью, что исключает возможность взрыва при недостаточной прочности испытуемого изделия [3].

В период подготовки испытания необходимо стремиться к тому, чтобы контрольная жидкость в изделии как можно меньше времени находилась в статическом состоянии. При возникновении задержек в производстве работ по испытанию, приводящих к превышению принятого в расчете времени испытания, следует возобновить прокачку

контрольной жидкости. Допускается осуществлять прокачку жидкости в период между испытаниями на прочность и герметичность, а также в период, когда изделие находится не под испытательным давлением.

После испытания корпуса из него необходимо удалить контрольную жидкость в следующем порядке:

первый этап – предварительный слив жидкости под давлением газа через патрубки, заранее установленные в местах закачки жидкости;

второй этап – продувка корпуса давлением газа или воздуха.

Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если во время их проведения отсутствуют:

- падение давления по манометру;
- пропуски испытательной среды (течь, потение, пузырьки воздуха или газа) в сварных соединениях и на основном металле;
- признаки разрыва;
- течи в разъемных соединениях;
- остаточные деформации [4].

Дефекты, выявленные и отмеченные при осмотре корпуса, следует устранить после снижения избыточного давления в изделии до нуля. После устранения дефектов должно быть произведено повторное испытание [5].

Автоматизация технологического процесса проведения испытаний позволяет осуществлять работу с помощью различного рода автоматических систем, выполняющих измерение параметров, обработку и выдачу информации без участия человека. За счет этого будет возможно снизить риски возникновения аварийных ситуаций при проведении испытаний, ускорить время проведения подготовки к испытаниям, проведения самих испытаний, и проведения мероприятий, которые следуют после проведения испытаний, а также исключить человеческий фактор совершения ошибок. Арматура стендов должна допускать аварийное выключение двигателя и прекращение подачи рабочего тела с нескольких автономных пультов, дублированных между собой и находящихся в различных помещениях, соединенных средствами связи. Наряду с этим необходимо иметь автоматическую систему аварийного выключения, реагирующую на резкое падение давления в подводящих магистралях и т. п.

Кроме того, при параметрических испытаниях может быть автоматизирован процесс управления регулятором расхода при снятии рабочей характеристики. С этой целью нужно ввести программное устройство, управляющее положением регулятора по расчетной программе. Задаваемые программой положения регулятора предварительно определяются при тарировке таким образом, чтобы приращение или уменьшение подачи (расхода жидкости) были равномерными. В зависимости от параметров испытываемых насосов могут быть разработаны различные программы испытаний [6–7].

Необходимость автоматизации лабораторной установки или стенда для испытаний может возникать на различных жизненных циклах их существования. Наиболее правильный вариант предусматривает решение задачи автоматизации на самом раннем этапе – когда стенд или установка еще не существуют в металле, а имеются лишь какие-то задумки, воплощенные (или частично воплощенные) на бумаге. Но в жизни чаще встречается вариант, когда стенд или установка уже существуют и работают, при этом они исправно выполняют свои функции, причем вполне добротное «железо» установки укомплектовано давно морально (а зачастую и физически) устаревшими средствами измерения и контроля, используются примитивные средства управления установкой. Получение результата на таких установках сопряжено с большим объемом работ и огромной трудоемкостью. Задача автоматизации на таких стендах часто заключается не только в замене устаревшего оборудования управления и контроля на современное,

но и в замене алгоритмов управления и сбора информации, последующей обработке полученной информации и формировании на основании полученной информации управляющего решения.

Все эти современные технологии имеют универсальный механизм реализации, заключающийся в том, что основным мозговым центром, куда стекается вся собираемая со стенда информация, происходит ее обработка, формируются управляющие сигналы, является компьютер, включаемый в состав стенда.

Соответственно задача автоматизации стенда распадается на ряд типовых процедур:

- 1) получение компьютером информации со стенда об интересующих параметрах;
- 2) выполнение определенных действий с полученной информацией расчет каких-либо характеристик;
- 3) формирование управляющего воздействия в виде некоторого сигнала и его передача на стенд;
- 4) преобразование сигнала управляющего воздействия в некоторое конкретное физическое действие, включение или отключение какого-то элемента, переключение на другой режим и т. д.

С учетом изложенного можно сделать вывод, что автоматизация процесса испытаний является актуальной для повышения качества производимой продукции.

Библиографические ссылки

1. ОСТ 92-4291–74. Методы гидравлических и пневматических испытаний изделий на прочность и герметичность. Общие положения. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Испытания на прочность и проверка на герметичность [Электронный ресурс] // Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Очистка полости и испытание. URL: http://www.znaytovar.ru/gost/2/VSN_01188_Stroitelstvo_magistr.html (дата обращения: 13.02.2020).
3. Испытания аппаратов на прочность и герметичность [Электронный ресурс] // Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <http://chem21.info/info/1511534/> (дата обращения: 13.02.2020).
4. Испытания на прочность и проверка на герметичность. [Электронный ресурс] // Икапласт. Трубный завод. URL: http://icaplast.ru/docs/tech/page_159/ (дата обращения: 13.02.2020).
5. Испытания на прочность и проверка на герметичность. [Электронный ресурс] // Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия. URL: <http://zakonbase.ru/content/part/462552?print=1> (дата обращения: 13.02.2020).
6. Яременко О. В. Испытания насосов. М. : Машиностроение, 1976.
7. 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.
8. 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.

© Орешенко Т. Г., Пашенко Е. В., 2020

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ОТ КОНТРАФАКТНОЙ ПРОДУКЦИИ

А. С. Максютин*

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: Ellis1998@yandex.ru

Рассматриваются современные методы борьбы с контрафактной продукцией. Показаны основные виды экспертиз, направленных на выявления контрафакции товара.

Ключевые слова: контрафактная продукция, технические экспертизы.

Контрафакцией называют незаконное использование отдельными организациями известных на рынке фирменных товарных знаков с целью получения доходов от производства и реализации товаров, схожих с товарами известных фирм-производителей, в целях введения в заблуждение покупателя, ведения «дела» под чужим именем, незаконное использование чужого патента при изготовлении и продаже различного рода товаров.

Контрафактная продукция, как правило, по качеству хуже оригинальной. При использовании такого товара значительно повышаются риски поломки оборудования, что недопустимо в аэрокосмической отрасли. Объём контрафактных изделий, включая электронные компоненты, по данным Организации экономического сотрудничества и развития составлял 481 миллиард долларов в 2016 году. К 2019 году эта цифра возросла до 500 миллиардов [1].

Борьба с контрафактной продукцией активно ведется на сегодняшний день. Если говорить, о России, то уже в марте 2020 года планируется принять 3 новых национальных стандарта ГОСТ Р. Будет создана система выявления поддельной промышленной продукции – запчастей и агрегатов для авиации, железнодорожной и автомобильной техники [2].

По расчётам специалистов, контрафакт и пиратство, связанные с нарушением авторских прав, приводят к потере около 2,5 миллионов рабочих мест в мире. Согласно данным Американского Офиса Патентов и Торговых Марок, подделка товаров и пиратство в мире составляют от 8 % и это относится ко всем категориям товаров, причём фальсификация изделий электроники занимает 4-е место. Например, появление нескольких клонированных версий смартфона *Apple i-Phone* является подделкой на системном уровне в странах Азии. В частности, согласно данным агентства Рейтер, порядка 80 процентов контрафактной продукции в мире принадлежит Китаю. В странах Европы же можно отметить прогресс в борьбе с контрафактной продукцией.

Проверки на контрафакцию продукции необходимы прежде всего для тех случаев, когда закупка должна выполняться не у уполномоченных поставщиков или возникают сомнения в аутентичности изделий. Существует целый ряд методов снижения рисков получения контрафактных электрических изделий. Эти методы не обеспечивают получение достоверных отличий аутентичных и контрафактных изделий во всех случаях, но при должном использовании помогут минимизировать риск применения контрафактных изделий в производстве [3].

Если рассматривать основные причины распространения контрафактной продукции, то можно выделить следующие.

1. Слабое законодательство и недостаточное его соблюдение.
2. Низкая озабоченность проблемами защиты интеллектуальной собственности.
3. Развитая технология и возросшие возможности фальсификации.
4. Цепочки поставок в глобальных масштабах с участием большого числа партнеров.
5. Торговля через Интернет, позволяющая продавцам и покупателям осуществлять быстрые торговые сделки, не встречаясь.

Переходя к теме контрафактной продукции на рынке электронных устройств следует сказать о том, какие устройства будут считаться контрафактом. Итак, поддельными электронными компонентами являются следующие.

1. Компоненты, изготовленные или распространяемые с нарушением прав интеллектуальной собственности, копирайта или торговых марок.
2. Заменители или неразрешённые копии.
3. Компонент, в котором использованные материалы или его исполнение изменены без уведомления.
4. Нестандартный компонент, искажённый изготовителем или поставщиком с целью обмана покупателя или введения его в заблуждение, чтобы он поверил, что компонент является подлинным и законным.
5. Дефектные компоненты, забракованные изготовителем.
6. Компоненты, выпускаемые по контракту для изготовителя компонентов, но продаваемые без его разрешения.
7. Обновлённые или предварительно использованные компоненты.
8. Перемаркированные компоненты с целью скрыть их отличие от оригинальных (название изготовителя, номер, дата изготовления, и т. д.).
9. Компоненты, имеющие ошибочную или поддельную сопроводительную документацию.

Напротив, не являются поддельными: компоненты, прошедшие дополнительные тесты с целью выявления тех из них, которые выдерживают более высокие технические требования, чем предусмотренные и гарантированные изготовителем в их спецификациях. Подобная практика отбора компонентов используется, в частности, для космической аппаратуры и изделий спецназначения.

Существует также такое понятие как «подозрительные компоненты». Подозрительным является компонент, у которого в результате визуального контроля, тестов или иной информации имеется подозрение, что он, возможно, не является подлинным. Из-за недостаточных доказательств такой компонент может быть квалифицирован как «подозрительный» с последующей проверкой его подлинности.

Поддельные электронные компоненты имеют широкий диапазон: от недорогих пассивных компонентов до дорогостоящих элементов памяти и микропроцессоров. Большинство поддельных компонентов составляют интегральные схемы.

Использование поддельных компонентов имеет крайне высокую истинную «цену» применения. Воздействие поддельных компонентов может оказаться крайне разрушительным. Поддельные копии компонентов в лучшем случае обладают низким качеством и надёжностью, а в худшем – вовсе не способны нормально функционировать. Правильная оценка масштабов проблемы и истинного ущерба заключается не только в определении стоимости заведомо дефектных компонентов, подлежащих замене. Она также включает в себя и много других серьёзных и дорогостоящих последствий.

Наиболее распространённым способом подделки компонентов является их искажённая маркировка. Ведь вместо изготовления сложных копий компонентов предпоч-

тительнее и проще изменить маркировку корпуса компонента и его упаковки. Такие компоненты внешне выглядят похожими на подлинные, но могут иметь фальшивые ярлыки, повреждённый или отсутствующий чип, а также использовать материалы более низкого качества.

Искажение маркировки зачастую трудно опознать. Оно делается с целью выдать компонент за более совершенный. Например, микропроцессор с более высокой скоростью, элемент памяти большего объёма, более широкий температурный диапазон и т. д. Подделки становятся всё более разнообразными, и чтобы выявить их, требуется во многих случаях проведение обширных тестов.

Крайне важно обнаружить поддельный компонент на самой ранней стадии – в процессе входного контроля, задолго до того, как поддельные компоненты попадут на производственные линии. В противном случае, изготовитель изделия неминуемо окажется под воздействием сурового правила «X10», в соответствии с которым ущерб составит:

- обнаружение при входном контроле – «X»;
- обнаружение в составе сборки – «10X»;
- обнаружение в составе изделия – «100X»;
- обнаружение в изделии у дистрибьютора – «1000X»;
- обнаружение в изделии у заказчика – «10000X»;

Обычно расследование начинается, когда обнаружена неисправность в изделии, но на данной стадии трудно определить был ли компонент дефектным, был поврежден во время сборки или вовсе оказался поддельным.

Для обеспечения надёжного контроля рекомендуется подготовить специальную папку для каждого отдельного компонента или для семейств более простых компонентов, таких как резисторы, конденсаторы и т. п. Папка должна содержать информацию от каждого разрешённого изготовителя для данного компонента:

- спецификацию (data sheet) компонента и его статус;
- установленный изготовителем порядок построения номера компонента;
- порядок и содержание маркировки на внешних ярлыках упаковки;
- способ и содержание маркировки компонента;
- вид упаковки с количеством компонентов в них;
- рекомендуется иметь подлинный образец компонента каждого изготовителя.

На начальных этапах проверки контрафактной продукции осуществляется визуальный контроль компонентов:

- тщательная проверка сопроводительной документации;
- проверка полученных упаковок с компонентами в части возможных внешних повреждений, а также признаков ложных или подозрительных ярлыков и бар-кодов;
- проверка на компонентном уровне после вскрытия упаковки.

В случае подозрения на контрафакт проводится инспекция с проверками подлинности компонента возможными оптическими средствами в соответствии с детальным перечнем:

- лого изготовителя;
- номер компонента;
- способ маркировки и её содержание;
- дата изготовления.

Особо тщательное внимание должно быть обращено на любые признаки отклонений от подлинности и целостности компонента. Это могут быть механические аномалии, искажённое лого, разрывы в маркировке, ошибки в написании, трещины, царапины, вмятины, наличие коррозии и т. п.

Однако следует сказать, что нельзя использовать лишь визуальные проверки, ведь у них существует ряд недостатков. Поэтому проводится еще ряд экспертиз. Одной из них является функциональное тестирование. Данная проверка представляет собой полное тестирование функциональных требований и основных параметров компонента. Она проводится в диапазоне температур, рекомендуемых самим изготовителем или в установленных стандартами крайних диапазонах температур в зависимости от области применения изделия. В случаях использования компонентов в изделиях военного и космического применения данная проверка осуществляется в условиях повышенных требований к температурному диапазону и механическим воздействиям.

Существует такая проверка, как анализ используемых материалов. Данная проверка проводится с целью убедиться в идентичности используемых материалов для 4-х составляющих компонента:

- чипа;
- выводов компонента;
- соединений чипа с выводами;
- корпуса.

Используются различные типы спектроскопии для определения материалов, их химического состава и кристаллической структуры, а также их соответствия количественным и качественным критериям подлинного компонента изготовителя.

Существует рентгеновская проверка или «*X-ray*». Проверка выполняется, чтобы выявить очевидность контрафакта внутри компонента при помощи анализа размера чипа и его соединения с выводами компонента. Более того рентгеновский снимок может также обнаружить возможные расслоения внутри компонента. Это крайне важно, ведь доказательства, что компонент является поддельным, могут находиться внутри и их обнаружение требует рентгеновской проверки.

Однако «*X-ray*» может сказать лишь о размерах чипа. Поэтому часто применяется проверка акустическим сканированием. Проверка проводится специальным оборудованием с использованием ультразвука. Выявляются различные аномалии и скрытые дефекты в корпусе компонента, его конструкции и материалах:

- пустоты;
- трещины в чипе или корпусе;
- нарушения в покрытиях;
- расслоения.

Указанные проверки производятся в соответствии со стандартом *J-STD-035*. Целостность корпуса очень важна, особенно для изделий повышенной надёжности с требованиями повышенных температур. Отслоение пластмассы корпуса от чипа может нанести механический вред силиконовому чипу. Пустоты в корпусе могут стать зоной концентрации влажности, а расслоения в месте выводов способствует проникновению загрязнений из окружающей среды. Поэтому проводится внутренняя визуальная проверка посредством *DPA – Destructive Physical Analysis*. При данной проверке образцы компонентов расщепляются и проводится их внутренний анализ посредством оптического контроля. Чип проверяется на наличие дефектов, на соответствие логотипа изготовителя чипа логотипу на корпусе компонента. Топография чипа также анализируется, чтобы убедиться, что она соответствует очертаниям и контуру дизайна фирмы-изготовителя. Компонент помещается под сильным микроскопом и сверяется с детальной спецификацией изготовителя. В случаях недостаточной подтверждающей информации необходимы инженерная консультация и дополнительные методологии в процессе выявления контрафактных или клонируемых компонентов. Метод используется не только для подтверждения контрафакта, но и для выяснения причин неисправности компонента, при этом керамические корпуса расщепляются механически, а пластмассовые – химически.

Отдельное внимание стоит уделить проверке сканированием электронным микроскопом (*SEM*). Сканирующая электронная микроскопия позволяет получать изображения с высоким разрешением и большой глубиной резкости на поверхности образца и на его поверхности. *SEM* является одним из наиболее широко используемых аналитических инструментов благодаря чрезвычайно подробным изображениям, которые он может быстро предоставить. В сочетании с вспомогательной энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (ЭДС) детектор *SEM* также предлагает элементную идентификацию почти всей периодической таблицы [4]. *SEM* позволяет получить изображения поверхности образца с очень высоким разрешением, содержащие элементы размером менее 1 нм, что дает увеличение примерно в 250 раз большее по сравнению с лучшими световыми микроскопами. Такая проверка является одной из форм визуального контроля и заключается в сличении поверхности проверяемого изделия, относящегося к исследуемой партии, и поверхности изделия, заведомо аутентичного, принадлежащего к той же самой партии или партии с близкими кодами даты и партии, если это возможно. Целью является получение подтверждения о наличии изменений обработки поверхности или удаления маркировки, выполненного микропескоструйной установкой.

Также широко применяется проверка сканированием акустическим микроскопом (*SAM*). Работа акустического, или ультразвукового микроскопа основана на принципе, который применяется в медицине и известен как «ультразвуковое исследование» (УЗИ). Сканирующий зонд перемещается в связующей жидкости (как правило, это вода или водный раствор) параллельно области, внутреннюю структуру которой необходимо исследовать. Это значит, что исследуемый объект не подвергается никаким деструктивным воздействиям со стороны сканирующей системы. Для гидрофобных материалов существуют решения, которые позволяют производить сканирование без погружения образца в жидкость [5].

Существует ряд рекомендаций по снижению рисков приобретения поддельных компонентов.

1. Покупать компоненты только от изготовителей или через их официальных дистрибьюторов.

2. Создать и поддерживать справочную библиотеку известных подлинных маркировок для всех используемых компонентов.

3. В исключительных случаях при покупке компонентов у независимых дистрибьюторов или брокеров необходимо:

- требовать документы, позволяющие проследить истинное происхождение покупаемого компонента;

- при невозможности получить указанные документы рекомендуется обратиться к оригинальному изготовителю с фотокопией компонента и его этикеток для подтверждения, что полученный компонент не фальсифицирован;

- целесообразно провести также тщательную визуальную проверку и сравнение с аналогичным добротным компонентом того же изготовителя;

- желательно произвести функциональное тестирование компонента, а в особо подозрительных случаях и анализ с помощью независимой специализированной фирмы.

4. Необходимо планировать процесс производства электронного изделия таким образом, чтобы избежать или существенно сократить вероятность покупки компонентов у независимых дистрибьюторов и брокеров. Однако практически невозможно полностью избежать таких случаев, в особенности для компонентов, производство которых прекращено. Поэтому рекомендуется ограничить их число и лишь пользоваться услугами проверенных дистрибьюторов, обладающих хорошей репутацией. При этом необходимо периодически инспектировать их, обращая особое внимание:

- на порядок приобретения ими компонентов;

– условия хранения, особенно относительно компонентов, чувствительных к повышенной влажности и статическому электричеству;

– маркировку компонентов;

– наличие сертификатов соответствия;

– порядок ведения сопроводительной документации.

5. В случае если обеспечение компонентами возложено на контрактного производителя или иного участника цепочки поставок, необходимо строго контролировать их источники приобретения компонентов, а также методику закупок и входного контроля.

6. Необходимо проявлять особую бдительность и меры предосторожности в тех редких случаях, когда предлагаемые цены на компоненты существенно ниже рыночных.

7. При покупке компонентов на аукционах через интернет следует производить их оплаты только после получения и проверки их подлинности и исправности.

8. Заказы на покупку компонентов и контракты должны включать ряд дополнительных и весьма важных требований:

– все компоненты должны поставляться в оригинальной упаковке изготовителя;

– соответствующие правила оплаты и возврата компонентов, чтобы защитить интересы покупателя в случае проблем;

– материальная ответственность при необходимости проведения тестов [6].

Таким образом, на сегодняшний день существуют и активно развиваются различные способы проверки продукции на контрафакцию. Это особенно важно ввиду того, что при использовании такой продукции в авиации или аэрокосмической отрасли может привести к отказу оборудования и, как следствие, к огромным финансовым потерям.

Библиографические ссылки

1. Конрад А. Объем мирового рынка контрафакта. Quibbl [Электронный ресурс]. URL: <https://quibbl.com/novosti/obem-mirovogo-rynka-kontrafakta-461-mlrd/32413/> (дата обращения: 31.01.2020).

2. Волобуев А. В. По всей строгости стандарта: как авиастроение защитят от контрафакта [Электронный ресурс] // Известия. URL: <https://iz.ru/942262/aleksandr-volobuev/po-vsei-strogosti-standarta-kak-aviastroenie-zashchitiat-ot-kontrafakta> (дата обращения: 31.01.2020).

3. ГОСТ Р 57880–2017. Система защиты от фальсификации и контрафакта. Электронные изделия. Предотвращения получения, методы обнаружения, сокращение рисков применения и решения по использованию фальсифицированной и контрафактной продукции [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200157537> (дата обращения: 27.08.2019).

4. Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ). EAG Laboratories [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eag.com/ru/techniques/imaging/scanning-electron-microscopy-sem/> (дата обращения: 01.02.2020).

5. Бриггс А., Колосов О. В. Акустическая микроскопия [Электронный ресурс] / Университет Оксфорда. 2010. URL: http://www.est-nano.ru/technology/akusticheskaja_mikroskopija/6 (дата обращения: 03.02.2020).

6. Шапиро Л. Контрафактная электроника [Электронный ресурс] / All4Boom. URL: <https://present5.com/kontrafaktnaya-elektronika-ugroza-risk-i-mery-predostorozhnosti/> http://www.est-nano.ru/technology/akusticheskaja_mikroskopija/6 (дата обращения: 12.02.2020).

**«КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

УДК 630.36

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Е. В. Сугак, О. В. Бразговка

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

Рассматривается определение вероятности состояния готовности при различных сочетаниях показателей надежности и параметров системы технического обслуживания и ремонта для установившегося и неуставившегося режимов эксплуатации. Полученные решения дают возможность решать задачи управления техническим состоянием, оптимизации надежности и безопасности потенциально опасных технических объектов.

Ключевые слова: техническое обслуживание, технический риск, надежность, безопасность.

Особенностью развития техногенной среды за последнее время является принципиальное изменение ее системных свойств – возникновение рисков, обусловленных длинными причинно-следственными связями, междисциплинарный характер рисков, глобальные изменения техногенного характера, высокая чувствительность к «слабым воздействиям», сокращение возможностей прогнозирования развития аварий и катастроф традиционными методами и другие [1; 2]. Это с неизбежностью приводит к необходимости использования системного подхода к проектированию и эксплуатации потенциально опасных технических объектов, анализу техногенных и экологических рисков, промышленной и экологической безопасности с использованием методов системного анализа, теории случайных процессов, теории надежности, исследования операций, теории принятия решений, многокритериальной оптимизации, современных вычислительных и информационных технологий [2–11].

Оптимизация техногенного риска и определение оптимальных параметров системы технического обслуживания потенциально опасных технических объектов определяется видом и сложностью самого объекта, характером и важностью выполняемых функций, числом и видом его возможных состояний, тяжестью последствий отказов, а также стратегией эксплуатации и технического обслуживания [12–14].

Для потенциально опасных технических объектов с периодическим техническим обслуживанием возможны три состояния и переходы четырех видов (рис. 1) [15; 16]:

– из работоспособного состояния (состояния готовности) 1 в состояние технического обслуживания 2 с периодичностью t_{TO} и, соответственно, интенсивностью переходов $\lambda_{12} = 1/t_{TO}$;

- из состояния готовности 1 в состояние отказа 3 с интенсивностью переходов, равной интенсивности отказов $\lambda_{13} = \lambda$;
- из состояния технического обслуживания 2 в состояние готовности 1 с интенсивностью, которая определяется продолжительностью технического обслуживания $\lambda_{21} = 1/\tau_{TO}$;
- из состояния отказа 3 в состояние технического обслуживания 2 (переход, обусловленный обнаружением скрытого отказа при техническом обслуживании) с интенсивностью переходов λ_{32} .

Единственным работоспособным состоянием такого объекта является состояние готовности 1 и поэтому основным показателем его надежности можно считать вероятность этого состояния P_1 . При анализе безопасности основным параметром является вероятность отказа (технический риск) $Q = P_3$.

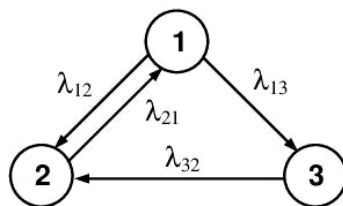


Рис.1. Граф состояний объекта с периодическим техническим обслуживанием

Параметры t_{TO} , λ , τ_{TO} и, соответственно, интенсивности переходов λ_{12} , λ_{13} , λ_{21} могут быть получены по результатам испытаний и эксплуатации или задаются регламентом технического обслуживания. Для нахождения неизвестной интенсивности переходов λ_{32} можно воспользоваться свойствами марковских процессов с непрерывным временем [6].

В частности, так как переход 3–2 единственный, то его вероятность $p_{32} = 1$, и, очевидно, $t_3 = t_{TO} - t_{13}$, а $t_{13} = t_1$, тогда:

$$\lambda_{32} = p_{32}/t_3 = 1/t_3 = 1 / (t_{TO} - t_{13}) = 1 / (t_{TO} - t_1). \quad (1)$$

Кроме того $\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{13} = 1/t_{TO} + \lambda$ и для простейшего потока отказов

$$t_1 = \int_0^{\infty} [1 - F_1(t)] dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_1 t) dt = \int_0^{\infty} \exp\left[-\left(\lambda + \frac{1}{t_{TO}}\right)t\right] dt = \frac{1}{\lambda + \frac{1}{t_{TO}}}. \quad (2)$$

Тогда

$$t_3 = t_{TO} - t_1 = t_{TO} - \frac{1}{\frac{1}{t_{TO}} + \lambda}, \quad (3)$$

и в соответствии с формулой (1)

$$\lambda_{32} = \frac{1}{t_{TO} - \frac{1}{\frac{1}{t_{TO}} + \lambda}} = \frac{1 + \lambda t_{TO}}{\lambda t_{TO}^2}. \quad (4)$$

Система дифференциальных уравнений для ориентированного графа состояний на рис. 1 имеет вид [15; 16]:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) = -\left(\lambda + \frac{1}{t_{TO}}\right)P_1(t) + \frac{1}{\tau_{TO}}P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{32}P_3(t) = \frac{1}{t_{TO}}P_1(t) - \frac{1}{\tau_{TO}}P_2(t) + \frac{1 + \lambda t_{TO}}{\lambda t_{TO}^2}P_3(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{32}P_3(t) = \lambda P_1(t) - \frac{1 + \lambda t_{TO}}{\lambda t_{TO}^2}P_3(t). \end{cases} \quad (5)$$

Так как система уравнений (5) линейно зависима, то для ее решения одно из уравнений необходимо заменить нормирующим условием

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1. \quad (6)$$

Кроме того, необходимо задаться начальными условиями, например $P_1(0) = 1$, $P_2(0) = P_3(0) = 0$.

Решение системы уравнений (5) относительно вероятности состояния готовности P_1 может быть получено в виде [17]:

$$\begin{aligned} P_1(t) = & \frac{\lambda_{13}^2 + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 - \lambda_{32}\lambda_{13} - \lambda_{32}\lambda_{12} - \lambda_{21}\lambda_{13} + \lambda_{21}\lambda_{12} -}{[-\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 -} \\ & -\lambda_{13}(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} -} \\ & -2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} \times \\ & -\lambda_{12}(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} \\ & (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} \\ & \exp\left\{\frac{1}{2}t[-\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \right. \\ & \left. + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}] + \right. \\ & + \frac{\lambda_{13}^2 + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 + (\lambda_{13} + \lambda_{12})(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 -} \\ & [-\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 -} \\ & -2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} -} \\ & -2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}] \times \\ & \left. -(\lambda_{32}(\lambda_{13} + \lambda_{12}) + \lambda_{21}(\lambda_{13} - \lambda_{12}))\right) \\ & (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} \times \\ & \exp\left\{-\frac{1}{2}t[\lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} \right. \\ & \left. + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}] - \right. \\ & \left. - \frac{4\lambda_{32}}{[-\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 -} \right. \end{aligned}$$

$$\frac{\frac{\lambda_{21}}{-2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}} \times}{1} \times \frac{1}{[\lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}]} \cdot \quad (7)$$

Результаты расчетов показывают, что вероятность состояния готовности и, соответственно, технический риск определяются, в первую очередь, интенсивностью отказов объекта и периодичностью технического обслуживания (см. таблицу).

Кроме того, результаты расчетов позволяют оценить продолжительность переходных процессов («период релаксации»), в течение которой вероятности состояний стабилизируются до некоторых «финальных» вероятностей, и, соответственно, возможности использования для расчетов стационарной модели (рис. 2).

Для установившегося режима эксплуатации система дифференциальных уравнений (5) вырождается в систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1 + \lambda_{21}P_2 = -(t_{TO}^{-1} + \lambda)P_1 + \tau_{TO}^{-1}P_2 = 0, \\ \lambda_{12}P_1 - \lambda_{21}P_2 + \lambda_{32}P_3 = t_{TO}^{-1}P_1 - \tau_{TO}^{-1}P_2 + \left[t_{TO} - (t_{TO}^{-1} + \lambda)^{-1} \right]^{-1} P_3 = 0, \\ \lambda_{13}P_1 - \lambda_{32}P_3 = \lambda P_1 - \left[t_{TO} - (t_{TO}^{-1} + \lambda)^{-1} \right]^{-1} P_3 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

При дополнении системы (8) нормирующим условием $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ решения для финальных вероятностей имеют следующий вид:

$$P_1 = \frac{t_{TO}(1 + t_{TO}\lambda)}{\lambda^2 t_{TO}^2 \tau_{TO} + \tau_{TO} + 2\lambda t_{TO} \tau_{TO} + \lambda^2 t_{TO}^3 + t_{TO} + \lambda t_{TO}^2}, \quad (9)$$

$$P_2 = \frac{\tau_{TO}(2\lambda t_{TO} + \lambda^2 t_{TO}^2 + 1)}{\lambda^2 t_{TO}^2 \tau_{TO} + \tau_{TO} + 2\lambda t_{TO} \tau_{TO} + \lambda^2 t_{TO}^3 + t_{TO} + \lambda t_{TO}^2}, \quad (10)$$

$$P_3 = \frac{\lambda^2 t_{TO}^3}{\lambda^2 t_{TO}^2 \tau_{TO} + \tau_{TO} + 2\lambda t_{TO} \tau_{TO} + \lambda^2 t_{TO}^3 + t_{TO} + \lambda t_{TO}^2}. \quad (11)$$

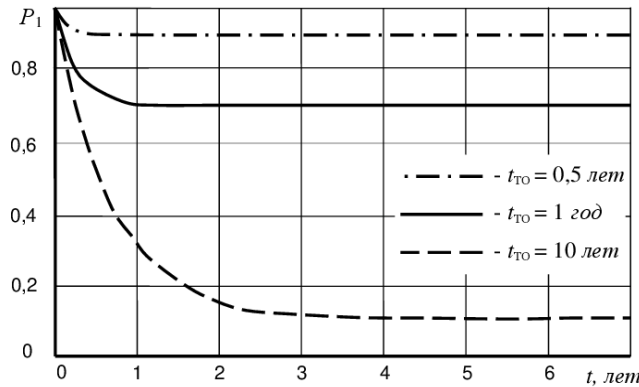


Рис. 2. Зависимость вероятности состояния готовности от срока эксплуатации:

$$\tau_{TO} = 10 \text{ ч}, \lambda = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$$

Вероятность состояния готовности объекта ($\tau_{ТО} = 10$ ч)

$t_{ТО}$, лет	λ , $ч^{-1}$	Срок эксплуатации t , лет						Финальная вероятность
		0,1	0,5	1	2	5	10	
0,5	10^{-4}	0,9358	0,8826	0,8798	0,8797	0,8797	0,8797	0,8797
	10^{-5}	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958
	10^{-6}	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977
1	10^{-4}	0,9232	0,7728	0,7228	0,7093	0,7086	0,7086	0,7086
	10^{-5}	0,9938	0,9918	0,9918	0,9918	0,9918	0,9918	0,9918
	10^{-6}	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
2	10^{-4}	0,9187	0,7020	0,5724	0,4914	0,4734	0,4724	0,4724
	10^{-5}	0,9920	0,9785	0,9747	0,9739	0,9739	0,9739	0,9739
	10^{-6}	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991

Некоторые результаты расчетов по формулам (9)–(11) приведены на рис. 3 и 4 в виде графиков зависимости вероятности состояния готовности P_1 и вероятности неработоспособного состояния $P_2 + P_3$ от периодичности технического обслуживания $t_{ТО}$ при различных значениях интенсивности отказов λ и длительности технического обслуживания $\tau_{ТО}$.

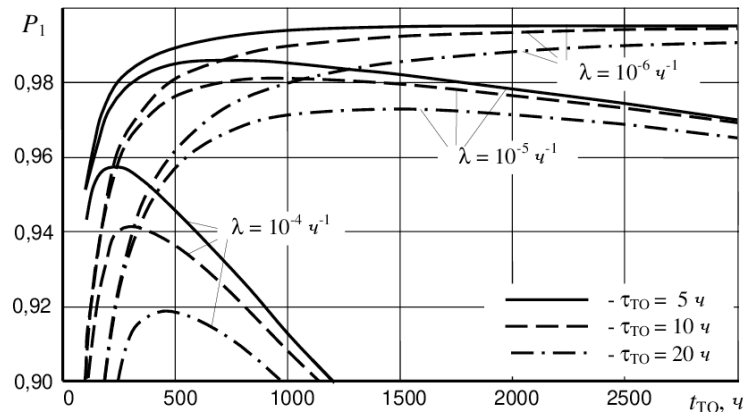


Рис. 3. Зависимость вероятности состояния готовности от периодичности технического обслуживания

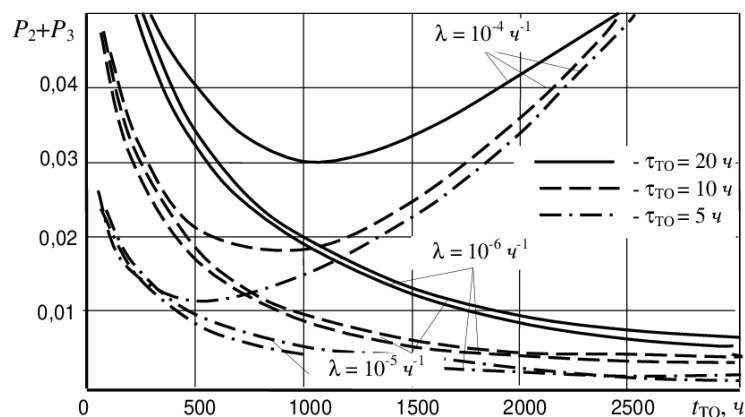


Рис. 4. Зависимость вероятности неработоспособного состояния объекта от периодичности технического обслуживания

Обращает на себя внимание наличие экстремумов (максимума или минимума), т. е. при известных значениях λ и $\tau_{ТО}$ существует оптимальная периодичность технического обслуживания и, соответственно, предельное максимальное значение вероятности состояния готовности объекта и предельное минимальное значение технического риска.

Полученные аналитические решения для неустановившегося и установившегося режимов эксплуатации дают возможность решать задачи управления техническим состоянием, оптимизации показателей надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов [18].

Библиографические ссылки

1. Бек У. Общество риска. М. : Прогресс-Традиция, 2000. 384 с.
2. Управление риском. Риск. Устойчивое развитие. Синергетика / В. А. Владимиров, Ю. Л. Воробьев, С. С. Салов и др. М., 2000. 431 с.
3. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М. : Высш. шк., 1982. 231 с.
4. Надежность технических систем / Е. В., Сугак Н. В. Василенко, Г. Г. Назаров и др. Красноярск : Раско, 2001. 608 с.
5. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Планирование системы технического обслуживания // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 6 (13). С. 66–70.
6. Сугак Е. В., Окладникова Е. Н. Прикладная теория случайных процессов. Основные положения и инженерные приложения ; Сиб. гос. технологич. ун-т. Красноярск, 2006. 168 с.
7. Сугак Е. В., Окладникова Е. Н., Кузнецов Е. В. Вычислительные и информационные технологии анализа и оценки социально-экологических рисков // Экология и промышленность России. 2008. № 8. С. 24–29.
8. Сугак Е. В., Окладникова Е. Н., Ермолаева Л. В. Информационные технологии управления социально-экологическим риском // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 4 (21). С. 87–91.
9. Сугак Е. В., Кузнецов Е. В., Назаров А. Г. Информационные технологии оценки экологической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т. 18, № 12. С. 39–45.
10. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации с учетом случайных факторов // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 2 (35). С. 132–136.
11. Сугак Е. В. Современные методы оценки экологических рисков // European Social Science Journal. 2014. Т. 2, № 5 (44). С. 427–433.
12. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб. : Политехника, 2000. 248 с.
13. Безопасность и надежность технических систем / Л. Н. Александровская, И. З. Аронов, В. И. Круглов и др. М. : Университетская книга : Логос, 2008. 376 с.
14. Сугак Е. В. Техничко-экономическое обоснование системы технического обслуживания потенциально опасных механизмов и машин // Современные проблемы теории машин. 2019. № 7. С. 109–113.
15. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В., Игнатьев Д. А. Оптимальное управление безопасностью промышленных объектов // Вестник СибГАУ. 2007. № 4. С. 43–47.
16. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Управление техническим состоянием потенциально опасных объектов // Системы управления и информационные технологии. 2009. Т. 35, № 1-1. С. 192–196.
17. Окладникова Е. Н. Оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных объектов : дис. ... канд. техн. наук ; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 2008. 135 с.
18. Сугак Е. В. Оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных механизмов и машин // Современные проблемы теории машин. 2019. № 7. С. 86–91.

© Сугак Е. В., Бразговка О. В., 2020

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДВУХСТОРОННЕЙ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ

В. А. Левко, Е. Б. Пшенко, О. В. Литовка

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

Рассмотрен современный уровень технологии обработки абразивным потоком с точки зрения повышения ее надежности и производительности. Особое внимание уделено конструктивным особенностям устройств, создающих течение рабочей среды и формирующих характер потока рабочей среды при двухсторонней обработке абразивным потоком. Описаны недостатки моделей, используемых для теоретического описания процесса обработки абразивным потоком.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, надежность обработки, рабочая среда.

1. Введение. Стремительное развитие техники, характеризующееся появлением деталей сложной пространственной формой с высокой точностью размеров и качеством поверхностного слоя, требует дальнейшего совершенствования производственных технологий. В производстве авиационных и ракетных двигателей, дизельных устройств, энергетических установок, биомедицинских устройств и др., широкое применение находят такие методы формообразования как, литье по выплавляемым моделям, электроэрозионная обработка и специальные методы обработки металлов давлением.

Использование традиционных методов финишной обработки, таких как шлифование, притирка, хонингование и др., для финишной обработки сложных поверхностей затруднено. Для этих целей все большее применение находят нетрадиционные методы финишной обработки. К таким методам можно отнести способ обработки абразивным потоком (*Abrasive Flow Machine*), разработанный корпорацией *Extrude Hone* в США в 1960-х годах [1]. Полимерная (силиконовая) среда, наполненная мелкодисперсными абразивными частицами, под давлением подается через обрабатываемую деталь. Рабочая среда под давлением проявляет одновременно вязкие и упругие свойства, образуя прочную матрицу. При этом образуется абразивный поток, удерживающий под давлением рабочую среду в абразивном контакте с обрабатываемой поверхностью. При этом возникает весь спектр контактных взаимодействий – упругая и пластическая деформация, пластическое отеснение, микрорезание.

Этот способ применяется для финишной обработки труднообрабатываемых внутренних деталей из различных материалов, таких как сплавы цветных металлов (алюминий, медь), суперсплавы, керамика, тугоплавкие материалы, карбиды, полупроводники, кварцы, композиты и т. д. [2].

По ряду причин применение этого способа финишной обработки не нашло широкого применения. Выявлению этих причин, повышению надежности и производительности обработки абразивным потоком посвящен ряд работ.

Так эмпирические исследования сил резания во время обработки абразивным потоком позволило установить, что давление экструзии, концентрация абразива и размер

зерна влияют на силы резания, абразивную способность и, наконец, на уменьшение шероховатости поверхности. При этом основным механизмом удаления материала являются упругая деформация (внешнее трение) и пластическое оттеснение [3].

Подобные результаты получены при теоретической оценке сил, возникающих при деформации материала при обработке абразивным потоком. Теоретические расчеты подтверждены экспериментальными исследованиями обработки мягкой стали и алюминиевого сплава [4]. Результаты исследований [3; 4] основаны на использовании рабочих сред низкой и средней вязкости для обработки абразивным потоком. Давление экструзии при этом варьировалось в диапазоне от 2 МПа до 8 МПа.

L. Rhoades [5] выделил четыре принципиальных схемы процесса:

- двусторонняя обработка сквозных каналов и наружных поверхностей в закрытых камерах (*two-way abrasive flow machines*);
- односторонняя обработка сквозных каналов и наружных поверхностей в закрытых камерах (*one-way abrasive flow machines*);
- обработка несквозных полостей с наложением вибрации (*orbital abrasive flow machines*);
- обработка микроотверстий (*micro flow abrasive machines*).

Наибольшее распространение получила двусторонняя обработка сквозных каналов и наружных поверхностей. При анализе технологических возможностей этого процесса выделяют следующие моменты: конструктивные особенности устройств, создающих течение рабочей среды и формирующих характер потока рабочей среды; состав рабочей среды; модели, используемые для теоретического описания процесса [6].

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

Среды низкой вязкости (на основе низкомолекулярных неньютоновских жидкостей) применяют для обработки микроотверстий. Для остальных типов обработки абразивным потоком применяют рабочие среды средней и высокой вязкости.

Высоковязкие среды обеспечивают высокую производительность процесса обработки любых материалов. Однако их применение требует использование больших, по сравнению со средами средней вязкости, значений давления экструзии (свыше 10 МПа). В ряде случаев (малая площадь или изменение формы поперечного сечения обрабатываемого канала, наличие местных сопротивлений) возникают проблемы с созданием и равномерностью абразивного потока. Так при исследовании влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке описаны случаи заклинивания потока рабочей среды в обрабатываемом канале [7].

При использовании рабочих сред средней вязкости производительность процесса резко снижается. Для повышения производительности обработки предложены гибридные методы, в которых на обработку абразивным потоком накладываются другие процессы.

Основные направления повышения надежности и производительности двусторонней обработки абразивным потоком, расширения его технологических возможностей рассмотрены ниже.

2. Конструктивные особенности устройств, создающих течение рабочей среды и формирующих характер потока рабочей среды при двусторонней обработке абразивным потоком

При обработке сквозных каналов для двусторонней обработки абразивным потоком наибольшее распространение получила конструкция с двумя оппозитно расположенными вертикальными поршневыми гидроцилиндрами 1 и 2 (рис. 1, а), в которых

совместно смонтированы рабочие и управляющие полости с приводом от гидравлической системы. Удачной является конструкция, в которой гидроцилиндр привода перемещения подвижной камеры 1 установлен соосно с гидроцилиндрами перемещения поршней 2, и при этом его корпус жестко соединен с корпусом неподвижной камеры (рис. 1, б). Широкое применение получила конструкция с гидравлической траверсой 1 (рис. 1, в), на которой закреплен верхний блок цилиндров 2, обеспечивающая перемещение верхнего блока цилиндров относительно нижнего 3, а также требуемые усилия закрепления приспособления с деталью в устройстве [10]. Для экструзии среды через обрабатываемую деталь в этих конструкциях применяются цилиндры с поршнями.

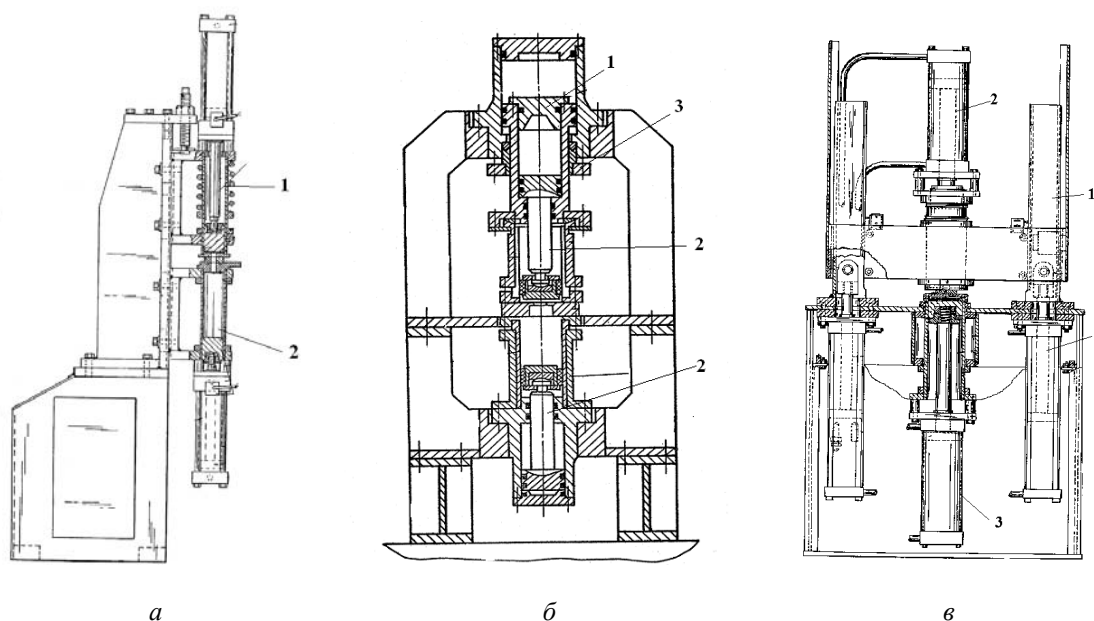


Рис. 1. Схема установки:

а – с двумя oppositно расположенными цилиндрами [8]; б – крепление верхнего цилиндра на штоке управляющего цилиндра [9]; в – на траверсе с гидравлическим приводом [10]

Для повышения производительности обработки средами низкой и средней вязкости предложен гибридный процесс магнитно-абразивной обработки *Magneto Abrasive Flow Machining (MAFM)* [11]. Для повышения скорости удаления материала вокруг заготовки создается магнитное поле. По мнению авторов, сильное магнитное поле будет притягивать абразивные магнитные частицы к обрабатываемой заготовке, создавая дополнительное усилие при контакте. Принципиальная схема *MAFM* показана на рис. 2.

В работе [12] исследован процесс магнитореологической обработки абразивным потоком *MagnetoRheological Abrasive Flow Finishing (MRAFF)* для обработки сложных внутренних поверхностей (рис. 3). В этом процессе магнитореологическая полирующая жидкость содержит из порошка карбонильного железа, а абразивы из карбида кремния смешиваются с вязкоупругой базовой смазкой и минеральным маслом. Установлено, что при нулевом уровне магнитного поля улучшение качества поверхности не наблюдалось. При высокой напряженности магнитного поля качество поверхности заготовки из нержавеющей стали улучшилось на 30 %.

В другом варианте гибридной обработки для повышения производительности обработки абразивным потоком на рабочую среду накладывают центробежную силу, вращение [13]. Для этого в конструкцию введен вращающийся стержень, генерирующий центробежную силу в обрабатываемом канале заготовки (рис. 4). Этот процесс получил название обработки абразивным потоком при помощи центробежных сил *Centrifugal Force Applied Abrasive Flow Machining (CFAAFM)*.

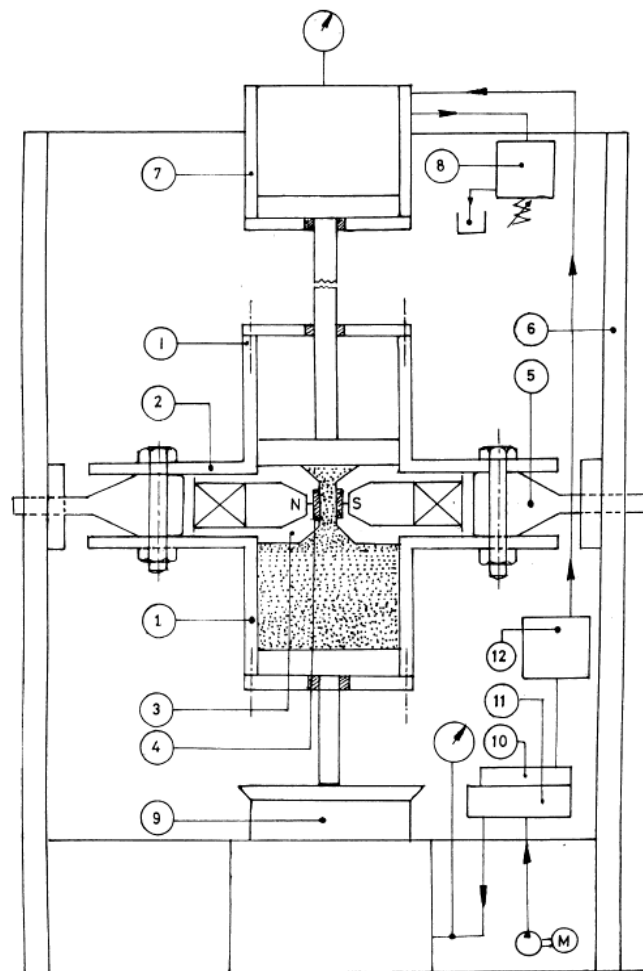


Рис. 2. Принципиальная схема *MAFM*. Основные части:
 1 – цилиндр с рабочей средой; 2 – фланец; 3 – нейлоновое крепление; 4 – заготовка; 5 – рым-болт; 6 – гидравлический пресс; 7 – вспомогательный цилиндр; 8 – модульный предохранительный клапан; 9 – поршень гидравлического пресса; 10 – распределительный клапан; 11 и 12 – блоки коллектора; 13 – электромагнит [11]

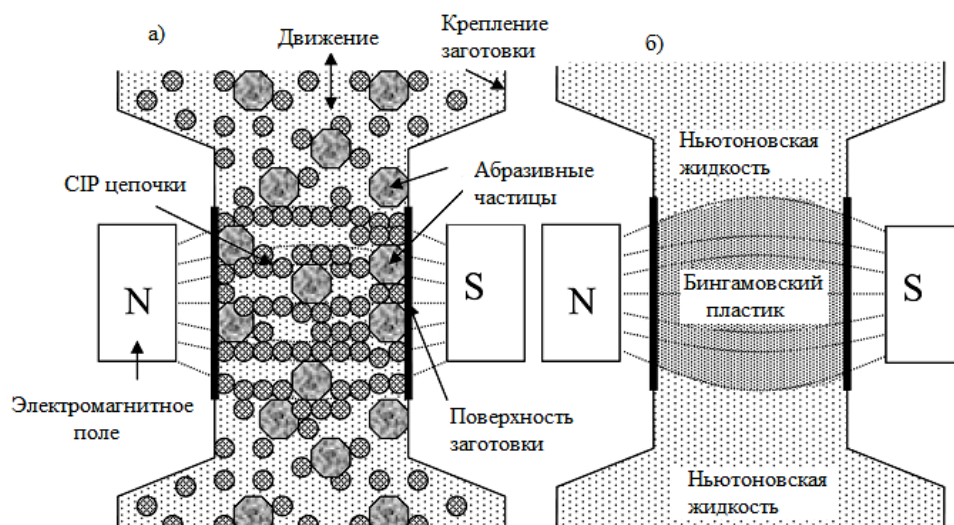


Рис. 3. Принципиальная схема *MRAFF*:
 а – механизм магнитореологической обработки абразивным потоком;
 б – изменение реологического поведения магнитореологической жидкости [12]

Авторами разработан процесс электрохимической механической обработки абразивным потоком *ElectroChemical Abrasive Flow Machining (ECAFM)* с использованием полимерных электролитов для финишной обработки плоских поверхностей (рис. 5). Ионная проводимость электролитов ниже, чем проводимость электролитов, используемых в обычной электрохимической обработке. Добавки неорганических наполнителей к электролитам в форме абразивов еще больше снижают проводимость.

В связи с этим, межэлектродный зазор, через который пропускается полимерный электролит, должен быть небольшим. Это приводит к повышению гидравлического сопротивления полимерного электролита, который принимает форму полужидкой пасты. Для экспериментальных исследований использовались полимерные электролиты в виде гелеобразующих полимеров и водяные гели на основе акрилоамида [14].

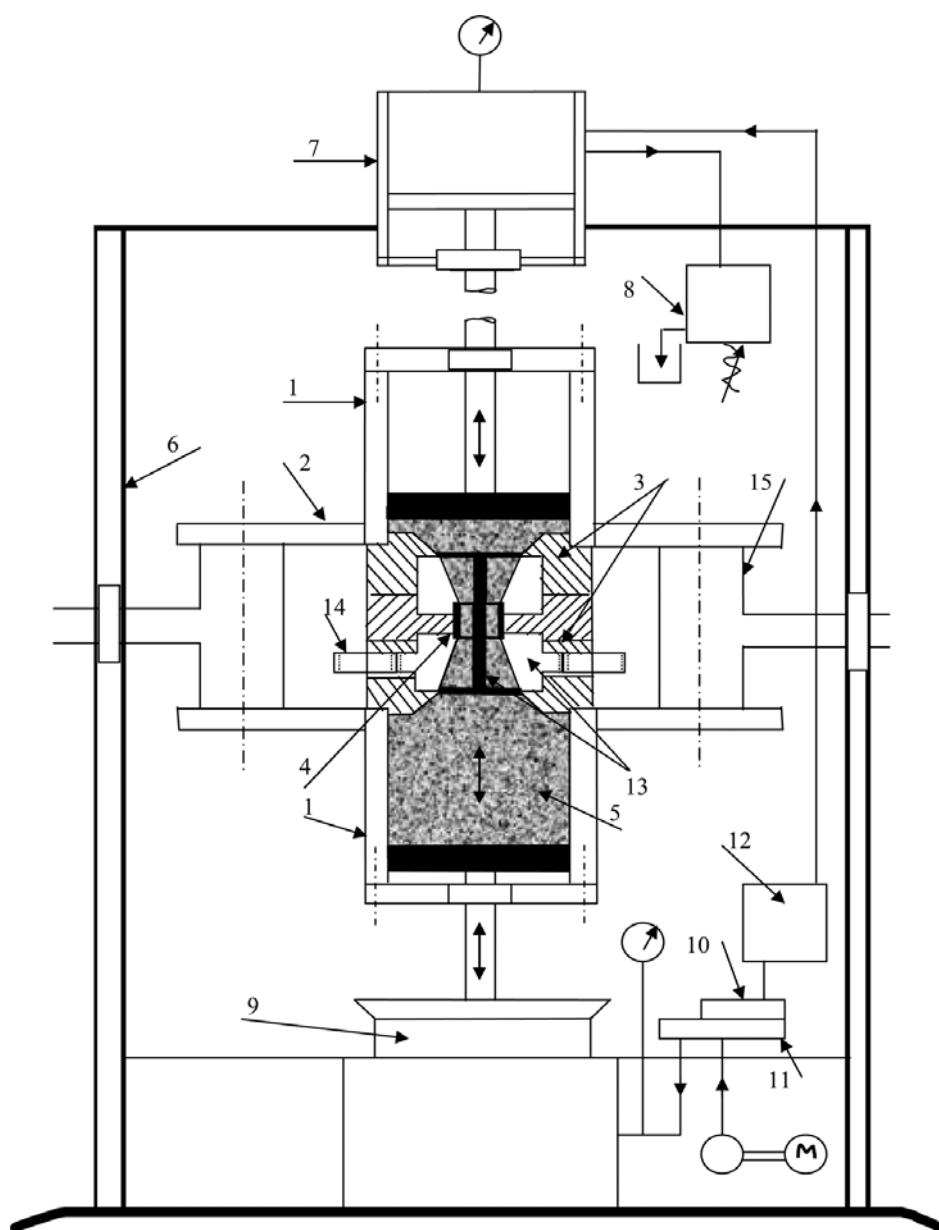


Рис. 4. Принципиальная схема CFAAFM:

1 – цилиндр со средой; 2 – фланец; 3 – приспособление; 4 – заготовка; 5 – абразивная среда; 6 – гидравлический пресс; 7 – вспомогательный цилиндр; 8 – модульный предохранительный клапан; 9 – поршень гидравлического пресса; 10 – распределительный клапан; 11 и 12 – коллекторные блоки; 13 – вращающийся узел стержня CFG; 14 – холостая передача; 15 – рым-болт [13]

Для повышения производительности процесса обработки абразивным потоком для достижения более высокой скорости чистовой обработки и удаления материала предложено дополнительно вращать рабочую среду вдоль своей оси при помощи сверла [15]. Этот метод получил название процесса финишной абразивной обработки с помощью сверла *Drill Bit-Guided Abrasive Flow Finishing (DBG-AFF)* (рис. 6). Эксперименты проводились на материалах заготовок AISI 1040 и AISI 4340. Более высокая скорость чистовой обработки и скорость удаления материала наблюдаются в процессе *DBG-AFF* по сравнению с процессом чистовой обработки абразивным потоком (*AFF*).

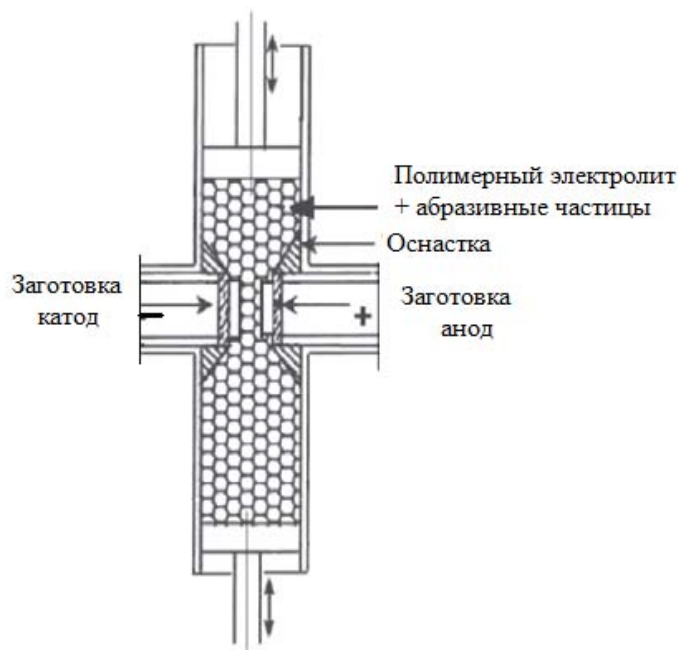


Рис. 5. Принципиальная схема *ECAFM* [14]

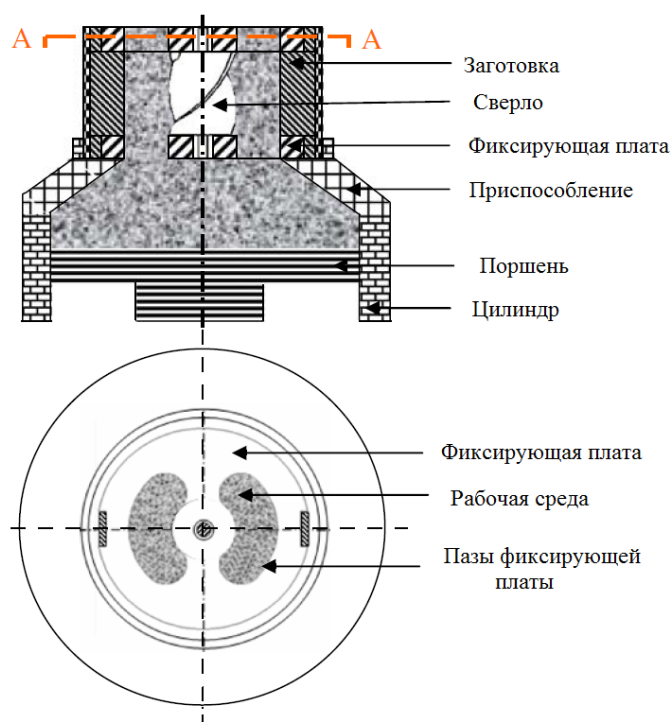


Рис. 6. Принципиальная схема *DBG-AFF* [15]

В другом гибридном процессе непосредственно заготовка вращается с определенной скоростью, чтобы повысить производительность процесса обработки абразивным потоком [16]. Эта технология получила название финишной обработки вращательным абразивным потоком (R-AFF).

Для повышения производительности и надежности процесса предложена технология, в которой заготовка подвергается ультразвуковой вибрации, перпендикулярной направлению потока среды [17]. Этот процесс получил название ультразвуковой обработки с абразивным потоком *Ultrasonic-Assisted Abrasive Flow Machining (UAAFM)*.

Аналогичные решения были разработаны ранее в СССР. Для интенсификации процесса обработки абразивным потоком осуществлялось дополнительное наложение вибрации на поток рабочей среды в направлении его продавливания [18; 19] по определенным характеристикам [20].

Для создания или наложения вибрации между гидроцилиндрами 1, 2 и специальным приспособлением 3 размещают уплотнения 4 (рис. 7), соединенные с виброприводом 5, размещенным на приспособлении 6 для закрепления детали 7, причем сами уплотнения выполнены в виде упругих диафрагм 8, смонтированных на приспособлении и гидроцилиндрах [19], или используется ультразвуковой излучатель [18]. В данных устройствах вибрация накладывается в осевом направлении потока среды, что, учитывая высокие релаксационные свойства полимерной основы, значительно снижает эффект дополнительного вибрационного воздействия на абразивные зерна.

Для улучшения характеристик процесса MRAFF этот процесс был доработан. В этой модификации метода вращательное и возвратно-поступательное движение обеспечивается абразивной средой с помощью вращающегося магнитного поля и гидравлического блока [21]. Способ получил название ротационно-магнитореологическая чистовая абразивная обработка *Rotational-MagnetoRheological Abrasive Flow Finishing (RMRAFF)*.

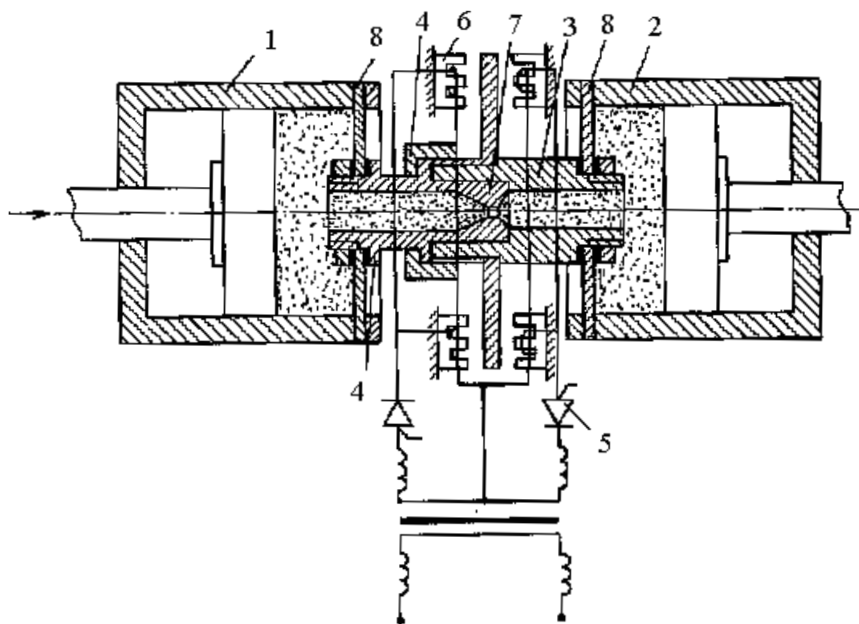


Рис. 7. Схема вибропривода для ультразвуковой обработки абразивным потоком [19]

Для выравнивания условий и повышения производительности обработки заготовок с конусными каналами был предложен способ абразивно-экструзионной обработки канала с цилиндрической и конусной частями [22].

В конусной части канала размещают выравнивающее устройство, имеющее форму конуса. Последнее обеспечивает постоянную площадь поперечного сечения образованного кольцевого зазора по всей длине конусной части. Упомянутая площадь превышает площадь поперечного сечения цилиндрической части канала в $1,2 \dots 6,4$ раза. По каналу продавливают вязкоупругую абразивную смесь с обеспечением постоянства объемного расхода абразивной смеси. Такие действия способствуют повышению равномерности обработки канала по всей длине.

Одной из основных проблем рассматриваемой технологии является неравномерность обработки, вызванная перестройкой профиля потока рабочей среды в обрабатываемые каналы. Для решения данной проблемы предложен ряд технических решений, позволяющий формировать требуемый профиль потока не на входе в обрабатываемые каналы, а на входе в специальные приспособления.

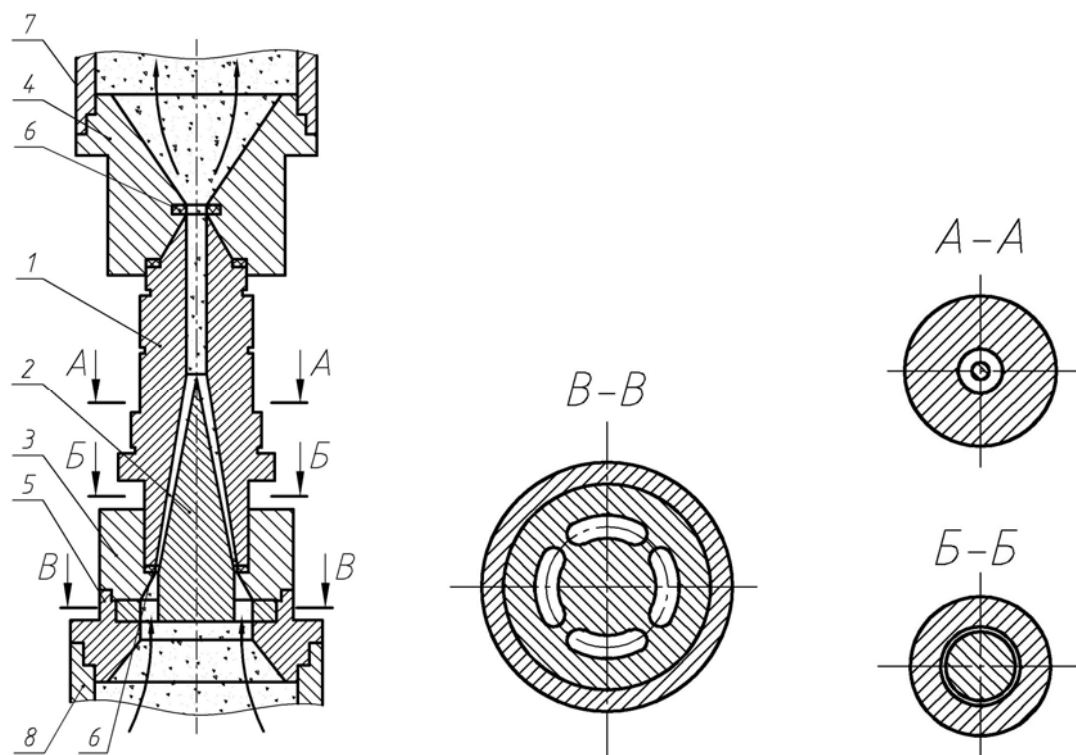


Рис. 8. Схема обработки абразивным потоком сопла-насадка с использованием выравнивающего устройства:

1 – деталь; 2 – выравнивающее устройство; 3 и 4 – нижний и верхний переходники;
5 – основание; 6 – уплотнения; 7 и 8 – рабочие камеры установки [22].

Так в способах обработки (рис. 9), в которых среде 1 придают форму сечения обрабатываемого канала специальными приспособлениями, канал, по которому продавливают среды, удлиняют. Для этого с обеих сторон от обрабатываемой детали 2 устанавливают лопатки 3 с рабочей поверхностью, идентичной обрабатываемой поверхности детали 1 [23] или каждое второе колесо поворачивают на 180° относительно его оси и совмещают с соседними колесами одноименными кромками лопаток, при этом в качестве направляющих элементов берут лопаточные колеса [24].

Для выравнивания обработки входных кромок лопаток 2 различных лопатных деталей 1 (рис. 10), предложено размещать направляющие элементы 4 так, чтобы основной поток среды направлялся на входную кромку [25]. Далее поток среды продавливается по обрабатываемому каналу 3. При такой схеме обработки необходимо при-

менять выравнивающие приспособления с каналами большей длины, так как в коротких каналах профиль потока не успевает перестроиться под профиль обрабатываемого канала.

Другой проблемой является неоднородность обработки, вызванная изменением параметров потока рабочей среды из-за изменения формы или размеров поперечного сечения обрабатываемых каналов. К такому типу деталей можно отнести внутреннюю поверхность центробежных насосов. Для выравнивания условий обработки предложено использовать специальные приспособления, помещаемые в обрабатываемый канал. В способе обработки центробежного насоса 1 с выравнивающим приспособлением в полости канала неправильной формы размещают приспособление 2, которое прижимается специальной крышкой 3 (рис. 11). При этом образуется щелевой канал 4, по которому через входное отверстие 5 продавливают вязкоупругий абразивный материал [26].

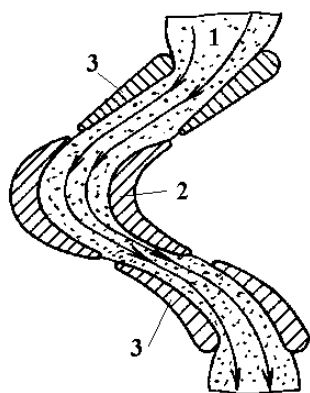


Рис. 9. Схема выравнивания потока за счет использования лопаток, идентичных обрабатываемой поверхности [23]

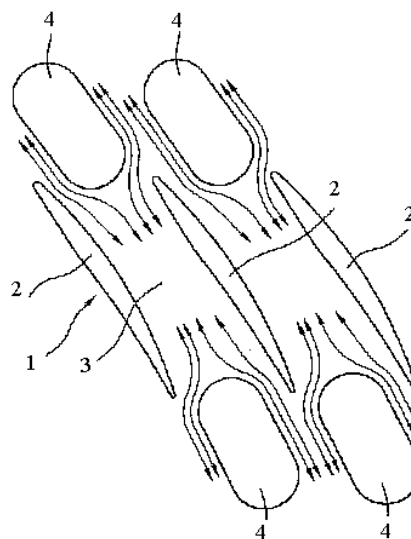


Рис. 10. Схема выравнивания обработки за счет создания направленного на входные кромки потока рабочей среды [25]

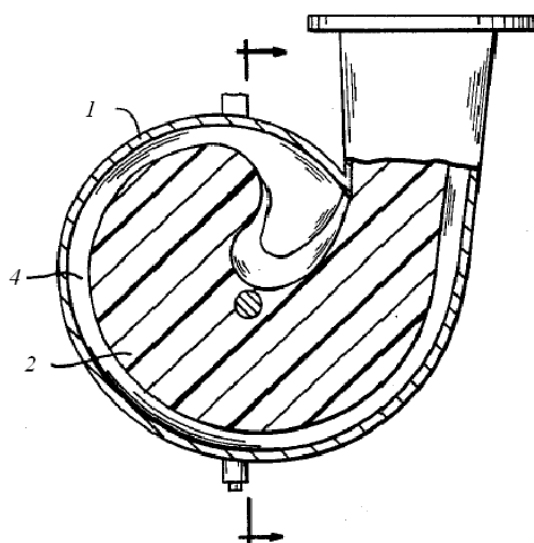
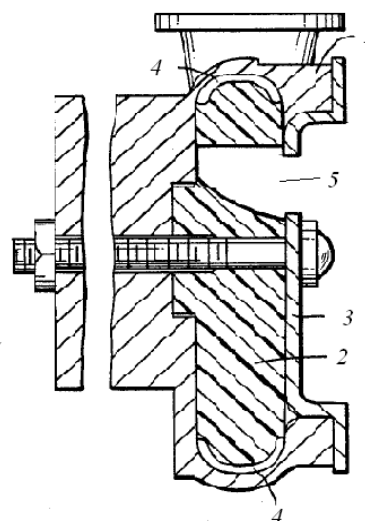


Рис. 11. Схема обработки внутренней поверхности центробежного насоса с выравнивающим приспособлением [26]



3. Состав рабочей среды

Абразивная среда является основным компонентом процесса обработки абразивным потоком. Основу среды обеспечивает вязкоупругий полимер, наполненный абразивными частицами. Вязкоупругий полимер является носителем, а абразивные частицы действуют как режущий инструмент, который удаляет материал с заготовки. Обычно используемые полимерные среды представляют собой полиборосилоксан и силиконовый каучук. В качестве абразива чаще всего применяют карбид кремния, оксид алюминия, карбид бора и искусственные алмазы.

Проведена оценка эффективности и реологических характеристик разработанной новой среды для процесса обработки абразивным потоком на основе бутадиен-стирольного каучука, бутилкаучука, этилен-пропилендиенового мономера, а также натурального каучука [27]. Показана их эффективность как основы для рабочих сред низкой и средней вязкости. Для создания рабочих сред высокой вязкости лучшими свойствами обладают силиконовые каучуки.

В нашей стране в качестве основы для рабочей среды для двусторонней обработки абразивным потоком используется каучук синтетический термостойкий. Это высокомолекулярный диметилсилоксановый каучук марки СКТ по ГОСТ 14680–74, имеющий однородную массу без механических включений (молекулярная масса – 420–670). Силоксановые каучуки относятся к классу кремнийорганических полимеров, причем благодаря высокой прочности связей Si-O (более 420 кДж/моль) и Si-C (около 415 кДж/моль) они имеют высокую стойкость к тепловому старению. Силоксановые цепи обладают значительной гибкостью и малыми силами межмолекулярного взаимодействия (плотность энергии когезии 210 Дж/см³). В зависимости от степени наполнения абразивными зёрнами вязкость среды η изменяется в интервале 500...500 000 Па·с.

Разработка новых составов рабочих сред является актуальной задачей и основным путем повышения качества и производительности обработки труднообрабатываемых материалов с низким исходным качеством поверхностного слоя, каналов большой длины, а также каналов с переменной формой поперечного сечения.

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

Чтобы понять сложность процесса, необходимо построить математическую или имитационную модель для изучения влияния различных параметров процесса на выходные характеристики. В случае обработки абразивным потоком основными выходными характеристиками являются качество поверхности и скорость удаления материала.

Моделированию процесса обработки абразивным потоком посвящено множество работ. Так при описании теоретических основ процесса особое внимание было уделено модели реологии рабочих сред, а также модели контактных процессов, возникающих при взаимодействии рабочей среды и обрабатываемой детали [6]. Там же были отмечены те проблемы, которые возникают при использовании существующих теоретических предпосылок процесса.

Одной из проблем используемых моделей удаления материала единичным абразивным зёрном заключается в том, что в такой модели зерно в контакте имеет одну режущую кромку. В действительности абразивное зерно представляет собой многолезвийный инструмент, воздействующий на обрабатываемую поверхность, как по фактической площади контакта (режущими кромками), так и по контурной площади контакта (зерно в целом).

Другой проблемой, характерной для расчета нормальной F_n и тангенциальной F_t составляющих силы резания, является сложность решаемой задачи. Так, на основании обобщенной модели Максвелла было проведено моделирование потока среды при

обработке абразивным потоком путем решения стационарных неупругих уравнений Навье-Стокса [28]. Авторами этой работы отмечено и необходимость дальнейшего совершенствования данной модели из-за существенного расхождения расчетных и экспериментальных скоростей и давлений потока рабочей среды.

Применение уравнений Навье-Стокса для неньютоновских сред дает удовлетворительные результаты исключительно при теоретическом описании обработки рабочими средами низкой вязкости [29; 30]. Модель течения в этом случае основана на перепаде давления в обрабатываемой детали.

Анализ ряда работ [31; 32], направленных на разработку теоретических моделей расчета нормального давления на внутренней поверхности круглой трубы и скорости скольжения стенки при обработке абразивным потоком, в случае применения высоковязких рабочих сред, дают серьезные расхождения с экспериментальными наблюдениями.

В этом случае в процессе обработки участвует весь объем рабочей среды 4, продавливаемый штоками рабочих цилиндров 1 установки через обрабатываемую деталь 3, закрепленную в приспособлении 2 (рис. 12) [33]. В начале обработки, когда объем абразивной среды в рабочем цилиндре, находится в недеформируемом состоянии, расположение абразивных зерен носит случайный характер. При приложении давления шток начинает воздействовать на рабочую среду. Волна напряжения в вязкоупругой среде начинает передаваться в направлении от штока к свободному краю среды. При достижении определенной величины напряжения сдвига τ_0 среда начинает течение сдвига. При этом формируется поток с определенной внутренней структурой, характеризующейся возникновением линий тока.

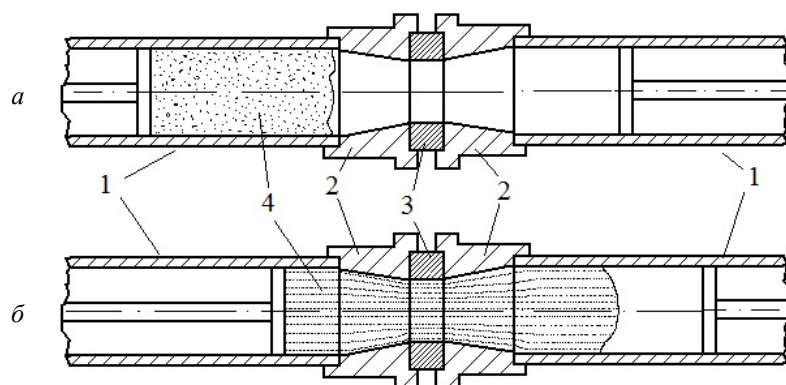


Рис. 12. Схема обработки абразивным потоком средой высокой вязкости:
а – в начале обработки; б – в процессе обработки абразивным потоком [33]

В каждой линии тока абразивные зерна выстраиваются в определенной последовательности, образуя силовые цепочки. Формирование таких цепочек на поверхности трения при абразивной обработке в целом описано в работе, посвященной моделированию характеристик силовых цепей на основе метода дискретных элементов [34].

Проведенные ранее визуальные исследования данного процесса обработки позволили установить, что при обработке в потоке рабочей среды отдельные абразивные зерна перемещаются по линиям тока. При этом наблюдался эффект образования силовых абразивных цепочек [7], тем самым экспериментально подтверждая ранее выдвинутое предположение об образовании таких цепочек при обработке абразивным потоком [35]. Таким образом, появление составляющих силы резания, действующей на единичное абразивное зерно, обусловлено касательными и нормальными напряжениями потока рабочей среды.

Основные направления повышения надежности и производительности двухсторонней обработки абразивным потоком можно разрабатывать, используя научные основы абразивно-экструзионной обработки [36]. Для этого описаны динамические характеристики потока среды как абразивного инструмента. Для моделирования процесса с применением рабочих сред низкой вязкости возможно характер потока описывать при помощи точных решений системы уравнений движения вязкой жидкости с учетом влияния вязкоупругих свойств рабочей среды на параметры абразивного инструмента.

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

На основе такой оценки разработаны модель течения наполненной рабочей среды как абразивного инструмента в осесимметричном канале; методика выбора модели потока рабочей среды для расчета скорости и давления абразивного инструмента в зависимости от геометрических характеристик канала; методика расчета точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной обработки на основе модели контактных взаимодействий [36].

Заключение.

Рассмотрен современный уровень технологии обработки абразивным потоком с точки зрения повышения ее надежности и производительности. Для обработки абразивным потоком рабочими средами низкой и средней вязкости это возможно за счет применения гибридных технологий обработки.

Для обработки абразивным потоком рабочими средами высокой вязкости необходимо дальнейшее совершенствование конструктивных особенностей устройств, создающих течение рабочей среды и формирующих характер потока рабочей среды, а также использования моделей потока как вязкоупругой среды.

Библиографические ссылки

1. Pat. 3521412 US, ISC B24B 1/00, 19/00. Method of honing by extruding / McCarty R.W. 12.04.1968; 21.01.07.1970.
2. Kumar S. S., Hiremath S. S. A Review on Abrasive Flow Machining (AFM) // Procedia Technology. 2016, Vol. 25, Pp. 1297–1304.
3. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004, Vol. 44, Issue 2–3, Pp. 201–211. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1642-y>.
4. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining // Wear. 2006, Vol. 260, Issue 1–2, Pp. 128–139. DOI: 10.1016/j.wear.2004.12.038.
5. Rhoades L. J. Abrasive flow machining and its use// Nontraditional Mach: Cont. Proc., Cincinnati, Ohio, 1985 [Metal Park (Ohio)], 1986, Pp. 111–120.
6. Левко В. А. Абразивно-экструзионная обработка: современный уровень и теоретические основы процесса : монография ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007. 228 с.
7. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко, М. А. Лубнин, П. А. Снетков и др. // Вестник СибГАУ. 2009. № 4. С. 138–145.
8. Pat. 3634973 U.S. Apparatus for abrading by extrusion and abrading medium / R. W. McCarty. 27.08.1969; 18.01.1972, T. 894, № 3.

9. А. с. 1478544 СССР. МКИ В24В 31/116. Устройство для обработки деталей абразивной массой, подаваемой под давлением / Т. Ю. Тлюстен, В. И. Казмирук, Л. Х. Райтберг, А. Н. Баранов. Заявл. 02.04.87; 4 с.: ил.
10. Pat. 3802128 U.S. ISC В24В 7/00, 9/00. Machine for abrading by extruding / R. J. Minear, N. P. Nokovich. 28.04.1972; 09.04.1974, Т. 921, № 2.
11. Singh S., Shan H. S., Development of magneto abrasive flow machining process. Разработка процесса обработки магнитно абразивным потоком // International Journal of Machine Tools and Manufacture. June 2002, Vol. 42, Issue 8, Pp. 953–959. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00021-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00021-4).
12. Jha S., Jain V. K. Design and development of the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process // International Journal of Machine Tools and Manufacture. August 2004, Vol. 44, Issue 10, Pp. 1019–1029. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.03.007>.
13. Walia R. S., Shan H. S., Kumar P. Abrasive flow machining with additional centrifugal force applied to the media // Machining Science and Technology: An International Journal Vol. 10, Issue 3, 2006. PP. 341–354. DOI:10.1080/10910340600902157.
14. Dabrowski L., Marciniak M., Szweczyk T. Analysis of abrasive flow machining with an electrochemical process aid // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture March 1, 2006, Vol. 220, №. 3. PP. 397–403. DOI: 10.1243/095440506X77571.
15. Sankar M.R., Mondal S., Ramkumar J., Jain V.K. Experimental investigations and modeling of drill bit-guided abrasive flow finishing (DBG-AFF) process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. June 2009, Vol. 42, Issue 7-8, PP. 678–688. DOI: 10.1007/s00170-008-1642-y.
16. Sankar M. R., Jain V. K., Ramkumar J. Experimental investigations into rotating workpiece abrasive flow finishing // Wear. 15 June 2009, Vol. 267, Issues 1–4, Pp. 43–51.
17. Sharma A. K., Venkatesh G., Rajesha S., Kumar P. Experimental investigations into ultrasonic-assisted abrasive flow machining (UAAFM) process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. September 2015, Vol. 80, Issue 1, Pp. 477–493. DOI: 10.1007/s00170-015-7009-2.
18. А. с. 1582504 СССР. МКИ В24В 31/116, 1/04. Устройство для обработки деталей абразивной массой / В. П. Фомин, А. А. Кузьмин, В. В. Соловьев, В. Н. Педяш. Заявл. 26.04.88; 3 с.: ил.
19. А. с. 865643 СССР. МКИ В24С 3/06. Устройство для обработки деталей абразивной массой, подаваемой под давлением / А. Н. Шаповал, М. Н. Пивоваров, Г. Р. Золотарев, В. А. Залевский, А. А. Зленко, А. А. Сытник, Н. А. Федотьев. Заявл. 10.01.80; Оpubл. 28.09.81, Бюл. № 35. 2 с.: ил.
20. А. с. 738838 СССР. МКИ В24В 1/00. Способ снятия заусенцев и отделки поверхностей абразивной массой / А. И. Попенко, А. И. Ковган, П. В. Ширкевич, В. М. Мигунов. Заявл. 02.01.78; Оpubл. 05.06.80, Бюл. № 21. 8 с.: ил.
21. Das M., Jain V. K., Ghoshdastidar P. S. Nanofinishing of flat workpieces using rotational-magnetorheological abrasive flow finishing (R-MRAFF) process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. September 2012, Vol. 62, Issue 1-4, Pp. 405–420. DOI: 10.1007/s00170-011-3808-2.
22. Патент 2469832 RU. МПК В24В 31/116. Способ абразивно-экструзионной обработки канала с цилиндрической и конусной частями / В. А. Левко, Е. Б. Пшенко. Заявл. 11.07.11; Оpubл. 20.12.12, Бюл. № 35. 7 с.: ил.
23. А. с. 1161359 СССР. МКИ В24С 1/08. Способ обработки деталей абразивной массой / С. К. Сысоев, М. А. Лубнин. Заявл. 11.07.83; Оpubл. 15.06.85, Бюл. № 22. 3 с.: ил.
24. А. с. 1361859 СССР. МКИ В24В 31/116. Способ поверхностной обработки деталей типа лопаточных колес газотурбинных двигателей / В. П. Зубов. Заявл. 24.12.85; 3 с.: ил.

25. Pat. WO2004078416 ISC B24B 31/116. Device and method for surface machining a workpiece / G. Lebkuechner. 05.03.2003; 16.09.2004.
26. Pat. 4936057 U.S. ISC B24B 57/02. Finish machining the surface of irregularly shaped fluid passages / L. J. Rhoades. 09.09.1985; 26.06.1990, T. 1115, № 4.
27. Performance evaluation and rheological characterization of newly developed butyl rubber based media for abrasive flow machining process / K. K. Kar, N. L. Ravikumar, P. B. Tailor, J. Ramkumar, D. Sathiyamoorthy // Journal of Materials Processing Technology. Vol. 209, Issue 4, 19 February 2009, Pp. 2212–2221. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.012>.
28. Uhlmann E., Schmiedel C., Wendler J. CFD Simulation of the Abrasive Flow Machining Process // 15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (15th CMMO): Procedia CIRP. 2015. Vol. 31. Pp. 209–214. DOI: [doi:10.1016/j.procir.2015.03.091](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.091).
29. Wang T., Chen D., Zhang W., An L. Study on key parameters of a new abrasive flow machining (AFM) process for surface finishing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 101. Issue 1-4. Pp. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2914-9>.
30. Zhu L. F., Wang K., Wu H., Xiu D., Sun L. Z., Research on the Methods for Common-Rail Pipe Holes Abrasive Flow Machining // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 721. Pp. 122–126. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.721.122>.
31. Wu M. Y., Gao H. The Research of Extruded Pressure Auto-Adjustment Method in Abrasive Flow Polishing // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1027. Pp. 203–207. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1027.203>.
32. Dash R., Maity K. Simulation of abrasive flow machining process for 2D and 3D mixture models // Frontiers of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 10, Issue 4. Pp. 424–432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0366-6>.
33. Левко В. А., Савин Д. И., Литовка О. В. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. 2020. Т. 24. № 1. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-00-00>.
34. Xiu T. X., Wei W., Liu K., Wang Z. Y., Wei D. Z. Characteristics of force chains in frictional interface during abrasive flow machining based on discrete element method // Advances in Manufacturing. 2018. Vol. 6. Issue 4. Pp. 355–375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40436-018-0236-7>.
35. Левко В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины // Вестник Чуваш. гос. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. 2008. № 2 (5). С. 85–94.
36. Левко В. А. Научные основы абразивно-экструзионной обработки деталей : монография ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 222 с.

© Левко В. А., Пшенко Е. Б., Литовка О. В., 2020

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ

Е. Д. Зиборов, И. П. Солодилов, Э. М. Шангераев
 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: ie.sibsau@mail.ru

Системы автоматического контроля (САК) широко применяются на производстве. После изучения существующих решений была отмечена высокая стоимость таких систем даже для производств, не требовательных к точности. Приведены результаты разработки малобюджетной системы автоматического контроля размеров (САКР) для таких производств.

Ключевые слова: система автоматического контроля размеров, автоматизация технологических процессов, автоматизация производства.

Разрабатываемая система автоматического контроля размеров реализуется по структурной схеме, представленной на рис. 1 [1]:

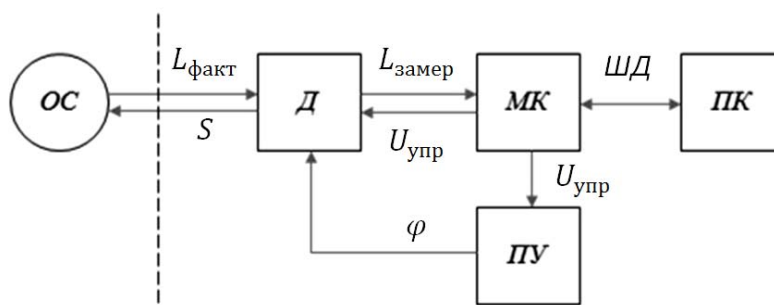


Рис. 1. Структурная схема устройства (справа от пунктира):
 ОС – объект сканирования; МК – микроконтроллер; Д – датчик; ПУ – поворотное устройство; ШД – шина данных; ПК – персональный компьютер;
 $L_{\text{факт}}$ – фактическое расстояние до объекта; $U_{\text{упр}}$ – управляющий сигнал;
 $L_{\text{замер}}$ – измеренное расстояние до объекта; φ – угол поворота поворотного устройства; S – посылаемый сигнал

В качестве микроконтроллера был выбран ATmega 328 на базе платформы Arduino Nano, в качестве поворотного устройства – сервопривод SG90, в качестве датчика расстояния – лазерный дальномер VL530L0X [1].

Для проведения испытаний использовалась площадка со стороной 500 мм. Объекты сканирования помещались в сектор диаметром 350 мм. Система последовательно устанавливалась по периметру квадрата со стороной 410 мм в 4-х точках на каждой стороне (на рис. 2–7 – серые либо цветные полукруги по периметру сетки). На каждой точке сервопривод поворачивался на угол от -20 до 20 градусов с шагом 2 градуса. На каждом шаге сервопривода датчик расстояния измерял расстояние до объекта. Данные об измеренном расстоянии поступали на микроконтроллер через интерфейс I2C, а с микроконтроллера – на персональный компьютер (ПК) через последовательный порт. На ПК формировались массивы измерений, которые обрабатывались с применением алгоритмов фильтрации [2–4] и отображались на экране.

Отображение объектов производилось с использованием линейной интерполяции полученных точек и алгоритма предобработки данных (рис. 2, 4, 6 – слева), что решало проблему случайных выбросов, появившихся при измерении объектов. Также применялось позиционное отображение объектов – отображение полученных точек на каждой позиции системы (рис. 3, 5, 7).

Ниже представлены результаты измерения объектов различных форм и размеров с отображением всех позиций системы, линий и точек, полученных с каждой позиции, а также реального положения объекта (рис. 2, 4, 6 – справа).

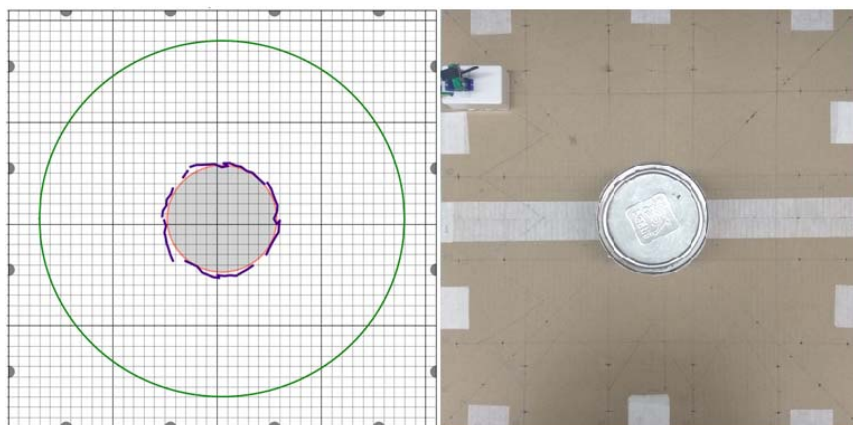


Рис. 2. Результат измерения цилиндра (в линиях)

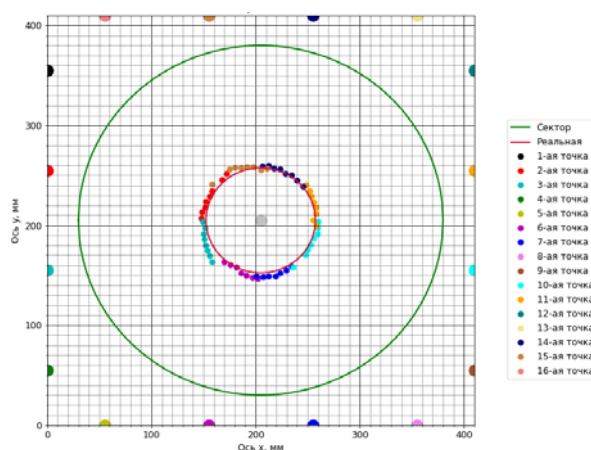


Рис. 3. Результат измерения цилиндра (в точках, позиционно)

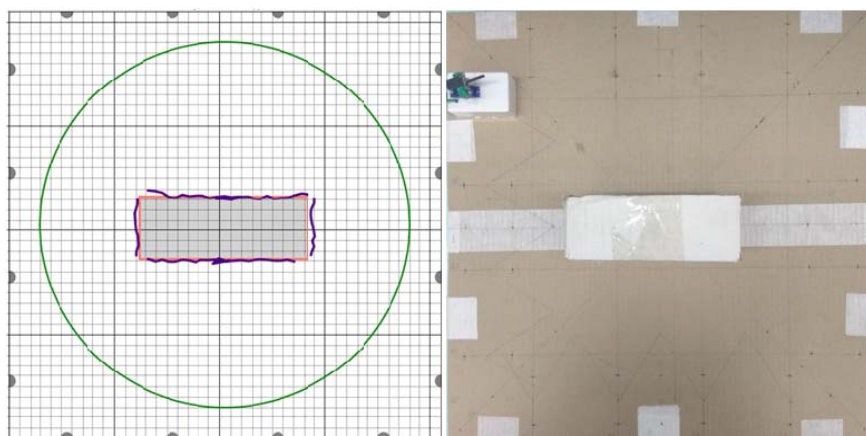


Рис. 4. Результат измерения параллелипипеда (в линиях)

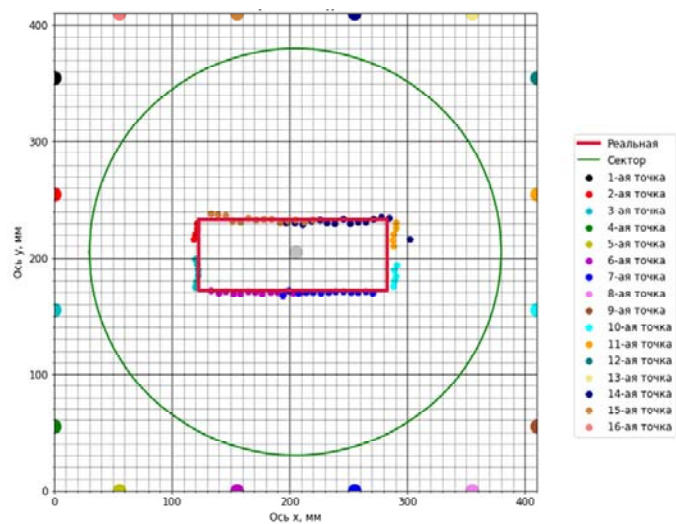


Рис. 5. Результат измерения параллелипипеда (в точках, позиционно)

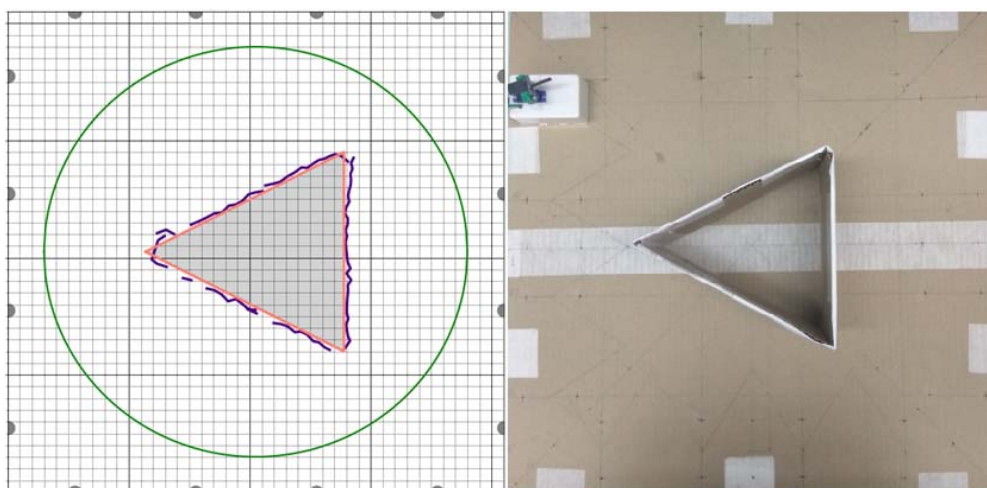


Рис. 6. Результат измерения треугольной призмы (в линиях)

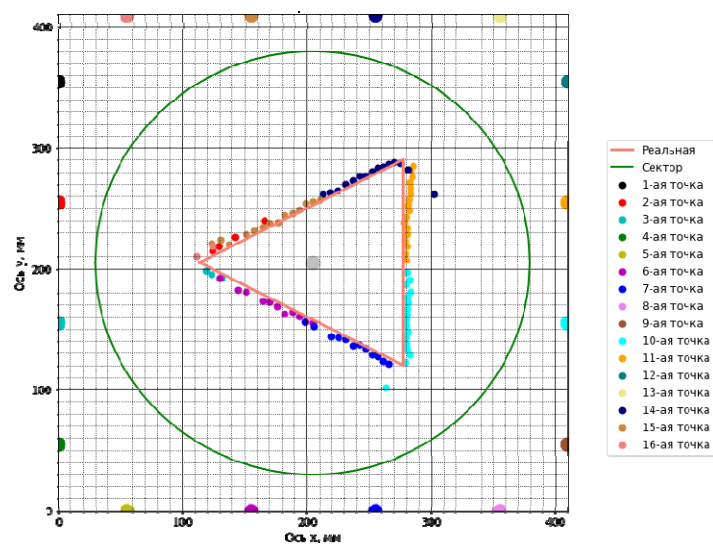


Рис. 7. Результат измерения треугольной призмы (в точках, позиционно)

На основании полученных результатов можно сделать выводы:

1. Система справляется с задачей отображения форм объекта сканирования;
2. Большинство полученных точек лежат вблизи точек, принадлежащих объектам сканирования;
3. Существуют точки, не принадлежащие объектам сканирования (выбросы);
4. Необходимо улучшение алгоритма обработки данных с целью устранения разрывов при интерполяции;

Библиографические ссылки

1. Зиборов Е. Д., Солодилов И. П., Шангераев Э. М. Выбор оптимального датчика для малобюджетной системы автоматического контроля размеров // Теоретические и практические основы технологических процессов : сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 26.12.2019). Стерлитамак : АМИ, 2019. С. 115–117.

2. Зиборов Е. Д., Солодилов И. П., Шангераев Э. М. Сравнение алгоритмов фильтрации для малобюджетной системы автоматического контроля размеров // Физико-математические и технические науки как постиндустриальный фундамент развития информационного общества : сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. (Оренбург, 23.01.2020). Стерлитамак : АМИ, 2020. С. 20–24.

3. Спирин Н. А., Лавров В. В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: конспект лекций / под ред. Н. А. Спирина ; УГТУ-УПИ. Екатеринбург, 2004. 257 с.

4. Бесконтактное обнаружение и измерение габаритов объекта, особенности применения в различных отраслях [Электронный ресурс]. URL: <https://www.germany-electric.ru/426> (дата обращения: 10.03.2020).

© Зиборов Е. Д., Солодилов И. П., Шангераев Э. М., 2020

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Е. В. Сугак, О. В. Бразговка

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

Рассматривается определение коэффициента готовности (вероятности состояния готовности) потенциально опасных машин и оборудования при различных сочетаниях параметров системы технического обслуживания и ремонта для установившегося режима эксплуатации. Полученные результаты дают возможность решать задачи управления техническим состоянием, оптимизации надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов.

Ключевые слова: техническое обслуживание, управление техническим состоянием, безопасность, коэффициент готовности, технический риск.

Эксплуатация технической системы – непрерывный процесс, требующий планового и регулярного контроля и воздействия на объект в целом или на его составляющие и элементы, что должно обеспечивать его рабочее состояние и высокий уровень эксплуатационной надежности, который может быть обеспечен при решении двух основных задач: обеспечение нормальных режимов работы элементов и объекта в целом, прогнозирование индивидуального ресурса и назначение оптимальных регламентов эксплуатации [1; 2]. Решение первой задачи предусматривает разработку специальных мер, обеспечивающих снижение предельных режимов нагружения, износа и старения, уменьшение динамических нагрузок [3]. Решение второй задачи включает выбор оптимальной системы обслуживания, разработку системы контроля, диагностики, сбора и обработки информации о качестве функционирования, принятие оптимальных с точки зрения технико-экономических критериев различных этапов эксплуатации, повышение качества восстановления [1].

Решение задач оптимизации системы технического обслуживания включает, как правило, построение графа состояний, составление модели надежности и определение характеристик системы технического обслуживания [4–6]. При этом обычно рассматриваются установившиеся режимы и, соответственно, стационарные модели надежности и финальные значения вероятностей состояний [4–6].

Однако для потенциально опасного оборудования, у которого отказ приводит к угрозе жизни и безопасности человека или возможности загрязнения окружающей среды, оптимизация системы технического обслуживания и ремонта в большинстве случаев не позволяет обеспечить необходимый уровень надежности и, соответственно, допустимого (приемлемого) технического риска [6]. В этих случаях единственным способом обеспечения требуемой безопасности промышленного оборудования является резервирование объекта в целом или его элементов [1; 4; 6].

На рис. 1 представлен граф состояний резервированного (дублированного) объекта с периодическим техническим обслуживанием (или контролем технического состояния), у которого количество состояний равно шести и, соответственно, возможны переходы восьми видов [4].

Если для технического обслуживания основной и резервный объекты выводятся из работоспособного состояния, т. е. отключаются, то работоспособными являются только состояния 1 и 3 (готовности к работе двух и одного объекта, соответственно) и основным показателем надежности и безопасности можно считать коэффициент готовности как сумму вероятностей первого и третьего состояний $K_1 = P_1 + P_3$. Если же техническое обслуживание осуществляется без отключения, то работоспособными являются состояния 1, 2, 3 и 4 и показателем надежности и безопасности является коэффициент готовности как сумма вероятностей этих состояний $K_2 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Соответственно, в первом случае величина техногенного риска $R_1 = 1 - K_1$, во втором – $R_2 = 1 - K_2$.

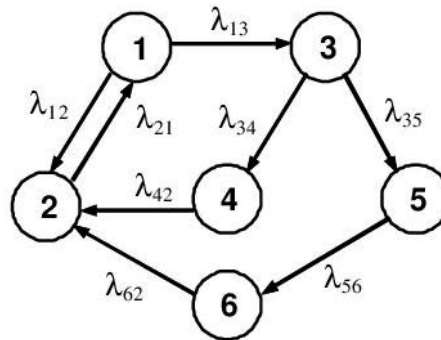


Рис.1. Граф состояний резервированного объекта с периодическим техническим обслуживанием:

1 – работоспособное состояние (готовность к работе) основного и резервного объектов; 2 – техническое обслуживание при двух работоспособных объектах; 3 – работоспособное состояние (готовность к работе) одного из объектов; 4 – техническое обслуживание при одном работоспособном объекте; 5 – отказ второго объекта; 6 – техническое обслуживание при двух отказавших объектах

Интенсивность отказов λ , периодичность технического обслуживания t_{TO} , среднее время технического обслуживания τ_{TO} и устранения отказов (ремонта) τ_p и, соответственно, интенсивности переходов $\lambda_{12} = 1/t_{TO}$, $\lambda_{13} = 2\lambda$, $\lambda_{21} = 1/\tau_{TO}$, $\lambda_{35} = \lambda$ и $\lambda_{42} = \lambda_{62} = 1/(\tau_{TO} + \tau_p)$ могут быть получены по результатам экспериментальных исследований (испытаний), данных об эксплуатации или задаются регламентом. Для нахождения интенсивностей переходов λ_{34} и λ_{56} можно воспользоваться свойствами марковских процессов с непрерывным временем [7]:

$$\lambda_{34} = \left[t_{TO} - \left(2\lambda + \frac{1}{t_{TO}} \right)^{-1} \right]^{-1} \left\{ \lambda \left[t_{TO} - \left(2\lambda + \frac{1}{t_{TO}} \right)^{-1} \right] + 1 \right\}^{-1} = \frac{1}{\lambda t_{TO}^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{(1 + 2\lambda t_{TO})^2}}, \quad (1)$$

$$\lambda_{56} = \left[\left(2\lambda + \frac{1}{t_{TO}} \right)^{-1} - \frac{t_{TO}}{2} \right]^{-1} = \frac{2}{t_{TO}} \cdot \frac{1 + 2\lambda t_{TO}}{1 - 2\lambda t_{TO}}. \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений для ориентированного графа состояний на рис. 1 имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{42}P_4(t) + \lambda_{62}P_6(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13}P_1(t) - (\lambda_{34} + \lambda_{35})P_3(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{42}P_4(t), \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_{35}P_3(t) - \lambda_{56}P_5(t), \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_{56}P_5(t) - \lambda_{62}P_6(t). \end{cases} \quad (3)$$

Систему (3) необходимо дополнить нормирующим условием

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) = 1 \quad (4)$$

и начальными условиями, например

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = P_6(0) = 0. \quad (5)$$

Численный анализ системы дифференциальных уравнений (3) показывает, что при $\lambda \leq 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ переходные процессы практически отсутствуют и при анализе можно перейти к системе алгебраических уравнений для установившегося режима и финальных вероятностей состояний [4]:

$$\begin{cases} -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1 + \lambda_{21}P_2 = 0, \\ \lambda_{12}P_1 - \lambda_{21}P_2 + \lambda_{42}P_4 + \lambda_{62}P_6 = 0, \\ \lambda_{13}P_1 - (\lambda_{34} + \lambda_{35})P_3 = 0, \\ \lambda_{34}P_3 - \lambda_{42}P_4 = 0, \\ \lambda_{35}P_3 - \lambda_{56}P_5 = 0, \\ \lambda_{56}P_5 - \lambda_{62}P_6 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из решения системы уравнений (6) с учетом нормирующего условия (4) можно получить выражения для коэффициентов готовности при техническом обслуживании с отключением $K_1 = P_1 + P_3$ и техническом обслуживании без отключения $K_2 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$:

$$K_1 = \frac{1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}}}{1 + \frac{\lambda_{12} + \lambda_{13}}{\lambda_{21}} + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}} \left(1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{42}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{62}} \right)}, \quad (7)$$

$$K_2 = 1 - \frac{\lambda_{35} \left(\frac{1}{\lambda_{56}} + \frac{1}{\lambda_{62}} \right) \left(1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}} \right)}{1 + \frac{\lambda_{12} + \lambda_{13}}{\lambda_{21}} + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}} \left(1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{42}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{62}} \right)}. \quad (8)$$

Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 2.

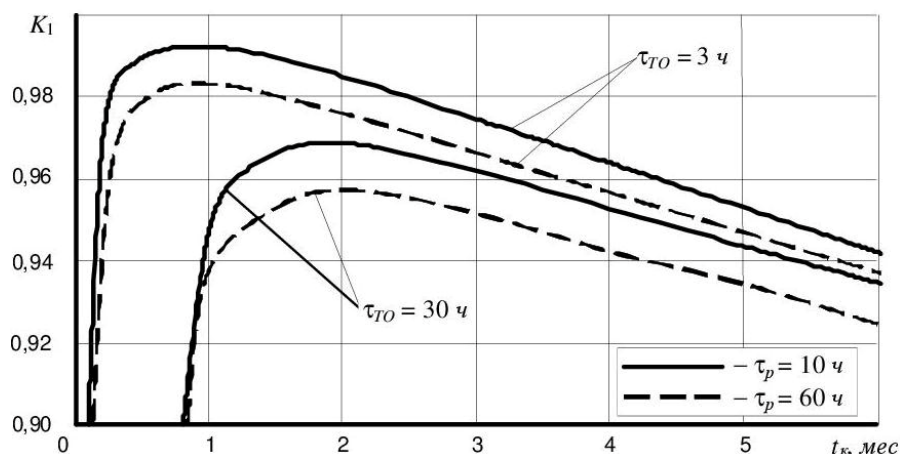


Рис. 2. Зависимость вероятности готовности резервированного объекта от периодичности контроля ($\lambda = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$)

Из анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

- наибольшее влияние на уровень безопасности оказывают интенсивность отказов λ и периодичность технического обслуживания t_{TO} ;
- максимум значения коэффициента готовности с уменьшением λ смещается в сторону больших значений t_{TO} (рис. 2);
- оптимальная периодичность технического обслуживания t_{TO} пропорциональна его продолжительности τ_{TO} ;
- отклонения периодичности технического обслуживания t_{TO} от оптимального значения (особенно в сторону уменьшения) существенно снижают коэффициента готовности объекта, особенно при больших значениях интенсивности.

Полученные решения (7) и (8) дают возможность решать задачи управления техническим состоянием, оптимизации показателей надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов.

Библиографические ссылки

1. Емелин Н. М. Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1995. 128 с.
2. Невзоров В. Н., Сугак Е. В. Надежность машин и оборудования. Ч. 2. Проектирование, эксплуатация, экспериментальные исследования / Сиб. гос. технологич. ун-т. Красноярск, 1998. 264 с.
3. Невзоров В. Н., Сугак Е. В. Надежность машин и оборудования. Ч. 1. Основы теории / Сиб. гос. технологич. ун-т. Красноярск, 1998. 240 с.
4. Сугак Е. В. [и др.]. Надежность технических систем. Красноярск : Раско, 2001. 608 с.
5. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Планирование системы технического обслуживания // Вестник СибГАУ. 2006. № 6 (13). С. 66–70.
6. Сугак Е. В. Оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных механизмов и машин // Современные проблемы теории машин. 2019. № 7. С. 86–91.
7. Сугак Е. В., Окладникова Е. Н. Прикладная теория случайных процессов / Сиб. гос. технологич. ун-т. Красноярск, 2006. 168 с.

УДК 621.311.69

**ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ФЕРРОЗОНДОВОГО ДАТЧИКА
МАЛЫХ ТОКОВ**

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 методы повышения быстродействия феррозондовых датчиков тока. Авторами предложен метод, позволяющий увеличить полосу пропускания и уменьшить время реакции на ступеньку. Изготовлен и испытан прототип датчика с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: феррозонд, датчик тока, токи утечки, дифференциальный ток, устройства защиты.

Широкое использование сетей постоянного тока, связанное с ростом и развитием возобновляемой энергетики, ведет к необходимости разработки современных устройств защиты таких сетей. В настоящее время устройства защиты постоянного тока включают в себя устройства защиты от короткого замыкания, устройства защиты от перенапряжений, устройства защитного отключения (УЗО) и детекторы неисправностей изоляции. Феррозондовые датчики тока используются в качестве чувствительных элементов в УЗО постоянного тока, аналогично с трансформаторами тока в УЗО переменного тока. Также феррозондовые датчики тока могут применяться в системах непрерывного контроля сопротивления изоляции и токов утечки, например, в испытательном стенде для испытания системы электропитания космического аппарата [1].

Применение датчика тока в защитных устройствах накладывает более жесткие требования на его характеристики, такие как ширина полосы пропускания, погрешность, время реакции на ступеньку и дрейф нуля. Такие защитные устройства находят применение в электромобилях [2], солнечной энергетике и при испытаниях систем электропитания космических аппаратов [3]. Датчики с малым временем реакции на ступеньку требуются в случаях, когда важно быстрое отключение линии, это особенно важно при электрических испытаниях дорогого и нестандартного оборудования. Также низкое время реакции на ступеньку необходимо в системах с большим количеством быстрокоммутируемых нагрузок.

По сравнению с датчиками, основанными на других принципах работы, феррозондовый имеет значительные преимущества в измерении малых дифференциальных токов (по сравнению с эффектом Холла и магниторезистивными датчиками), самой важной из которых является это малое смещение нуля, связанное с постоянным циклическим перемагничиванием магнитопровода по предельной петле гистерезиса В-Н.

Такое перемангничивание подавляет магнитное смещение сердечника, чем обеспечивает низкое смещение нуля и дрейфа, а также восстановление после воздействия большого тока, поскольку любая постоянная намагниченность удаляется с последующими циклами намагничивания [4]. К недостаткам такого вида датчиков можно отнести:

- сложность схемы;
- высокий уровень шума на частоте возбуждения, включая шум, наводимый на первичную обмотку (напряжение, приложенное к обмотке возбуждения, умноженное на коэффициент N витков, который виден на первичной обмотке, когда сердечник не в насыщении, то является трансформатором), однако возможно использование дополнительного сердечника подключенного с обратной полярностью для снижения шума напряжения в первичной обмотке [5];
- увеличение количества витков вторичной обмотки уменьшает ширину полосы пропускания [6].

Анализ датчиков малых токов тока показывает, что большинство коммерчески доступных датчиков можно разделить на две группы: датчики с узкой полосой пропускания и высокой чувствительностью и датчики с широкой полосой и низкой чувствительностью.

Существуют важные соотношения, которые следует учитывать при разработке феррозондовых датчиков малых постоянного тока, с хорошим соотношением точности и полосы пропускания: конфигурация обмотки возбуждения, частотная характеристика материала, методы выделения выходного сигнала.

В ходе работы был спроектирован и исследован экспериментальный образец датчика тока. Отличительными особенностями разработанного датчика тока являются:

- увеличенная до 18 кГц частота работы;
- фильтр с частотой среза 1 кГц;
- биполярная схема питания ± 15 В.

Структура датчика показана на рис. 1.

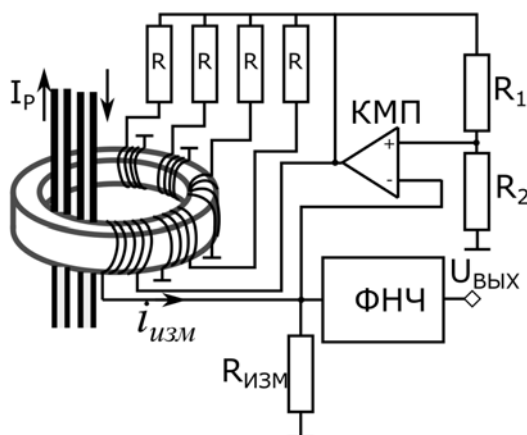


Рис. 1. Структурная схема датчика тока:
 КМП – компаратор; ФНЧ – фильтр нижних частот;
 $R_{изм}$ – измерительный резистор; R – токозадающие резисторы; R_1, R_2 – резисторы подстройки переключения; $U_{вых}$ – выходное напряжение датчика

Увеличение частоты работы датчика произведено за счет разделения обмотки возбуждения на несколько обмоток с меньшим числом витков. Это позволяет снизить индуктивность каждой обмотки, за счет чего уменьшается постоянная времени и увеличивается частота работы датчика. Резисторы R выбираются таким образом, чтобы

суммарный поток через сердечник оставался таким же, как и в случае с неразделенной обмоткой, что является необходимым условием работы феррозондового датчика.

Выходной сигнал датчика снимается с резистора $R_{изм}$, для устранения пульсаций пропускается через фильтр нижних частот ФНЧ. Фильтр имеет 8 порядок и величину подавления -120 дБ на частоте работы датчика (18 кГц).

Для исследования полученных характеристик были проведены эксперименты определения погрешности и времени переходного процесса датчика. Структурная схема эксперимента по исследованию погрешности приведена на рис. 2.

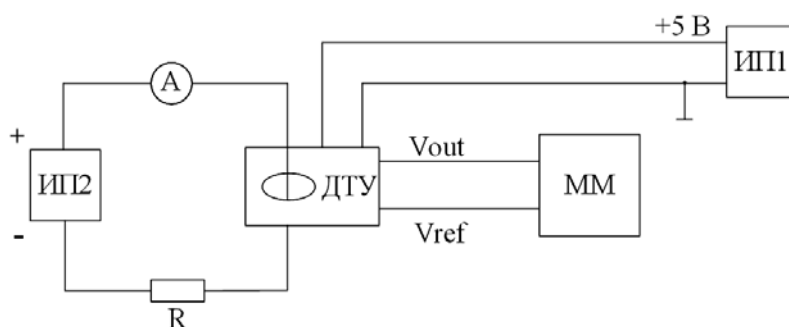


Рис. 2. Структурная схема эксперимента по исследованию погрешности датчика тока:

ИП1, ИП2 – источники питания QJE QJ5003C; А – амперметр В7-78/2; ММ – мультиметр АКТАКОМ АВМ-4403; R – резистор номиналом 510 Ом; ДТУ – макет датчика тока

Ток источника ИП2 менялся в диапазоне от 0 до 15 мА, при этом фиксировались показания амперметра и мультиметра. После линейной аппроксимации характеристики датчика вычислялся коэффициент передачи датчика, рассчитывались показания датчика в мА, вычислялась погрешность измерения. Результаты исследования погрешности приведены на рис. 3.

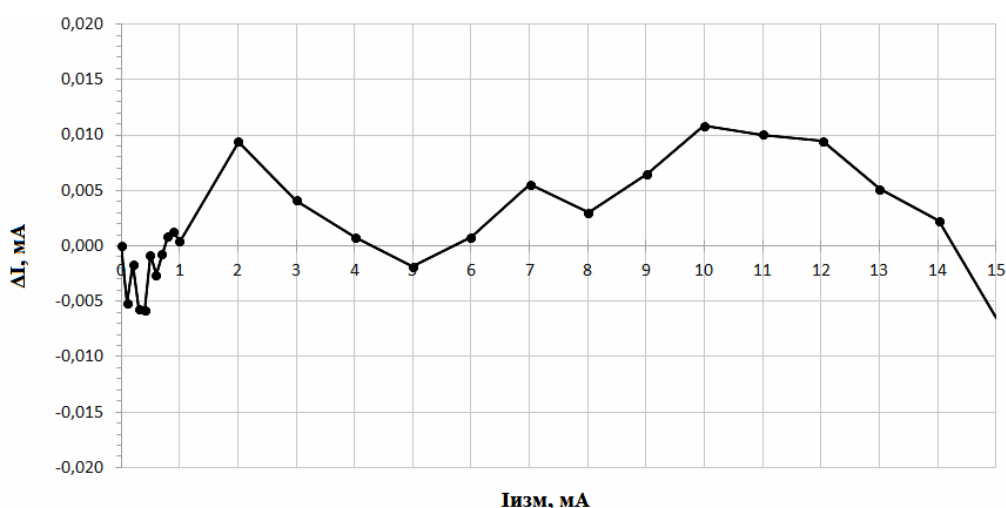


Рис. 3. График абсолютной погрешности экспериментального образца датчика тока

По рис. 3 видно, что погрешность находится в диапазоне ± 12 мкА. Время переходного процесса в полученном датчике напрямую зависит от частоты среза фильтра и составляет около 1 мс до входа в 5% трубку, и около 750 мкс при нарастании сигнала от 0 до 90% при подаче на вход ступенчатого воздействия 2 мА.

Приведенная схема датчика может применяться в устройствах защиты от токов утечки и устройствах контроля изоляции с требуемым временем размыкания менее 15 мс, в частности, для защиты человека от контакта с токоведущими элементами в высоковольтной технике, в системах электропитания высокой мощности, системах солнечной энергетики.

Время срабатывания может быть уменьшено, однако в текущей конфигурации датчика это повлечет за собой увеличение пульсаций выходного сигнала, а следовательно, увеличение погрешности измерения.

Одним из перспективных методов дальнейшего увеличения быстродействия является применение альтернативных методов выделения выходного сигнала вместо применения ФНЧ, а именно цифровой обработки сигнала, выделения второй гармоники, применения дельта-сигма модулятора.

Библиографические ссылки

1. 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).
2. 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).
3. 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).
4. Ripka P. New directions in fluxgate sensors // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2000, Vol. 215–216, Pp. 735–739.
5. Design and Characterization of a Low-Cost Self-Oscillating Fluxgate Transducer for Precision Measurement of High-Current / N. Wang, Z. Zhang, Z. Li, Q. He, F. Lin and Y. Lu // IEEE Sensors Journal. 2016, Vol. 16, Pp. 2971–2981.
6. Current Sensing Techniques: A Review / S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H. Iu and L. J. Borle // IEEE Sensors Journal. 2009, Vol. 9, Pp. 354–376.

© Штабель Н. В., Самотик Л. А., Мизрах Е. А., 2020

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА В СРЕДЕ SIMINTECH

В. А. Мызникова¹, Е. Д. Толстенков², А. В. Чубарь^{1*}

¹Сибирский федеральный университет

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

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

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

*E-mail: alexchub@mail.ru

Реализована математическая модель колесного робота в среде моделирования SimInTech для диагностики и сравнения различных вариантов управления движением робота по требуемой траектории. В связи с тем, что колесные роботы позволяют выполнять многие задачи там, где деятельность человека затруднена или невозможна, разработка их математической модели является актуальной.

Ключевые слова: управление, мобильный робот, моделирование, траектория движения.

В настоящее время бурно развивается раздел робототехники, занимающийся созданием мобильных роботов. Дальнейшие исследования новых типов мобильных роботов стимулируется многочисленными их приложениями в самых различных областях человеческой деятельности. Зачастую это те области, где жизнедеятельность человека либо затруднена, либо вообще невозможна, например, в зонах радиоактивного или химического загрязнения, при проведении подводных или космических исследований. Кроме того, подобные устройства могут заниматься пожаротушением или разминированием подозрительных предметов. В связи с этим моделирование систем управления движением подобного робота является актуальной задачей [1–3].

Среда SimInTech обладает широкими возможностями по организации вычислений, связанных с решением дифференциальных уравнений [4]. Расчетные математические модели в среде моделирования создаются посредством функционально-блочного программирования при помощи блоков, которые содержатся в различных библиотеках.

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

Для выполнения своих функциональных задач роботы должны уметь автономно перемещаться по траекториям, заданным оператором. Как правило, в современных мобильных роботах для этой цели используется навигационная система, которая определяет координаты робота, планирует траекторию в текущий момент времени и управляет его движением.

Робот представляет собой средство автоматизации, предназначенное для целенаправленного воздействия на объекты труда и имеющее собственную систему восприятия внешней обстановки и автоматического планирования своей деятельности.

Одним из классов мобильных роботов являются колесные роботы. Такие роботы не могут эффективно передвигаться по неподготовленным поверхностям. Но в случае

с подготовленными поверхностями применение колесных роботов более оправдано в силу их превосходства по экономичности, скорости передвижения и простоте управления над другими мобильными роботами, например, шагающими.

При проектировании любого робота неизбежно приходится сталкиваться с проведением испытаний робота в различных условиях. Для этого можно построить тестовую модель, но если робот является достаточно сложным, и моделей нужно построить сразу несколько, сэкономить трудовые и материальные ресурсы может помочь математическое моделирование [5].

Конструкция подвижного робота включает основание и двигательную систему, обеспечивающую требуемое направление и скорость перемещения корпуса в рабочем пространстве. Предположим, что робот состоит из абсолютно твердой платформы и имеет 4 колеса, которые могут вращаться в прямом или обратном направлениях. Под прямым направлением вращения колес и положительной угловой скоростью будем понимать такое вращение колес, которое заставляет робота двигаться в ту сторону, в которую он ориентирован.

Достаточно очевидными являются следующие суждения [6]:

- 1) для прямолинейного движения колеса должны вращаться с одинаковыми угловыми скоростями;
- 2) для того чтобы робот развернулся на месте, необходимо установить угловые скорости одинаковыми по модулю, но противоположными по направлению, т. е. знаку;
- 3) другие комбинации угловых скоростей приводят к движению по дуге.

Пусть робот движется с разными по модулю, но одинаковыми по знаку угловыми скоростями колес. Изобразим движение робота на рис. 1.

Угловая скорость движения робота определяется:

$$\omega = \frac{U_R - U_L}{D} = \frac{\omega_R - \omega_L}{D} \cdot r. \quad (1)$$

Здесь r – радиус колеса робота, U_L и ω_L – линейная и угловая скорости левого колеса, U_R и ω_R – линейная и угловая скорости правого колеса, расстояние между точками C_L и C_R . Если угловые скорости колес постоянны, то угловая скорость движения робота также постоянна, что соответствует движению робота по окружности.

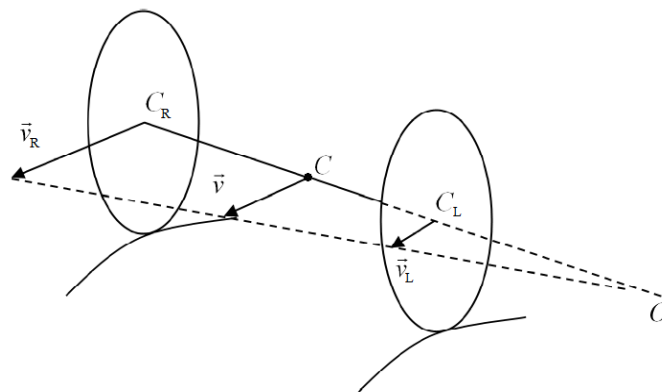


Рис. 1. Движение робота при однонаправленных угловых скоростях колес

Обозначим теперь расстояние от центра окружности O до центра робота C как R . Тогда расстояние от центра окружности до центра правого колеса будет равно $R + 0,5 \cdot D$. Отсюда получим:

$$\frac{U_R}{R + 0,5 \cdot D} = \frac{U_R - U_L}{D}. \quad (2)$$

Отсюда получим выражение для радиуса окружности R :

$$R = \frac{D}{2} \cdot \frac{U_R + U_L}{U_R - U_L} = \frac{D}{2} \cdot \frac{\omega_R + \omega_L}{\omega_R - \omega_L}. \quad (3)$$

Линейную скорость центра робота найдем, перемножив угловую скорость ω и радиус R :

$$U = \omega \cdot R = \frac{U_R + U_L}{2} = \frac{\omega_R + \omega_L}{2} \cdot r.$$

В частном случае, если угловые скорости колес совпадают, то угловая скорость робота равна нулю, радиус окружности стремится к бесконечности, то есть траектория представляет собой прямую линию. Когда скорость правого (левого) превышает скорость левого (правого) колеса, то робот движется против (по) часовой стрелки и угловая скорость ω получается положительной (отрицательной). Это верно и для положительных, и для отрицательных скоростей колес.

Если угловые скорости колес имеют разные знаки, то угловая скорость движения робота определяется выражением (1). Траекторией также является окружность с вычисляемым по формуле (3) радиусом, но ее центр расположен под платформой, между колесами робота, ведь радиус получается меньше величины $0,5 \cdot D$.

Разберем случай неотрицательных угловых скоростей колес. Пусть заданы начальные угловые скорости левого и правого колес ωL_0 и ωR_0 и начальная ориентация робота φ_0 , которую отсчитываем по часовой стрелке от отрицательной полуоси x .

При заданных пяти начальных условиях траектория робота определяется однозначно. Получим взаимосвязь между этими начальными условиями и параметрами траектории и движения робота.

Для задания движения по прямой нужно знать начальное положение робота и его начальную ориентацию, которые нам известны. Для задания движения по окружности нужно знать радиус окружности, координаты ее центра, угловую скорость движения робота по окружности и начальное положение робота на окружности.

Угловую скорость движения, радиус окружности можно найти по формулам (1) и (3). Координаты центра окружности определяются:

$$x_c = x_0 - \text{sign}(\omega) \cdot R \cdot \sin \varphi_0,$$

$$y_c = y_0 - \text{sign}(\omega) \cdot R \cdot \sin \varphi_0.$$

Рассмотрим случай, когда угловые скорости колес равны, то есть движение происходит по прямой. В этом случае направление изменения координат x и y зависит только от начального положения робота φ_0 . Для любой начальной ориентации робота при равенстве угловых скоростей колес верны следующие формулы:

$$x(t) = x_0 - U \cdot \cos \varphi_0 \cdot t = x_0 - \omega_R \cdot r \cdot \cos \varphi_0 \cdot t,$$

$$y(t) = y_0 - U \cdot \sin \varphi_0 \cdot t = y_0 - \omega_R \cdot r \cdot \sin \varphi_0 \cdot t,$$

Для корректного перехода робота на заданную окружность нужно знать начальное положение робота на этой окружности, то есть угол α_0 . Этот угол можно найти с помощью функции atan2 .

$$\alpha_0 = \text{atan2}(y_0 - y_c, x_0 - x_c).$$

Рассмотрим движение робота по окружности. Введем ориентацию на стрелочный прибор, который может показывать ограниченный диапазон значений, поэтому необходимо, чтобы угол ориентации лежал в промежутке $[0; 2\pi)$. Поскольку прямая, соеди-

няющая центр окружности с текущим положением робота, в любой момент времени перпендикулярна прямой, то свяжем ориентацию робота с углом $\text{atan2}(y - y_c, x - x_c)$, отражающим текущее положение робота на окружности. Обозначим угол $\text{atan2}(y - y_c, x - x_c)$ как β и определим эту взаимосвязь.

Если β принадлежит промежутку $-\pi / 2 < \beta \leq \pi / 2$: $\varphi = \pi - \text{sign}(\omega) \cdot \frac{\pi}{2} - \beta$.

Если β принадлежит промежутку $(\pi / 2; \pi]$ ($\beta > \pi / 2$): $\varphi = 2\pi + \text{sign}(\omega) \cdot \frac{\pi}{2} - \beta$.

Если β принадлежит промежутку $(-\pi; -\pi / 2]$ ($\beta \leq -\pi / 2$): $\varphi = \text{sign}(\omega) \cdot \frac{\pi}{2} - \beta$.

Если движение робота происходит по прямой, то его ориентация остается постоянной и равной начальной ориентации φ_0 .

Таким образом, мы построили траекторию робота для любых начальных условий и получили возможность отслеживать его ориентацию в реальном времени.

Одним из перспективных средств моделирования и разработки сложных систем является среда визуального моделирования SimInTech [4–6], которая обеспечивает:

- создание моделей технических устройств в виде структурных блок-схем;
- математическое моделирование их режимов на основе дифференциальных уравнений;
- создание составных моделей технических объектов из готовых блоков – моделей оборудования;
- интеграцию в единую комплексную модель;
- отладку алгоритмов управления на модели и реальном объекте.

Перенесем все полученные результаты в среду моделирования SimInTech [6] и получим рис. 2.

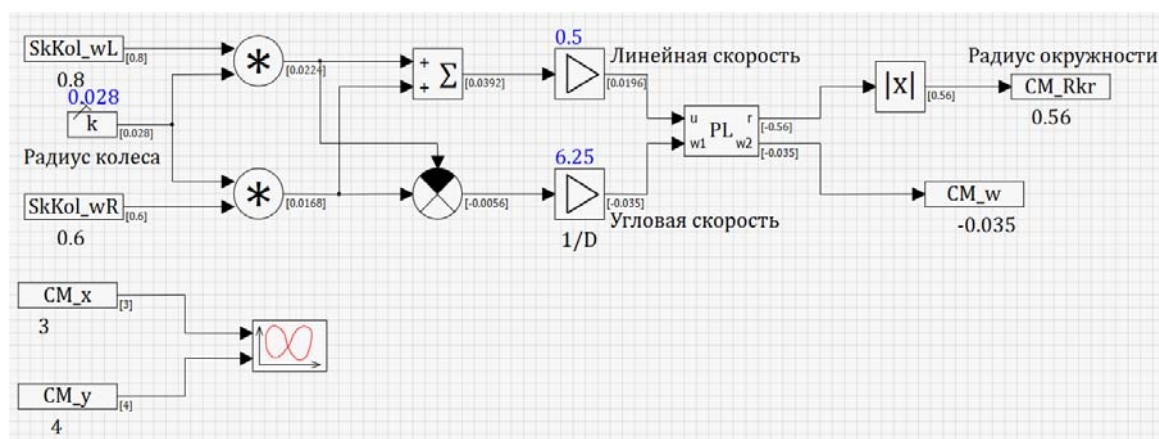


Рис. 2. Схема для расчета радиуса и угловой скорости и вывода траектории в среде моделирования SimInTech

Расчет угловой скорости и радиуса окружности по формулам (1) и (3) организуем с помощью блоков *Перемножитель*, *Сумматор*, *Сравнивающее устройство*, *Усилитель*, *Абсолютное значение* из вкладки *Операторы*. Радиус колес зададим с помощью блока *Константа* из вкладки *Источники*. Угловые скорости для расчета значений будут поступать из базы данных. Создадим в базе данных группу *SkKol* и сигналы *wR* и *wL*. Таким образом, угловой скорости левого колеса будет соответствовать сигнал *SkKol_wL*, а правого *SkKol_wR*. Для их ввода в схему будем использовать блок *Чтение* из списка сигналов из вкладки *Сигналы*.

Кроме этого, в базу данных нужно записывать рассчитанные значения угловой скорости робота и радиуса окружности, по которой он движется. Для этого будем использовать блок *Запись* в список сигналов из вкладки *Сигналы*. Радиус колеса прием равным 0,028 м, а расстояние между колесами – 0,16 м.

Для построения траектории будем использовать блок *Фазовый портрет* из вкладки *Вывод данных*, который позволяет строить график по поступающим на его вход координатам x и y . Эти координаты мы будем рассчитывать с помощью скрипта и передавать в схему через базу данных. Блок программирование обеспечивает исключение деления на ноль в формуле (3) при равенстве угловых скоростей правого и левого колес.

Создадим скрипт, который будет по заданным начальным условиям строить траекторию робота и рассчитывать его ориентацию. Для этого сначала создадим окно анимации и разместим в нем стрелочный прибор, настроив в нем угол охвата шкалы равным 2π . Его внешний вид показан на рис. 3.

Создадим скрипт в окне анимации. Блок *initializationend* содержит команды, которые будут выполняться только один раз при запуске программы. В результате получим скрипт, представленный на рис. 4.

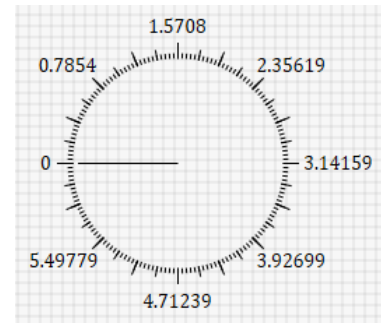


Рис. 3. Стрелочный прибор для отображения текущей ориентации робота

```

1 initialization
  x0=3; // Начальное положение робота
  y0=4; // Начальное положение робота
  SkKol_wl=0.0; // Начальные скорости левого и правого колес робота
  SkKol_ur=0.0;
  fi0=200*pi/180; // Начальная ориентация робота относительно направления влево
  xc=x0-SkKol_Rkr*cos(fi0); // Расчет координат центра окружности на основании начальных условий
  yc=y0-SkKol_Rkr*sin(fi0); // Расчет координат центра окружности на основании начальных условий
  a0=atan2(y0-yc,x0-xc); // Расчет начального угла положения робота на траектории
  T=0; // Начальное время
  CM_Ori=fi0; // Начальный момент времени
  CM_x=x0; // Записываем начальные значения ориентации и координат в базу данных
  CM_y=y0;
  b=0; // Начальное значение переменной b
end;
a=a0+CM_w*(Time-T); // Расчет угла положения робота на траектории с течением времени
if SkKol_wl==SkKol_ur then begin // Если скорости левого и правого колес равны, робот либо движется по прямой, либо стоит
  CM_x=x0-SkKol_wl*0.028*(Time-T)*cos(fi0);
  CM_y=y0-SkKol_wl*0.028*(Time-T)*sin(fi0);
  Orientation.Value=fi0; // При движении по прямой фиксируем ориентацию робота
  CM_Ori=fi0; // Записываем ориентацию в базу данных
end;
if SkKol_wl<-SkKol_ur then begin // Если скорости равны по модулю, но имеют разные знаки, робот вращается на месте
  b=fi0-CM_w*(Time-T); // Вычисляем текущую ориентацию робота при развороте на месте
  if b<0 then begin // Если она стала отрицательной, добавляем 2 пи, фиксируем ориентацию и время
    b=b+2*pi;
    T=Time;
    fi0=b;
  end;
end;
if b>2*pi then begin // Если она стала больше 2 пи, отнимаем 2 пи, фиксируем ориентацию и время
  b=b-2*pi;
  T=Time;
  fi0=b;
end;
CM_Ori=b; // Записываем ориентацию в базу данных
Orientation.Value=CM_Ori; // Отображаем ориентацию на стрелочном приборе
end;
if abs(SkKol_wl)-abs(SkKol_ur)>0 then begin // Если скорости колес не равны по модулю, то робот движется по окружности с центром (xc,yc) и радиусом CM_Rkr
  CM_x=xc+CM_Rkr*cos(a);
  CM_y=yc+CM_Rkr*sin(a);
  if (atan2(CM_y-yc,CM_x-xc)>-pi/2) and (atan2(CM_y-yc,CM_x-xc)<pi/2) then Orientation.Value=pi-sign(CM_w)*sign(SkKol_wl+SkKol_ur)*pi/2-atan2(CM_y-yc,CM_x-xc);
  if atan2(CM_y-yc,CM_x-xc)<-pi/2 then Orientation.Value=sign(CM_w)*sign(SkKol_wl+SkKol_ur)*pi/2-atan2(CM_y-yc,CM_x-xc); // Пересчет положения робота
  if atan2(CM_y-yc,CM_x-xc)>pi/2 then Orientation.Value=2*pi+sign(CM_w)*sign(SkKol_wl+SkKol_ur)*pi/2-atan2(CM_y-yc,CM_x-xc); // на траектории в ориентацию робота
  CM_Ori=Orientation.Value; // Записываем ориентацию в базу данных
end;
U1=SkKol_wl; // Запоминание скоростей левого и правого колес до изменения
U2=SkKol_ur;
if Button.Down=1 then begin // Если кнопка нажата, присваиваем скоростям показания приборов
  SkKol_wl=Left.Value;
  SkKol_ur=Right.Value;
end;
U3=SkKol_wl; // Запоминание скоростей левого и правого колес после изменения
U4=SkKol_ur;
if (abs(U1-U3)>0) or (abs(U2-U4)>0) then begin // Если произошло изменение скорости,
  fi0=Orientation.Value; // запоминаем ориентацию и координаты робота в момент изменения
  xc=CM_x;
  yc=CM_y;
  if (abs(U4-U3)>0) and (abs(U2-U1)>0) then begin // Если происходит переход с одной окружности на другую,
    R0=0.08*abs((U4+U3)/(U4-U3)); // то вычисляем радиус новой окружности,
    xc=x0-R0*sign(U2-U1)*sign(U4-U3)*sign(U1+U2)*sign(U3+U4)*cos(a); // координаты центра новой окружности
    yc=y0-R0*sign(U2-U1)*sign(U4-U3)*sign(U1+U2)*sign(U3+U4)*sin(a); // координаты ее центра
    a0=atan2(y0-yc,x0-xc); // и положение робота на новой окружности
  end;
  if (abs(U4-U3)>0) and (abs(U1)=abs(U2)) then begin // Если происходит переход с прямолинейной траектории или вращения на месте на окружность,
    R0=0.08*abs((U4+U3)/(U4-U3)); // то вычисляем радиус этой окружности,
    xc=x0-R0*sign(U4-U3)*sign(U3+U4)*sin(fi0); // координаты ее центра
    yc=y0-R0*sign(U4-U3)*sign(U3+U4)*cos(fi0); // и положение робота на ней
    a0=atan2(y0-yc,x0-xc);
  end;
  T=Time; // Запоминаем момент времени, в который произошло изменение угловой скорости колес
end;
end;

```

Рис. 4. Скрипт окна анимации для расчета траектории и ориентации робота

Создадим возможность изменять скорость робота прямо во время движения робота. Для установления угловой скорости, понадобятся 2 стрелочных прибора – для левого и правого колес. С помощью кнопки будем включать и выключать режим управления угловой скоростью. Если кнопка нажата, то есть $\text{Button.Down}=1$, то угловая скорость левого колеса SkKol_wL равна показанию стрелочного прибора Left.Value , а угловая скорость SkKol_wR равна показанию прибора Right.Value .

Контролировать момент изменения угловых скоростей, мы можем с помощью присваивания переменным угловой скорости значение текущих скоростей колес, затем изменять скорости колес в соответствии с показаниями стрелочных приборов и после записывать скорости в переменные угловые скорости после изменения.

В первую очередь нужно сообщить о том, что произошло изменение угловой скорости хотя бы одного колеса.

В первую очередь нужно сообщить о том, что произошло изменение угловой скорости хотя бы одного колеса.

1. Рассмотрим переход с одной окружности на другую.

$$x_c = x - \text{sign}(U2 - U1) \cdot \text{sign}(U4 - U3) \cdot R \cdot \cos \beta, \quad (4)$$

$$y_c = y - \text{sign}(U2 - U1) \cdot \text{sign}(U4 - U3) \cdot R \cdot \sin \beta. \quad (5)$$

В силу периодичности функций косинуса и синуса, вместо угла β в формулах (4) и (5) в скрипте можно использовать угол $\varphi_0 + \omega t$, отличающийся от β целым числом периодов. Это позволит не запоминать дополнительно координаты центра окружности, с которой происходит переход на новую окружность.

2. При переходе с прямой на окружность выполняются условия $|U4 - U3| > 0$ и $U1 = U2$. В этом случае координаты центра окружности находятся точно так же, как и при заданных начальных условиях. Только в качестве угла φ_0 используется ориентация в тот момент, когда произошло изменение угловой скорости, а в качестве координат x_0 и y_0 координаты робота в этот же момент.

3. Рассмотрим переход с окружности на прямую. Поскольку движение по прямой однозначно определяется ориентацией робота, нужно лишь принять в качестве нового значения φ_0 ориентацию в тот момент, когда произошло изменение угловой скорости, а в качестве новых начальных координат x_0 и y_0 координаты робота в этот же момент.

4. При переходе с прямой на прямую, как и при переходе с окружности на прямую, для задания новой траектории достаточно лишь зафиксировать ориентацию и координаты в момент изменения угловой скорости.

Также при написании скрипта, необходимо зафиксировать время в момент изменения угловой скорости, записав его, например, в переменную T . А вместо аргумента Time у всех функций $x(t)$ и $y(t)$ писать смещенный аргумент $(\text{Time}-T)$. Только нужно будет в блок `initialization` записать, что при начале расчета $T = 0$. Траектория робота при произвольном изменении угловых скоростей колес показана на рис. 5.

Рассмотрим вращения на месте, при этом, координаты центра робота не меняются, но меняется ориентация робота. Необходимо вычислить угол поворота, и если он стал меньше нуля, прибавлять к нему 2π , обнулять время при каждом таком переходе через 0 и запоминать увеличенный на 2π угол поворота после его перехода через 0. Аналогично будем поступать и при превышении углом значения 2π , только в этом случае будем уменьшать угол поворота на 2π , а не увеличивать. Еще нужно учесть, что вращение на месте по часовой стрелке соответствует отрицательному значению ω и увеличению угла ориентации, а вращение против часовой стрелки соответствует положительному значению ω и уменьшению угла ориентации. Поэтому при вычислении угла ориентации нужно не прибавлять ωt , а отнимать.

И еще при вращении на месте модуль разности скоростей колес отличен от нуля. Поэтому прежнее условие включает и случай вращения на месте, и чтобы его исключить, нужно изменить условие на отличие от нуля модуля разности модулей. Изменится и условие перехода на окружность с вращения на месте или с прямой. Если раньше оно требовало равенства скоростей $U1$ и $U2$, то теперь нужно потребовать равенства модулей этих скоростей.

Траектория робота после внесения всех изменений представлена на рис. 6.

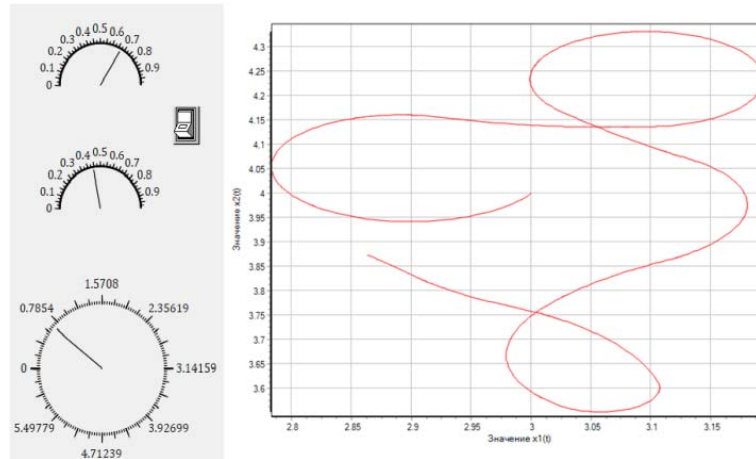


Рис. 5. Траектория робота, полученная произвольным изменением угловых скоростей колес

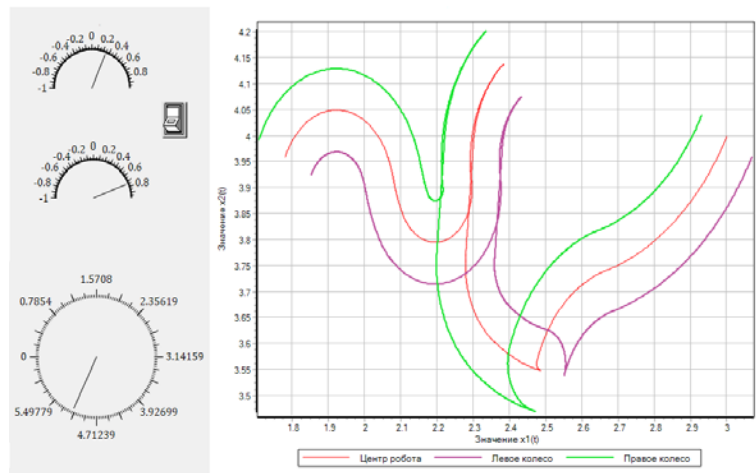


Рис. 6. Траектория робота и колес при произвольном изменении угловой скорости колес

Чтобы реальная траектория не отличалась от заданной нужно начинать поворот раньше, чем робот придет в новую заданную точку. Заменим кривую траектории ломаной, представляющую собой набор координат точек. Для движения робота по такой траектории нужно, во-первых, создать панель управления, которая преобразовывала бы задаваемые нажатием мыши на сенсор координаты в массив значений абсцисс и массив значений ординат, а также изображала бы задаваемую траекторию на графике для удобства. Во-вторых, нужно преобразовывать последовательность координат точек в последовательность заданных ориентаций робота. И, в-третьих, нужно подавать эти ориентации на вход в определенные моменты, которые зависят от текущего положения робота. После внесения определенных поправок получим траекторию, показанную на рис. 7.

Таким образом, получена и реализована в среде SimInTech кинематическая модель колесного робота. Было смоделировано движение робота при прямом направлении вращения колес, обратном направлении вращения и противоположных направлениях вращения.

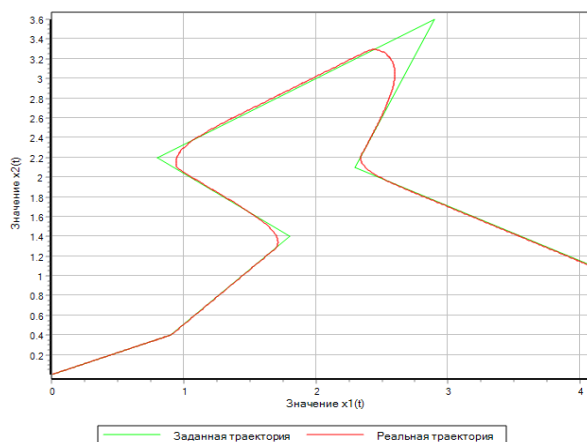


Рис. 7. Исправленная траектория робота

Построена и протестирована модель устройства управления, формирующая управляющие воздействия на двигатели колес по величине отклонения текущей ориентации колесного робота от заданной. Эти воздействия позволяют привести ориентацию робота к желаемой ориентации. Получены показатели качества для различных значений скорости поворота робота. Несмотря на то, что данная модель пренебрегает действием многих сил, возникающих во время движения, она позволяет выявить влияние на движение и траекторию робота таких факторов, как радиус колес, расстояние между ними, величина подаваемого на двигатели напряжения во время поворота.

Библиографические ссылки

1. Звонарев Д. А. Управление мобильным роботом с электрическим двигателем // Известия Тул. гос. ун-та. 2011. № 2. С. 368–372.
2. Бартенев В. В., Яцун С. Ф., Аль-Еззи А. С. Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости // Известия Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2011. Т. 13, № 4. С. 288–293.
3. Андрианова О. Г. Моделирование движения колесного робота по заданному пути // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана : электрон. журн. 2011. № 10. С. 1–15.
4. Грищенко И. А., Чубарь А. В. Создание математической модели робота с дифференциальным приводом // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово : Зап.-Сиб. науч. центр. 2016. Т. 2. С. 35–37.
5. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech : практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов, Е. А. Шабаев, О. С. Козлов и др. М. : ДМК Пресс, 2017. 424 с.
6. Мызникова В. А., Толстенков Е. Д., Чубарь А. В. Построение системы управления движением автономного объекта в среде SimInTech // Робототехника и искусственный интеллект : материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. 2019. С. 326–332.

**THE SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR TESTING
A DIGITAL COMPENSATOR IN THE CONTROL LOOP
OF A SWITCHING CONVERTER**

A. A. Druzhinin, A. V. Puchkov, G. M. Grinberg

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Alex-Druzh@mail.ru

In this article, we have described the problem of determining the correct implementation of a digital compensator in the feedback loop of the switching converter before closing the feedback loop. The way of verification of the structure and coefficients of the digital compensator was offered by comparing its response to the typical inputs with the response on the same inputs of its digital model in Matlab.

Keywords: switching converter, digital control system, digital filter, testing.

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ
ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА В КОНТУРЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

А. А. Дружинин, А. В. Пучков, 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: Alex-Druzh@mail.ru

Описана проблема определения корректности реализации цифрового регулятора в контуре обратной связи импульсного преобразователя до замыкания обратной связи. Предложен способ верификации структуры и коэффициентов цифрового регулятора на основе сравнения его реакции на стандартные воздействия, с реакцией на аналогичные воздействия его цифровой модели в пакете Matlab.

Ключевые слова: импульсный преобразователь, цифровая система регулирования, цифровой фильтр, испытания.

Introduction

Currently, various electronics are used, one of the main parts of that is power supplies. Sometimes the performance and reliability of entire systems intended for industrial use depend on the quality of the power supply voltage. There are two types of power supplies, this is a linear power supply (LPS) and the switched-mode power supplies (SMPS). SMPS have a greater power density and efficiency than LPS. Usually, SMPS consists of a power stage that converts energy and a control system that performs the function of regulating the output voltage or current.

The development of conversion technology, in particular converters, which operate with high power, is leading to transfer from analog control systems to digital control systems. In order to implement an analog control system, Pulse-width modulation (PWM) controllers are used. Using PWM controllers design various control systems, usually, this is the voltage control

system, the average current mode control and the peak current mode control [1]. Digital control systems might be implemented with the same types of regulating as analog systems, however, they use for a control function a digital signal processor (DSP), a universal microcontroller or Field-programmable gate array (FPGA). More and more engineers are using in their projects the digital control systems for designing power supply. The reason for this phenomenon is associated with a number of advantages of a digital control system over an analogue one:

- the flexibility of digital control systems (the ability to programmatically change the structure and coefficients of regulators);
- the stability of dynamic characteristics and their independence from environmental parameters (pressure, temperature);
- the high coefficient of repeatability of the parameters of the regulators from product to product.

The last statement is especially important when are designed converters with high power because they are often built by a parallel connection of low-power unified power units.

The field of application of the digital control systems is constantly growing so there is a need to create methods and means of testing digital control devices.

For the implementation of an analog control system, PWM controllers and an operational amplifier are needed. Before mounting these devices ones are tested with typical methods. This is electrical and functional tests where engineers test operating voltages, current consumption, other important parameters from the datasheet. The passive elements, such as resistors and capacitor, which are used to form the structure and coefficients of an analog compensator (Proportional, Proportional-integral, and Proportional-integral-derivative) are tested on compliance their values by standard methods and means [2; 3].

The other case, when we operate with digital control systems. Here, the regulator is a digital filter, which may have a finite impulse response (IPR) or an infinite impulse response (IIR). The figure 1 depicts the structural scheme of the FIR filter, The figure 2 depicts the structural scheme of the IIR filter.

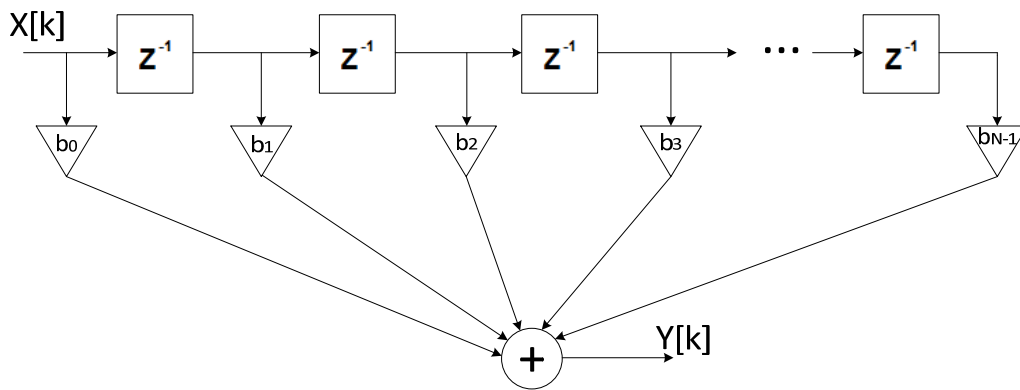


Fig. 1. The structural scheme of the FIR filter:

$X[k]$ – the sampled input signal; $Y[k]$ – the sampled output signal;
 $b_0 \dots b_{N-1}$ – coefficients of a filter transfer function; Z^{-1} – the hold delay

The transfer function of FIR filter is determined by an equation (1), and equation (2) is the transfer function for IIR filter.

$$D(z) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i \cdot z^{-i}, \quad (1)$$

$$D(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} b_i \cdot z^{-i}}{1 + \sum_{k=1}^{M-1} a_k \cdot z^{-k}}. \quad (2)$$

The regulators are shown in figures 1 and 2 implemented by digital devices, which perform simple operations of storage, multiplication, and addition. The errors in the implementation of the calculated compensator can appear on the stage of programming of the structure of compensator, on the stage of configuration coefficients of the compensator or while code is loading in a digital control device. Any errors, while hardware SMPS are tested, is inadmissible. Ones can lead to:

- obtaining dynamic characteristics that are different from the calculated ones;
- subharmonic oscillations in the closing feedback loop;
- destruction of the control object (SMPS), if the system will become unstable.

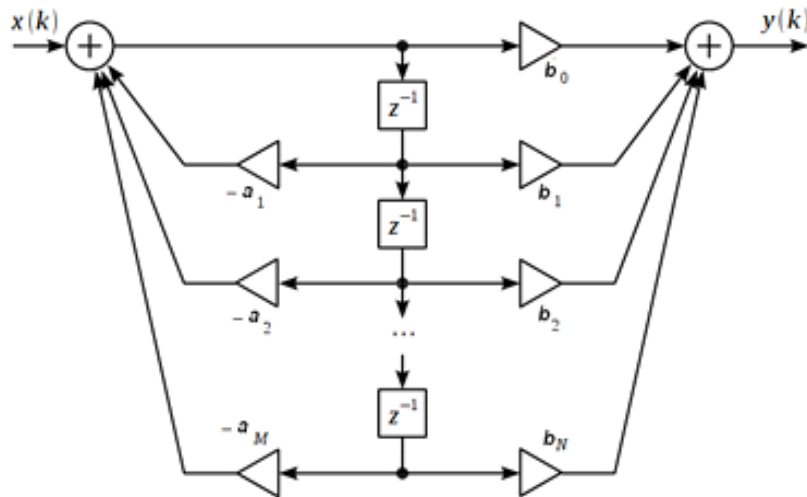


Fig. 2. The structural scheme of the IIR filter:
 $x[k]$ – the sampled input signal; $y[k]$ – the sampled output signal;
 $b_0 \dots b_{N-1}, -a_1 \dots -a_M$ – coefficients of a filter transfer function;
 Z^{-1} – the hold delay

In order to avoid these errors, which can lead to the breaking of a tested object, in this article we propose an approach to preliminary assay, which builds on comparing responses of the digital control device (DCD) and its digital model on typical inputs. The Digital model is built in Matlab.

The software-hardware system for testing of the digital controllers.

The digital controller functionally is the digital filter that has a number of the unique characteristics:

- 1) the response to a step effect,
- 2) the response to a pulse action,
- 3) the frequency and phase response.

The package of mathematical simulation Matlab allows creating precision model of the digital controller to which it is possible to transmit test signals and receive unique responses.

In figure 3 block diagram of the software-hardware system is presented for testing and characterization from the digital controller of pulse converter. Before testing a personal computer (PC) and the source of the sinusoidal signal connects to the hardware digital control device that operates in a pulse converter together with a power stage and set of sensors. On the computer the software (Matlab) is installed for a simulation of the digital filters and for organizing the exchange channel between PC and DCD via digital interface.

DCD programmable cut off from the loop control. Signals of disturbance are transmitted from PC to DCD in digital form – signals of type step impact and sequence of pulses of specified configuration. Response of the digital filter on these impacts is transmitted via digital interface back to PC and it goes for processing in Matlab.

In testing on harmonic actions the sinusoidal signal of a certain frequency is transmitted on DCD and it is digitized and goes at input of the digital filter. Response of the filter arrives on PC via digital interface and it is processed means of Fourier analysis. Result of processing is amplitude and phase of signals of given frequency that allows building the frequency response. Analysis of parameters is conducted on frequencies of conjugation in order to assess frequency response.

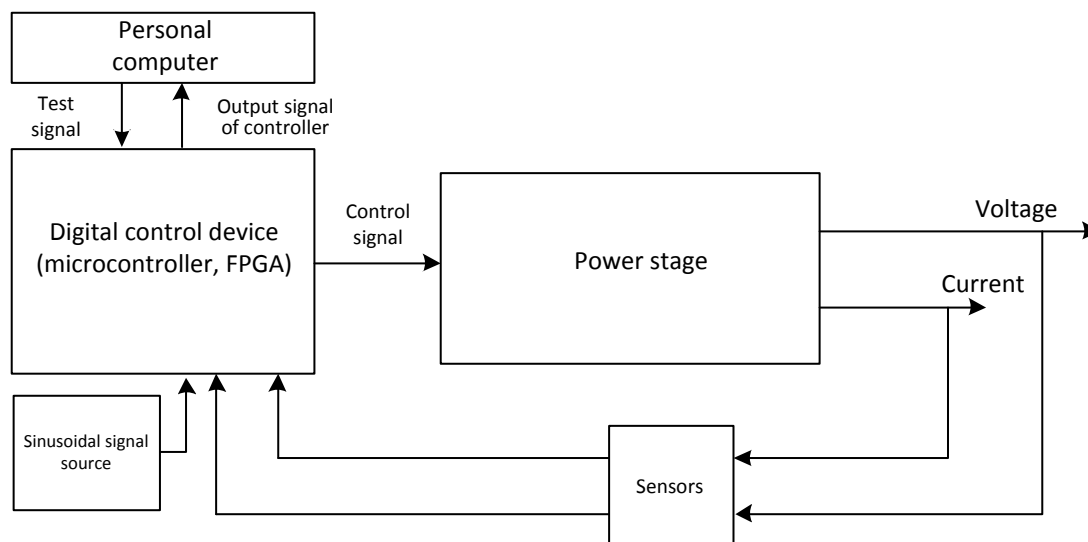


Рис. 3. Block diagram of the software-hardware system

Models of actions with similar parameters are transmitted in modeling of the implemented filter on reference model (RM) resulting in response is formed on listed actions downstream of RM. Opinion on correct of the implemented of digital filter is done by comparison of received responses DCD with RM (responses should coincide) [4–5].

When reference and real responses are not coinciding it is possible to run diagnostic via indirect signs. For example frequency response allows identify problem related with incorrect realization of the controller structure by the presence (lack) sites with different slopes.

Conclusion

Submitted in the article approach for testing of digital controllers will allow conducting assessment of correctness calculation and implementation of digital filters that are becoming increasingly urgent for applying in developments of pulse power supply. The software-hardware system is universal and suited to operate with different DCD (from microcontrollers to FPGA). It intends to continue research to design the workplace for proposed type of testing and conduct experimental verification of functionality.

References

1. Meleshin V. I. Tranzistornaya preobrazovatel'naya tehnika. Moskva : Tehnosfera (Transistor converter technology. Moscow : Technosphere), 2005. 632 s. (In Russ.)
2. GOST 21342.20–78. Rezistory. Metod izmereniya soprotivleniya (Resistors. Method of measuring resistance). Vveden v dejstvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta standartov SSSR ot 21.02.1978 № 508: data vvedeniya: 01.07.1979. (In Russ.)
3. GOST 28885–90. Kondensatory. Metody izmerenij i ispytanij (Capacitors. Methods of measurement and testing). Utverzhden i vveden v dejstvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po upravleniyu kachestvom produkcii i standartov ot 23.12.90 № 3746: data vvedeniya: 01.01.1992. (In Russ.)

4. Ajficher E. S., Dzhervis B. U. Cifrovaya obrabotka signalov: prakticheskiy podhod, 2-e izdanie (Digital Signal Processing: A Practical Approach, 2nd Edition.). : Per. s angl. M. : Izdatelskiy dom "Vilyams", 2004. 992 s.: il. Paral. tit. Angl. (In Russ.)

5. Cifrovaya obrabotka signalov i Matlab: ucheb. Posobie (Digital Signal Processing and Matlab : Textbook. Allowance) / A. I. Solonina, D. M. Klionskiy, T. V. Merkucheva, S. N. Perov. SPb. : BHV-Peterburg. 512 s.: il. Uchebnaya literatura dlya vuzov. (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М. : Техносфера, 2005. 632 с.

2. ГОСТ 21342.20–78. Резисторы. Метод измерения сопротивления. Введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов СССР от 21.02.1978 № 508: дата введения: 01.07.1979.

3. ГОСТ 28885–90. Конденсаторы. Методы измерений и испытаний. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартов от 23.12.90 № 3746: дата введения: 01.01.1992.

4. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. : пер. с англ. М. : Вильямс, 2004. 992 с.: ил. Парал. тит. англ.

5. Цифровая обработка сигналов и Matlab : учеб. пособие / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Перов. СПб. : БХВ-Петербург. 512 с.: ил. (Учебная литература для вузов).

© Druzhinin A. A., Puchkov A. V., Grinberg G. M., 2020

УДК 629.7.018

ТРЕБОВАНИЯ К НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В ПРОЦЕССЕ ХРАНЕНИЯ

А. В. Власенко, И. А. Клешина, А. С. Торгашин, А. М. Бегишев

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

Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: lescha.vlasenko.94@mail.ru

Изделия ракетно-космической промышленности используются по своему прямому назначению по истечению определенного периода, которое для некоторых из них составляет довольно продолжительный отрезок времени. При этом отследить и спрогнозировать изменение надежности изделия в процессе хранения очень трудно из-за многофакторности в зависимости от условий хранения и свойств используемых материалов. В данной статье описаны основные методы определения надежности изделия в процессе хранения, используемые Россией и США, приведены примеры исследования изменения надежности при хранении.

Ключевые слова: надежность при хранении, испытание на хранение, ускоренный метод испытания на хранение, ускоренные испытания.

Многие виды вооружения и военной техники, такие как ракеты и их системы, требуют длительного хранения перед использованием. Тем не менее, в случае их применения в боевых или учебных целях, необходима высокая безотказность и стабильность. Для прогнозирования изменения эксплуатационных характеристик и показателей надежности даже после длительного хранения отечественные и зарубежные специалисты проводят испытания и изучают проблемы хранения таких видов продукции военного назначения.

Испытание на хранение предназначено для имитации явлений, возникающих в результате воздействия одного или нескольких внешних факторов на изделия в течение нормального срока хранения [1].

Во время Второй мировой войны, наряду с началом массового использования ракет, встал вопрос их надежности после хранения. В то время первая в мире серийно производившаяся боевая баллистическая ракета немецкого производства «Фау 2» была достаточно надежной, однако после длительного хранения, под воздействием факторов окружающей среды, вероятность ее успешного запуска и точность значительно снижались. Таким образом, стала наглядно видна серьезность проблемы, и мировые державы впоследствии начали изучать надежность ракет в процессе хранения.

Например, в 1959 году с целью определения возможного срока хранения топлива ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) стратегической ракеты «Минитмен 1» американские исследователи реализовали программу мониторинга и исследования его характеристик. Прежде чем двигатели были официально приняты военными, отдельные образцы топливных зарядов, уменьшенные копии и полноразмерные РДТТ хранились

в реально возможных условиях консервации, подвергаемых необходимому контролю. В течение этого времени проводилась проверка химических и физических свойств образцов, после чего прогнозировалось изменение характеристик двигателя. Между тем, проверка конструктивной прочности и статические испытания проводились на масштабных копиях и полноразмерных двигателях. На последних этапах испытаний проводилась проверка химических и физических свойств топлива полноразмерных двигателей, которые сравнивались со свойствами образцов хранившихся в таких же условиях, в каких будет храниться реальное изделие, что позволяло понять, возможность применимости полученных результатов исследований образцов к полноразмерным зарядам.

С целью совершенствования метода мониторинга ухудшения свойств изделия военные США ввели программу долгосрочного анализа продолжительности сохраняемости, состоящую из четырех основных аспектов: анализ возможных причин отказа, испытания в экстремальных условиях, построение закона распределения вероятности отказа и испытание на ускоренное старение. С вероятностью 0,90 при надежности 99 %, эта программа установила срок хранения РДТТ первой ступени «Минитмен 1» до 11 лет и до 19 лет для третьей ступени. Впоследствии в США была предложена программа прогнозирования срока службы, в которой ученые попытались уменьшить неопределенность прогноза срока службы двигателей из-за механики микротрещин и взаимосвязи между химическими изменениями и механическими свойствами [3].

В США испытания воздействий хранения проводятся в условиях близких к реальным, которые лишь дополняются ускоренными исследованиями. Они считают, что результаты, полученные в ходе естественных испытаний, являются более реалистичными и достоверными, поскольку механизмы деградации изделия, как и у образца, испытываемого на хранение в реальных условиях, в зависимости от времени прошедшего с начала хранения могут отличаться, для более точных исследований необходимо проводить испытания как можно дольше.

В отличие от США, Россия чаще проводит ускоренные испытания имитации хранения ракетно-космических изделий. Благодаря таким испытаниям, которым подвергаются детали, сборочные единицы, агрегаты, системы и изделиям целиком, им назначается гарантийный срок хранения (ГСХ) и прогнозируется состояние с большой достоверностью при высокой надежности для таких сложнейших систем. Достижения в этой области стали доступны благодаря богатой истории исследований изменений свойств хранения, основная часть из которых была проведена в 1980-х годах. Главное назначение этих испытаний в том, чтобы в зависимости от различных факторов и условий испытаний, получить информацию о воздействии хранения на различные составляющие изделия и на ее основе, применив теоретические методы и проведя анализ, получить с большой достоверностью ГСХ изделий. Основные особенности таких испытаний следующие.

- Благодаря ускоренным испытаниям анализ образцов и их исследование проводится в кратчайшие сроки (в среднем порядка шести месяцев), а срок хранения оценивается до 10 лет.

- В лабораторных условиях выявляются комплектующие, имеющие наименьшие сроки хранения, после чего исследуются вопросы об изменении условий хранения, о возможности их замены на изделия в процессе его хранения или о переходе к другим комплектующим.

- Испытания могут моделировать различные условия окружающей среды, включая условия реального хранения. Это позволяет сделать лабораторные испытания менее дорогими и более эффективными, чем обычное хранение в реальных условиях.

- Из-за ограничений подобных испытаний, их результаты могут нуждаться в корректировке на основе данных полученных при хранении с реальным периодом времени.

– Поскольку готовые изделия стоят очень дорого, для испытаний берется, как правило, небольшое количество упрощенных образцов, это увеличивает риск получения недостоверных результатов испытаний.

Основной особенностью ускоренных испытаний на хранение в России является то, что в нашем государстве имеется прочная техническая база, состоящая из множества технических учреждений, с соответствующими приборами и устройствами необходимыми для проведения испытаний на хранение, на основании исследований которых создается надежная база данных и соответствующие стандарты. Кроме того, наша страна имеет серьезные достижения в фундаментальных теоретических исследованиях и отработанные методики ускоренных испытаний хранения ракетно-космических изделий и методы оценки их срока службы при хранении. Поэтому, по мнению большинства мировых специалистов в области испытаний, в России существует самая совершенная на данный момент технология ускоренных испытаний на хранение.

При выборе испытаний на хранение необходимо учитывать [2]:

- 1) цель проведения испытаний (определение влияния хранения на основные эксплуатационные характеристики изделия и на его надежность; установление оптимальных условий хранения; назначение гарантийного срока и т. д.);
- 2) наиболее вероятные причины и виды отказов;
- 3) те воздействия окружающей среды, которые, как ожидается, больше всего влияют на изменения характеристик объекта исследования;
- 4) возможность проведения ускоренных испытаний, при условии схожести деградации объекта при них с деградацией в реальных условиях.

Таким образом, наиболее часто используемые в настоящее время методы исследования надежности при хранении (ускоренное тестирование хранилища и метод реального хранения) имеют как свои преимущества, так и недостатки.

Испытания хранения в условиях реального воздействия согласуется с реальной картиной протекающих процессов, но для полноты этих испытаний требуется гораздо больше времени, чем для проведения ускоренных. Ускоренные же испытания, напротив, менее достоверны и требуют меньше времени для проведения и эффективны в поиске комплектующих обладающих наименьшими сроками хранения.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 28232–89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Руководство по применению испытаний стандартов МЭК 68 (ГО) для имитации воздействий хранения. 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. WANG Zheng. Prediction and Prolongation of Solid Rocket Motor Service Life. Journal Of Solid Rocket Technology. 1999, No. 1.

© Власенко А. В., Клешина И. А., Торгашин А. С., Бегишев А. М., 2020

ОЦЕНКА УРОВНЕЙ ПЕРЕГРУЗОК НА УСТАНОВКИ ПРИБОРОВ И АГРЕГАТОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. А. Иголкин, А. А. Попков, А. Г. Филипов

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева

Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34

E-mail: igolkin97@gmail.com, artiem.popkov.95@mail.ru, iskander-filipov@yandex.ru

Рассматривается проблема точности динамических расчетов конструкции изделий ракетно-космической техники. Предложен метод исследования нагрузок на установки бортовой аппаратуры космического аппарата на участке полета в составе ракеты космического назначения. Задача относится к типу динамических и решается в основном для навесного оборудования, которое крепится к корпусу изделия.

В качестве примера расчета выбраны гироскопы системы управления движением малого космического аппарата «АИСТ-2Д». Для определения значений нагрузок использована конечно-элементная модель изделия. В среде FEMAP with NX NASTRAN проведен расчет с использованием анализа переходного процесса. В результате решения, на основе полученных данных, сделаны выводы об адекватности использования данного метода расчета. Приведены графики для сравнения с экспериментальными данными.

Цель данной статьи – показать один из вариантов расчета динамических нагрузок на бортовую аппаратуру летательного аппарата. Значения нагрузок необходимы для прочностных расчетов, результаты которых учитываются при проектировании креплений приборов и агрегатов.

Ключевые слова: космический аппарат; расчетный случай; вибропрочность; конечно-элементная модель; динамический анализ; анализ переходного процесса; матрица жесткости, матрица демпфирования.

Введение

В современном проектировании изделий ракетно-космической техники все большее внимание уделяется динамике конструкций. Важными параметрами циклически изменяющихся нагрузок являются частота и амплитуда внешнего воздействия (удары, вибрации, шум). Динамическое поведение конструкции предсказать достаточно сложно и эти задачи представляют высокую актуальную значимость, так как от точности определения характеристик возмущающих факторов зависят результаты прочностных расчетов узлов крепления.

Установки агрегатов, приборов, такие как приборные рамы, узлы крепления отдельных агрегатов, приборов, магистрали пневмогидросистем и другие подобные элементы конструкции, закрепляемые на силовом корпусе изделия, в процессе эксплуатации изделий подвергаются воздействиям статистических и динамических (вибрационных) ускорений (перегрузок), обуславливающих инерционное статическое и динамическое нагружение конструкции установок.

Расчеты динамических перегрузок на установки агрегатов, приборов проводятся в два этапа:

- 1-й этап – расчёт проектных нагрузок;
- 2-й этап – расчёт уточненных нагрузок.

Расчёты проектных нагрузок проводятся на стадиях технического проекта, эскизного проекта, рабочего проекта, когда конструкторская документация на установки не разработана. Расчеты проводятся, в основном, для обобщенных установок, без учета их индивидуальных особенностей и характеристик, с использованием проектных исходных данных по жесткостным, массовым и центровочным характеристикам установок, а также статистических данных по частотным и демпфирующим характеристикам установок [1].

Расчеты уточненных нагрузок проводятся при необходимости (с целью уменьшения проектных нагрузок и т. п.) с учетом индивидуальных особенностей и характеристик установок. Эти расчеты проводятся для конкретных установок, по которым имеются конкретные исходные данные (конструкторская документация или обезразмеренные прорисовки, жесткостные, массовые, инерционные и центровочные характеристики и т. п.).

После расчетов уточненных нагрузок проводятся динамические (вибропрочностные) испытания объекта исследования.

Роль конечно-элементной модели в решении вибропрочностных задач

Основная цель испытаний на вибропрочность – определение способности изделия противостоять разрушающему действию вибрации (комплексные испытания). Для автономных испытаний главной задачей выступает работоспособность бортовой аппаратуры. Определенные параметры должны поддерживаться в заданных пределах, устанавливаемых на основе требований, предъявляемых научно-технической документацией на данный тип изделия.

Применение метода конечных элементов для имитации испытаний обеспечивает сокращение затрат на проведение испытаний, улучшает качество отработки динамической прочности, а также повышает надёжность изделия. Важно отметить, что динамическая модель должна пройти верификацию (модальный анализ). В противном случае результаты расчетов будут ненадежными и недостоверными.

Динамическая конечно-элементная модель (КЭМ) предназначена для имитации поведения реальной конструкции как при испытаниях опытного образца, так и штатного изделия. Необходимо отметить, что динамические глобальные и локальные КЭМ должны содержать помимо матрицы жесткости, матрицы демпфирования и матрицы масс.

Таким образом, динамическая конечно-элементная модель имеет очень важную роль в решении задачи обеспечения вибропрочности конструкции изделия [2].

Расчет уточненных нагрузок на гироскопы космического аппарата

В систему управления движением малого космического аппарата «АИСТ-2Д» входит 4 гироскопа [3]. Определение максимального динамического отклика одного из них – основная задача данной статьи. Детальное описание расчета и результатов приведено в источнике [4].

При расчете использована верифицированная динамическая КЭМ космического аппарата «АИСТ-2Д».

Масса маховика гироскопа – 4,6 кг (*MASS*-элемент). Жесткость кронштейна учтена в элементе типа *CBUSH*. Внешнее воздействие задано в виде функций ускорений на временном промежутке в узлы конечно-элементной модели, имитирующие стык космического аппарата с переходным отсеком.

Для решения данной задачи выбран анализ переходного процесса. Рассматриваются вынужденные колебания, исследуется сравнительно короткий промежуток времени, когда движение не является установившимся.

Под переходным процессом понимается отклик конструкции на произвольное динамическое воздействие на начальном отрезке времени, когда движение не является установившимся и складывается из собственных колебаний конструкции, вызванных изменением начальных условий и приложенными нагрузками, и развивающегося вынужденного движения. С течением времени собственные колебания конструкции под действием сил демпфирования затухают (уменьшается амплитуда колебаний), и остается установившееся вынужденное движение системы [5].

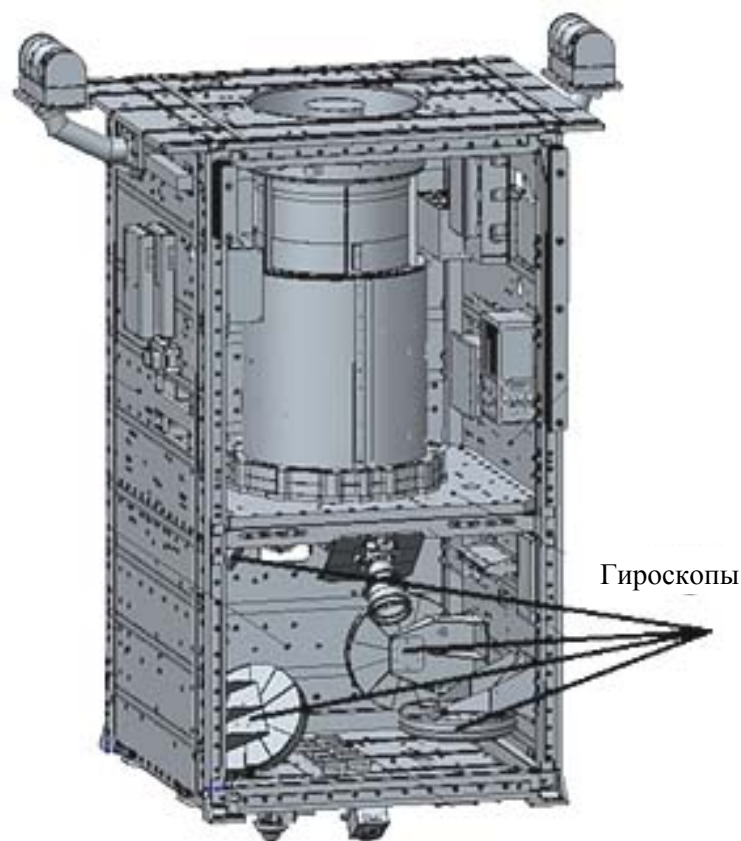


Рис. 1. Модель космического аппарата с установленными гироскопами

Анализ результатов исследования

На рис. 2–4 показаны графики, отражающие результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными, которые были получены при наземной экспериментальной отработке объекта исследования. Экспериментальные данные соответствуют научно-техническому отчету испытаний. Наземной экспериментальной отработке подвергался динамический макет космического аппарата, отличающийся от летного изделия опытно-технологического малого космического аппарата «АИСТ-2Д» наличием габаритных массово-центровочных макетов вместо штатных приборов.

На графиках рис. 2–4 видно, что результаты расчета и эксперимента имеют незначительные расхождения, что подтверждает возможность применения приведенного типа анализа.

При испытаниях опытного образца рекомендуется учитывать факторы, искажающие действительные значения исследуемых параметров, такие, как влияние испытательной оснастки. Для учета всех факторов существует коэффициент коррекции, который определяется нормативной документацией организации-изготовителя.

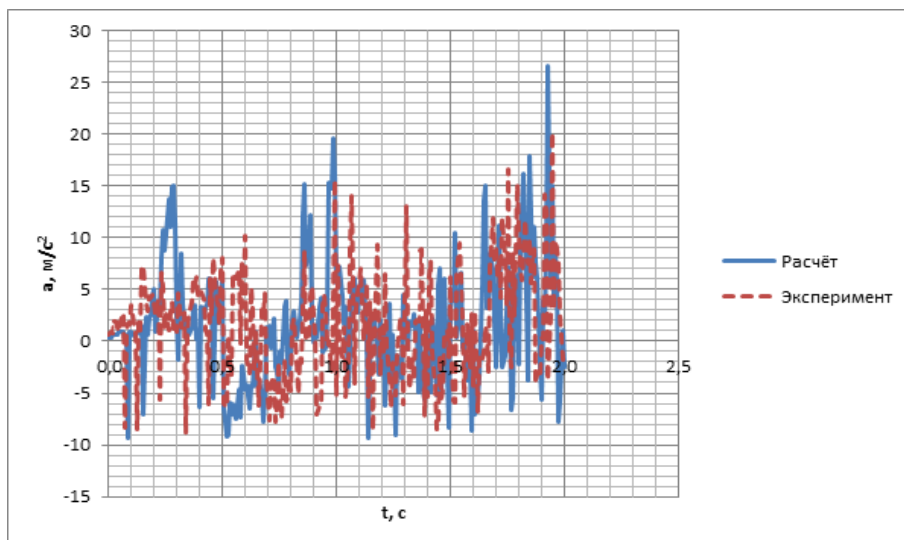


Рис. 2. График ускорений установки гироскопа по оси X

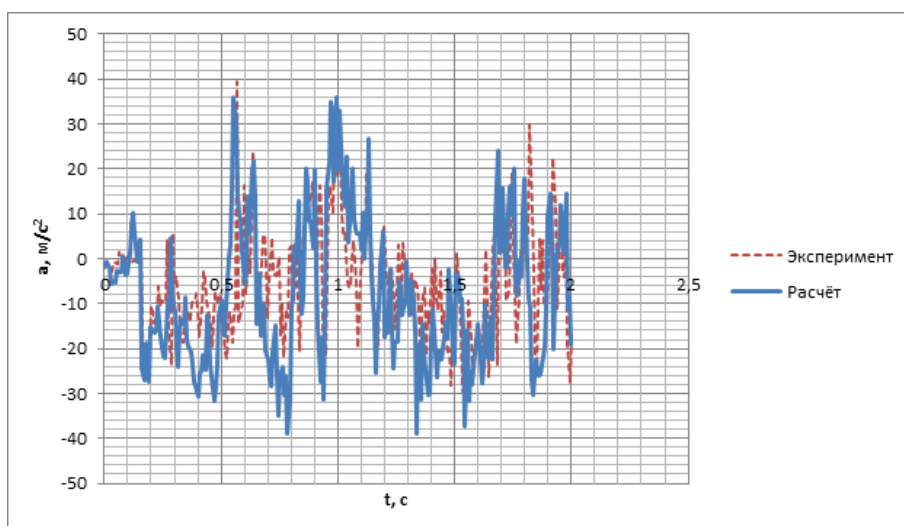


Рис. 3. График ускорений установки гироскопа по оси Y

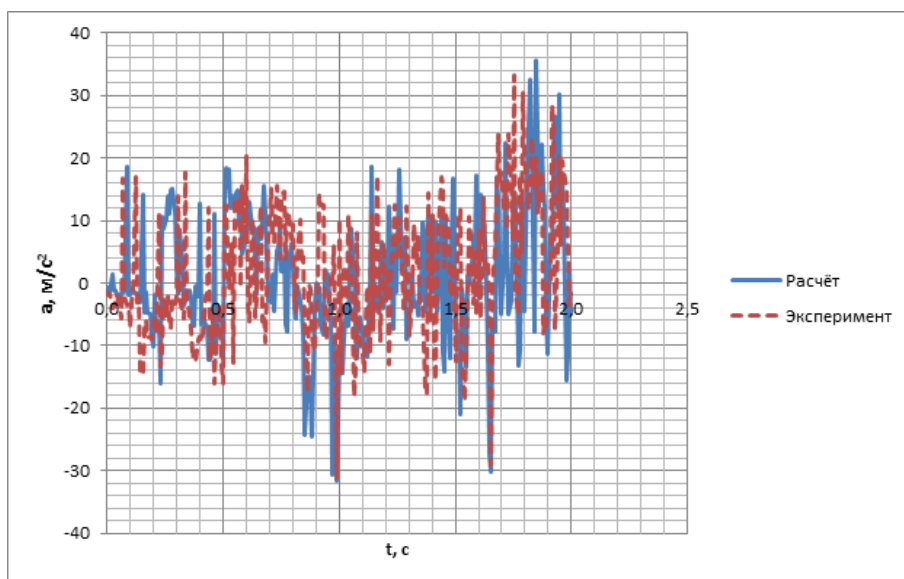


Рис. 4. График ускорений установки гироскопа по оси Z

Заключение

Предложен метод расчета нагрузок на бортовую аппаратуру летательного аппарата в программном комплексе Femap with NX Nastran. С использованием данного метода проведен динамический расчет установок гироскопов на участке полета малого космического аппарата «АИСТ-2Д» в составе ракеты космического назначения. Расчетный случай – «максимальный скоростной напор». В результате определен максимальный динамический отклик центра масс прибора.

Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Результаты показали высокую сходимость.

Приведенный в статье метод расчета можно использовать для расчета нагрузок на установки приборов и агрегатов не только космического аппарата, но и транспортно-пилотируемых космических кораблей, блоков выведения, модулей орбитальных станций, составных частей ракет-носителей.

Библиографические ссылки

1. Сравнительный расчет низкочастотной составляющей динамических перегрузок на бортовую аппаратуру космического аппарата / А. А. Иголкин, Е. В. Шахматов, А. А. Попков, А. Г. Филипов // Известия Самар. науч. центра РАН. 2019. Т. 21, № 5. С. 67–72.
2. Безмозгий И. М., Софинский А. Н., Чернягин А. Г. Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 71–80.
3. Опытнo-техно-логический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Е. В. Шахматов и др. ; Самар. науч. центр РАН. Самара, 2017. 324 с.
4. Попков А. А., Филатов В. А., Филипов А. Г. Определение нагрузок для прочностных расчетов узлов крепления приборов и агрегатов космического аппарата на активном участке полета // Вектор науки ТГУ. 2019. № 1 (47). С. 50–57.
5. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде MSC.visualNASTRAN для Windows. М. : НТ Пресс, 2004. 552 с.

© Иголкин А. А., Попков А. А., Филипов А. Г., 2020

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ «БУРАН». КАК ЭТО БЫЛО

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: emd1958@mail.ru

По открытым материалам из литературы и воспоминаниям автора проводится анализ электрических испытаний орбитального корабля «Буран» во время подготовки к первому и последнему полету. Это был грандиозный проект. Правильность принятых в процессе электроиспытаний научно-технических и организационных решений были подтверждены в летных испытаниях и конечно при посадке корабля в автоматическом режиме

Ключевые слова: электрические испытания, орбитальный корабль, контрольно-испытательная станция, безэховая камера, комплексный стенд

Введение. Несколько общей истории об орбитальном корабле «Буран» (изделие 11Ф35 1К1) и его создании. Разработка орбитального корабля (ОК) «Буран» началась в 1974 году в рамках подготовки «Комплексной программы НПО «Энергия»». Первоначально «Бураном» называлась вся система, состоящая из ракеты-носителя и орбитального корабля (изделие 11Ф36 – «Энергия»–«Буран», рис. 1) и это направление работ было поручено главному конструктору И. Н. Садовскому. Создание планера ОК, было поручено конструкторскому бюро (КБ) Тушинского машиностроительного завода (ТМЗ) во главе с Глебом Евгеньевичем Лозино-Лозинским, имевшего опыт работ по проекту орбитального самолета тема «Спираль». Для решения поставленной задачи в Министерстве авиационной промышленности было создано Научно-производственное объединение (НПО) «Молния», которому придавался ТМЗ, под руководством

Генерального конструктора Г. Е. Лозино-Лозинского. Вся ракетно-космическая часть (объединенная двигательная установка (ОДУ), системы и агрегаты) была задана в разработке НПО «Энергия» (ныне ОАО РКК «Энергия» им. С. П. Королёва) под руководством Генерального конструктора Валентина Петровича Глушко. Кроме НПО «Молния» и НПО «Энергия» в проекте приняли участие: НПОАП (Н. А. Пилюгин, В. Л. Лапыгин) – система управления, НИИ КП (Л. И. Гусев,

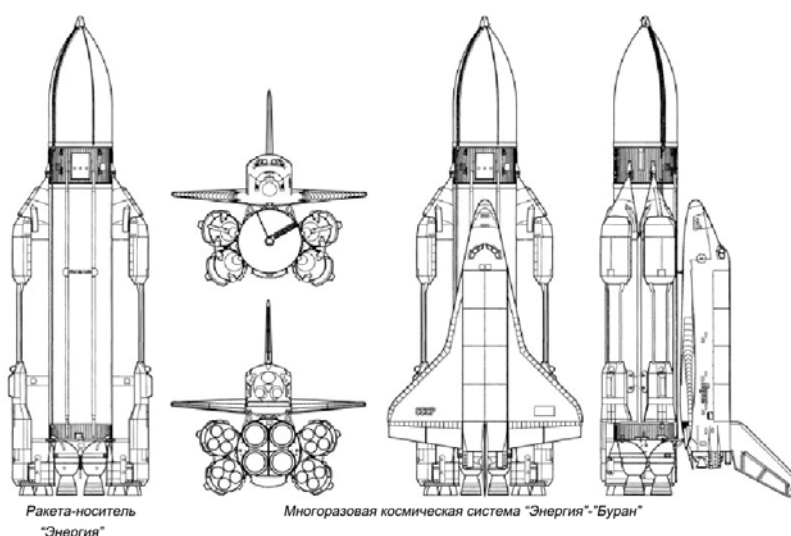


Рис. 1. Многоразовая космическая система «Энергия»–«Буран»
(изделие 11Ф36, для первого полета 11К25 + 11Ф35 (1К1))

М. С. Рязанский) – радиокomплекс, НПО ИТ (О. А. Сулимов) – телеметрические системы и еще много других предприятий. В решении многих научно-технических проблем при создании системы «Энергия»–«Буран» активно участвовал Президент Академии наук СССР Г. И. Марчук [3].

В течение 18 лет над многоразовой космической системой (МКС) «Энергия»–«Буран» работало более миллиона человек из 1286 предприятий и организаций, входящих в 86 министерств и ведомств. В создании ОК принимали участие около 600 предприятий почти всех отраслей промышленности [2; 3].

Для создания МКС «Энергия-Буран» было разработано и освоено свыше 300 принципиально новых технологий и около 1000 уникальных специальных средств технологического оснащения, большая часть которых не имела аналогов в мировой практике.

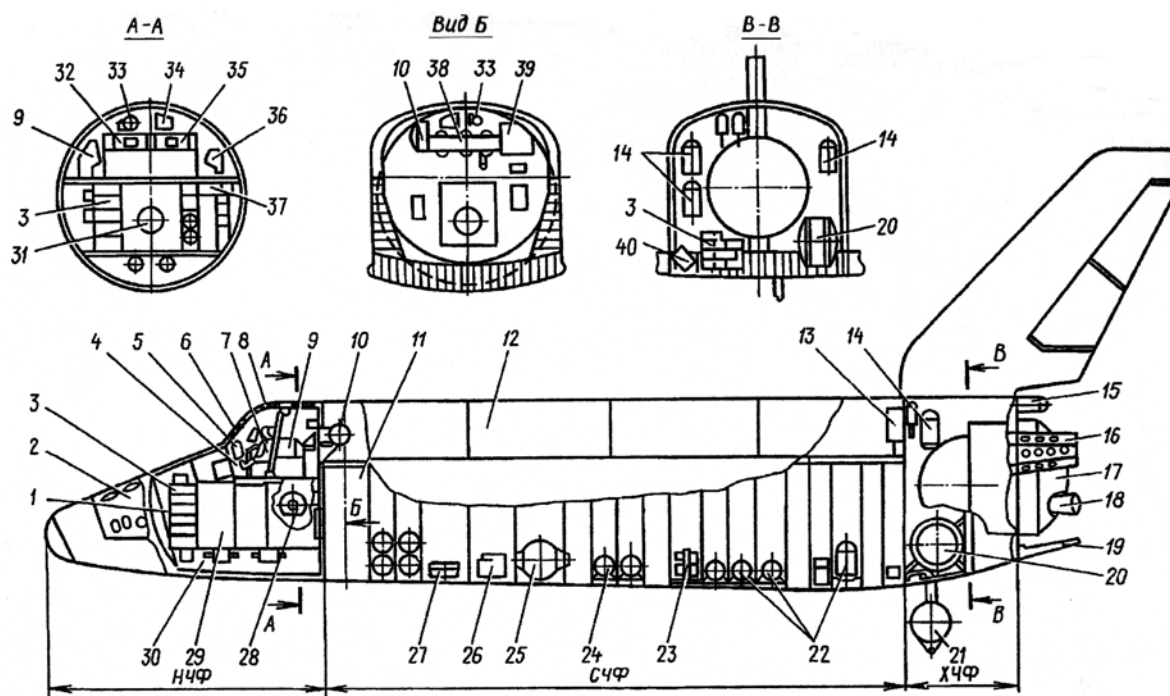


Рис. 2. Внешняя и внутренняя компоновки орбитального корабля «Буран» [2]:

1 – кабина экипажа; 2 – блок двигателей управления носовой (БДУ-Н); 3 – приборный отсек; 4 – командный отсек; 5 – рабочие места РМ-1 и РМ-2; 6 – остекление кабины; 7 – катапультные кресла; 8 – аварийные выходы для катапультных кресел; 9 – рабочее место РМ-3; 10 – радиовысотомер-вертикаль; 11 – отсек полезного груза (ОПГ); 12 – створки ОПГ; 13 – верхняя остроуправленная антенна ОНА-I (сложена); 14 – вспомогательные силовые установки (ВСУ); 15 – контейнер с тормозным парашютом; 16 – блоки двигателей управления (левый и правый); 17 – базовый блок ОДУ; 18 – двигатели орбитального маневрирования (ДОМ); 19 – балансировочный щиток; 20 – герметичный приборный отсек; 21 – нижняя остроуправленная антенна ОНА-II (в рабочем положении); 22 – баллоны с газами, водой и аммиаком; 23 – блоки аппаратуры; 24 – баллоны системы пожаровзрывопреждения (СПВП); 25 – баки СЭП; 26 – электрохимические генераторы (ЭХГ) СЭП; 27 – приборный модуль СЭП; 28 – входной (посадочный) люк; 29 – бытовой отсек (БО); 30 – агрегатный отсек (АО); 31 – задний люк кабины экипажа для выхода в стыковочный модуль (СМ) или шлюзовую камеру кабины (ШКК); 32 – рабочее место РМ-4; 33 – навигационная измерительная визуальная система; 34 – иллюминатор наблюдения за работами в ОПГ; 35 – рабочее место РМ-5; 36 – рабочее место РМ-6; 37 – медицинское оборудование; 38 – модуль командных приборов; 39 – звездно-солнечный прибор (ЗСП); 40 – блок коммутации

В конечном варианте ОК «Буран» должен был представлять собой воздушно-космический самолет со стартовой массой 105 т, который предназначен для проведения в космосе многоплановых операций с доставкой на околоземную орбиту до 30 т и возвращением на Землю до 20 т полезного груза. Впечатляют габариты ОК: общая длина –

36,37 м, размах крыла – 23,92 м, высота на стоянке – 16,35 м [2; 3]. Корабль «Буран» воплотил в себя передовые технологии авиационной и космической техники на тот момент времени.

Основу компоновочной схемы ОК «Буран» (рис. 2) определяло размещение в его центре отсека полезного груза (ОПГ), расположенного в наибольшей по размерам средней части фюзеляжа (СЧФ). На СЧФ были установлены консоли крыльев, образующие с ее нижними обводами общую несущую при спуске поверхность. Кабина экипажа размещалась в носовой части фюзеляжа (НЧФ). Объединенная двигательная установка (ОДУ) располагалась в хвостовой части фюзеляжа (ХЧФ), а часть управляющих двигателей (УД) – в НЧФ [2].

Внешние обводы ОК соответствовали самолетной схеме «бесхвостка», позволяющей получить аэродинамическое качество около 1,5 на гиперзвуковых и более 5 на дозвуковых скоростях, что решило задачи спуска и посадки на взлетно-посадочную полосу (ВПП) посадочного комплекса (ПК).

Состав систем ОК и их характеристики выбирались исходя из назначения ОК, на основе анализа задач полетов и требований к кораблю. Важное значение имели решения по системе управления и двигательной установке.

В основу системы управления (СУ) был положен бортовой цифровой вычислительный комплекс (БЦВК), в программно-математическом обеспечении (ПМО) которого реализовывались алгоритмы управления как движением ОК, так и работой его бортовых систем, т. е. в СУ были централизованы практически все задачи управления, за исключением элементов внутренней логики систем, вынесенных в их собственные приборы или спецвычислители, и операций по включению части оборудования с рабочих мест экипажа.

Объединенная двигательная установка ОК, работала кислород-углеродном топливе. Это экологически чистое топливо повышало удельный импульс двигателей, однако требовало внедрения на ОК элементов криогенной техники. В управляющие двигатели кислород подавался в газообразном состоянии в отличие от двигателей ориентации, работающих на жидком кислороде.

Орбитальный корабль (ОК) «Буран» имел в составе более 50 бортовых систем, большая часть которых в процессе предстартовой подготовки и на отдельных участках полета функционировали одновременно.

В состав бортовых систем ОК входило более 600 установочных единиц бортовой аппаратуры, включающей свыше 1 000 приборов, 2 500 сборок (жгутов бортовой кабельной сети) БКС и более чем 14 000 электрических соединений (штепсельных разъемов) [2; 3].

Характерной особенностью ОК как объекта контроля являлось наличие в составе СУ многомашинного бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК) с уникальным по объему и сложности программно-математическим обеспечением (ПМО). Так, только для первого полета ПМО БЦВК составляло 180 Кбайт, что позволило реализовать более 6 000 команд и 3 000 алгоритмов управления бортовыми системами и обеспечить с помощью развитой системы контроля и диагностики (СКД) автоматическое парирование рассмотренных нештатных ситуаций.

При подготовке к первому полету ОК контролировалось более 5000 телеметрических параметров бортовых систем.

Другими особенностями ОК как объекта контроля, отличающими его от одноразовых космических аппаратов (КА), являлось наличие бортового комплекса посадки, рулевых систем, посадочных устройств планера и системы управления разворотом передней стойки шасси, которые обеспечивают посадку ОК, а также систем пожаровзрывопреждения, пожаробнаружения и пожаротушения, обеспечивающих безопасность наземной подготовки и полета ОК. Учитывая выше сказанное можно констатировать, что ОК «Буран» является сложнейшим объектом контроля [2].

Электрические испытания ОК «Буран» являлись частью программы наземной подготовки (рис. 3).

Не будем в данной статье вдаваться в подробности всей наземной подготовки ОК, а остановимся только на электрических испытаниях, которые проходил ОК в контрольно-испытательной станции (КИС) на территории НПО «Энергия» (ныне – ПАО «РКК «Энергия» им. академика С.П.Королева») в г. Королёв Московской области, МИК ОК площадка № 254 и МИК РН площадке № 112 в связке ОК «Буран» + РН «Энергия» (многоразовая космическая система «Энергия» – «Буран» (индекс 11Ф36 или 11К25 + 11Ф35 1К1) в процессе предстартовой подготовки, старта и полета) на космодроме Байконур.

Разработка методики электрических испытаний ОК «Буран» как сложного объекта контроля, подготовка и непосредственное их проведение было очень ответственным, сложным и трудоемким процессом, требующим значительных временных и материальных затрат.

При разработке методики электрических испытаний бортовых систем в составе ОК было принято решение о проведении [2]:

- входного контроля аппаратуры бортовых систем перед установкой в ОК в лабораториях входного контроля с помощью специализированной контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) в объеме автономных испытаний (АИ), в ходе которых должны контролироваться целостность электрических цепей и сопротивление изоляции электрически разобращенных цепей, функционирование и допусковый контроль точностных параметров, а также устраняться выявленные неисправности; по результатам входного контроля судят об исправности бортовой аппаратуры и возможности ее установки в ОК;

- проверок (при подготовке к первому полету) части бортовых систем в объеме АИ после монтажа на ОК на участке сборки;

- комплексных электрических испытаний (КЭИ) на ТП ОК и ТП РН, обеспечивающих совместные проверки двух и более бортовых систем.

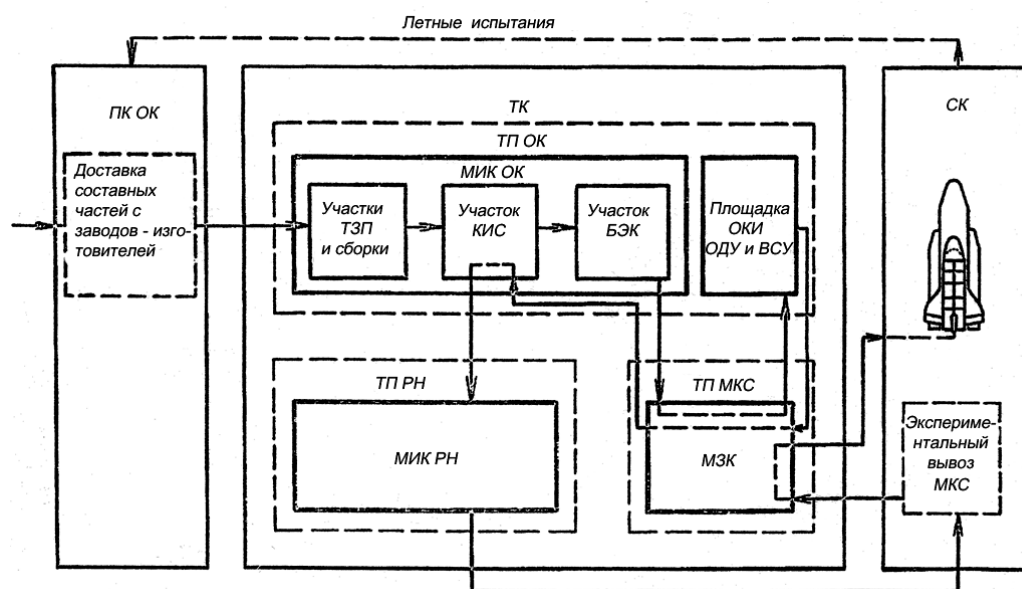


Рис. 3. Схема наземной подготовки ОК «Буран» на космодроме Байконур к первому полету: БЭК – безэховая камера; ВСУ – вспомогательная силовая установка; КИС – контрольно-испытательная станция; МЗК – монтажный заправочный комплекс; МИК – монтажно-испытательный комплекс; МКС – многоразовая космическая система «Энергия»- «Буран»; ОДУ – объединенная двигательная установка; ОКИ – огневые комплексные испытания; ПК – посадочный комплекс; РН – ракета-носитель; СК – стартовый комплекс; ТЗП – тепло защитное покрытие; ТК – технический комплекс; ТП – техническая позиция

Комплексные электрические испытания проводились на собранном ОК в комплектации, соответствующей конкретному рабочему месту (КИС, БЭК, площадка ОКИ, МИК РН), подключенными к нему КПА и наземного технологического оборудования (НТО) и включали выполнение защитных операций (ЗО), проверочных включений (ПВ), основных комплексных испытаний (КИ) и электрических проверок при заключительных операциях (ЗАКЛ) с ОК (рис. 4).

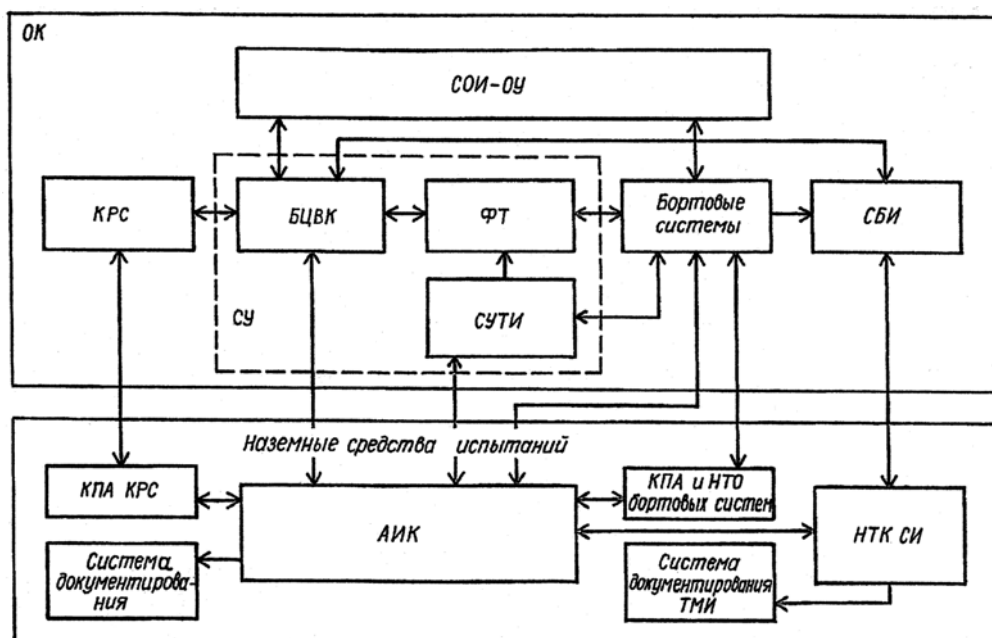


Рис. 4. Схема комплексных электрических испытаний ОК

Защитные операции проводились в целях обеспечения безопасности испытаний и включали контроль правильности сборки схемы комплексных испытаний, разобщенности шин питания и отсутствия их связи с корпусом ОК, а также исходного состояния бортовых систем и (при необходимости) приводили их в исходное состояние. Они выполнялись в автоматическом режиме средствами автоматизированного испытательного комплекса (АИК) перед началом проверок ОК на каждом рабочем месте до подачи напряжения на бортовые шины, а также после замены доработок бортовой аппаратуры, БКС или наземного испытательного оборудования. При их проведении, а также при проведении ПВ, КИ и ЗАКЛ использовалась система уплотнения технологической информации (СУТИ) и прямые (проводные) связи АИК с бортовыми системами.

Проверочные включения проводились в целях проверки работоспособности отдельных бортовых систем ОК, в том числе взаимодействующих с ними бортовых и наземных средств управления, контроля, регистрации и сотрудничающих бортовых систем. При проведении ПВ (проверок любой бортовой системы в режиме ПВ) использовались общие бортовые средства управления и контроля: СУ, система бортовых измерений (СБИ), система обеспечения температурного режима (СОТР), система электропитания (СЭП) и система отображения информации и органы управления (СОИ-ОУ) [2].

Основные комплексные испытания проводились в целях проверки правильности совместного функционирования бортовых систем ОК в соответствии с типовыми участками программы полета и являлись наиболее сложными электрическими испытаниями, при проведении которых одновременно функционируют почти все бортовые системы, КПА, НТО, в том числе бортовой и наземный цифровые вычислительные комплексы.

Электрические проверки при заключительных операциях проводились в целях проверки технического состояния бортовых систем ОК, окончательная комплектация которых устанавливается при проведении заключительных операций после окончания КЭИ и устранения всех выявленных неисправностей (замечаний). В процессе заключительных операций элементы конструкции и бортовые системы после установки штатной комплектации приводились в исходное состояние, т. е. в состояние готовности к стыковке с РН. Заключительные операции завершались контролем исходного состояния всех бортовых систем ОК с записью на наземных телеметрических станциях.

Основными средствами подготовки ОК, используемыми и на ТК, и на СК являлись: КПА, в состав которой входил автоматизированный испытательный комплекс, наземный технологический комплекс системы измерений (НТК СИ), включающий средства приема, регистрации, обработки и анализа телеметрической информации, и система централизованного контроля параметров пневмогидросистем (СЦКПП); технические системы, включающие систему наземного электропитания (СНЭП), наземную (жидкостную и воздушную) СОТР, громкоговорящую, шлемофонную, телефонную и телевизионную связь, средства освещения и общепромышленное оборудование (отопление, водоснабжение, холодильный центр, компрессорные и т. п.); специальное НТО, в состав которого входят средства транспортирования ОК (отдельно и в составе МКС) и обслуживания (внутреннего и наружного); другие средства на различных рабочих местах (РМ) подготовки ОК в соответствии с их назначением [2].

В состав наземных средств испытаний ОК входили: на КИС – КПА радиосистем, систем посадки, гидросистем (ГС) и ОДУ (рис. 5).

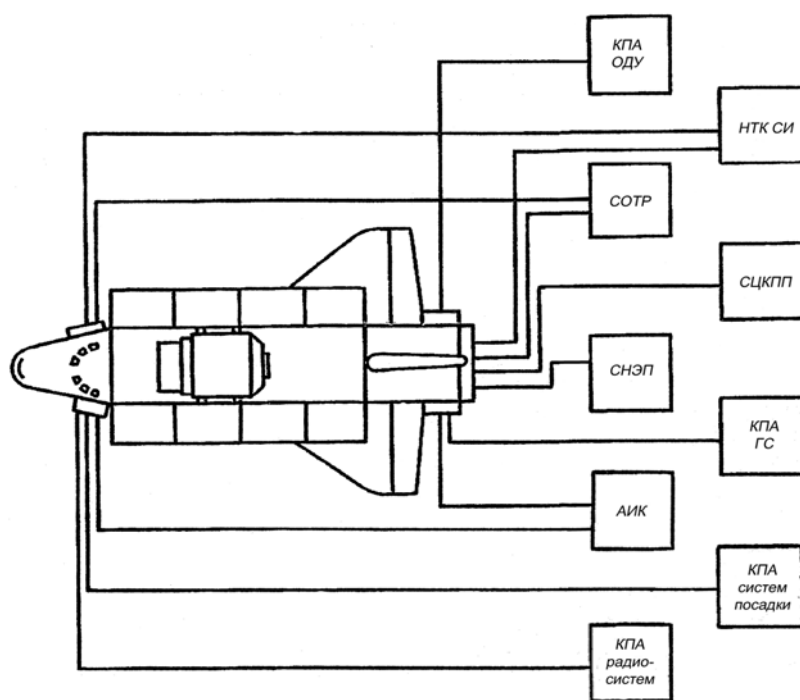


Рис. 5. Схема подключения наземных средств испытаний к ОК на КИС МИК ОК пл. № 254

Наиболее сложные и специфические средства электроиспытаний – АИК, НТК СИ, БЭК.

Автоматизированный испытательный комплекс (рис. 6) был основным средством проведения КЭИ на всех позициях наземной подготовки ОК и конструктивно состоял из управляющей ЭВМ (УЭВМ) верхнего уровня и ЭВМ нижнего уровня, в состав которых входили ЭВМ связи с БЦВК и СУТИ, обеспечивающие информационный

обмен с СУ, и устройство связи с бортовыми системами на базе четырех ЭВМ, а также оперативный пульт управления (ОПУ), который строился на базе ЭВМ СМ-2М, четыре дисплейных модуля (ДМ), устройство быстрой печати (УБП) и устройство печати знакосинтезирующее (УПЗ). АИК имел схемное и программное сопряжение с КПА и НТО некоторых бортовых систем (ОДУ, командной радиосистемы, бортового комплекса посадки), а также информационный обмен с НТК СИ, что обеспечивало синхронизацию и автоматическое управление указанными средствами при проведении КЭИ [2].

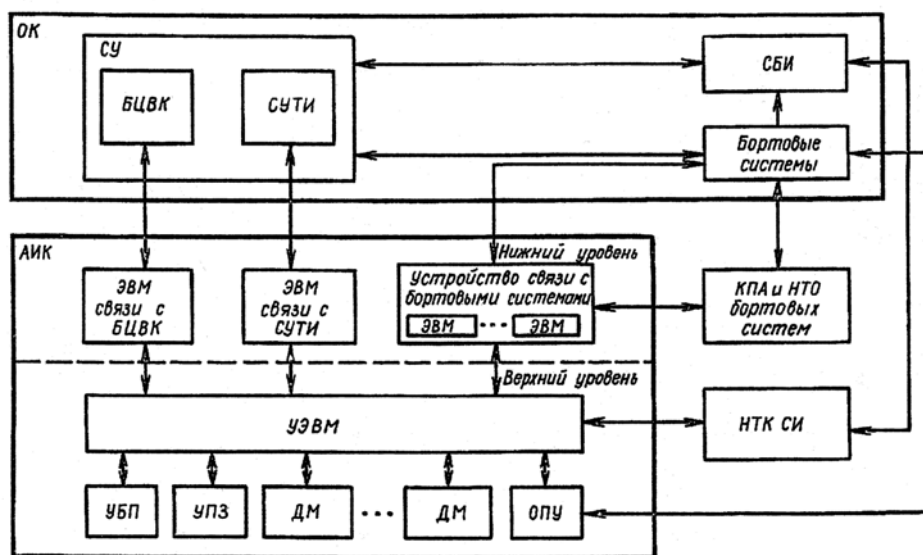


Рис. 6. Схема автоматизированного испытательного комплекса и его сопряжение с бортовыми системами ОК и КПА

Информационная структура АИК обеспечивала: подготовку бортовых систем к КЭИ (подачу электропитания, контроль исходного состояния и выведение на необходимые режимы работы); загрузку ПМО БЦВК; ввод полетного задания и технологическую настройку ПМО БЦВК на необходимые программы испытаний; подачу команд и сигналов в бортовые системы и проведение допускового контроля параметров в процессе КЭИ; имитацию работы ряда бортовых систем и приборов в полетных режимах; выдачу особо важных управляющих воздействий (УВ) в бортовые системы по прямым (неуплотненным) линиям связи с ОПУ минуя БЦВК и СУТИ; автоматический контроль замыкания бортовых шин электропитания на корпус ОК; предоставление оператору ОПУ всей необходимой информации в процессе испытаний для принятия решения в случае отклонений от штатной программы КЭИ; документирование процесса КЭИ с привязкой к единому времени [2].

Функциональные возможности АИК реализовывались через ОПУ.

Программное обеспечение, используемое при испытаниях ОК и реализуемое средствами АИК, включало общее программное обеспечение, в которое входили операционные системы, загрузочные модули ЭВМ связи с БЦВК и СУТИ, комплекс программ общего управления испытаниями и контроля технического состояния средств АИК, и специальное программное обеспечение испытаний, которое содержало программы испытаний, реализующие проверки систем ОК в предусмотренных режимах работы, разрабатываемые на языке высокого уровня «Диполь», ориентированном на профессиональных инженеров-испытателей и не требующем специальной квалификации в вопросах программирования.

Система бортовых измерений являлась основным средством контроля бортовых систем ОК при наземных испытаниях и в полете.

Обработка и анализ телеметрической информации (ТМИ) в процессе электрических испытаний ОК представляла весьма сложную техническую проблему, для решения которой был создан наземный технологический комплекс системы измерений, служивший для приема, регистрации и автоматизированного анализа телеметрической информации в реальном времени испытаний ОК, а также для выдачи необходимой информации в АИК.

В состав НТК СИ входили широкополосные линии связи, наземные станции приема и регистрации телеметрической информации, универсальные ЭВМ и специальные вычислительные средства, средства отображения и документирования принятой информации, средства синхронизации работы НТК СИ и АИК, а также значительное по объему ПМО [2].

Самая большая по объему и сложности экспериментальная отработка была проведена на полноразмерном комплексном стенде КС-35 (изделие 3М, КС-ОК, 11Ф35 КС, 0.03) орбитального корабля «Буран». Основной особенностью, отличающей КС-35 от других стендов, являлось то, что в его состав входили полноразмерный аналог ОК «Буран», укомплектованный штатными по составу бортовыми системами, и штатный комплект наземного испытательного оборудования. Планер ОК для дооснащения и развертывания на его основе постоянно действующего КС-35 был доставлен из НПО «Молния» в НПО «Энергия» в августе 1983 года [3; 4].

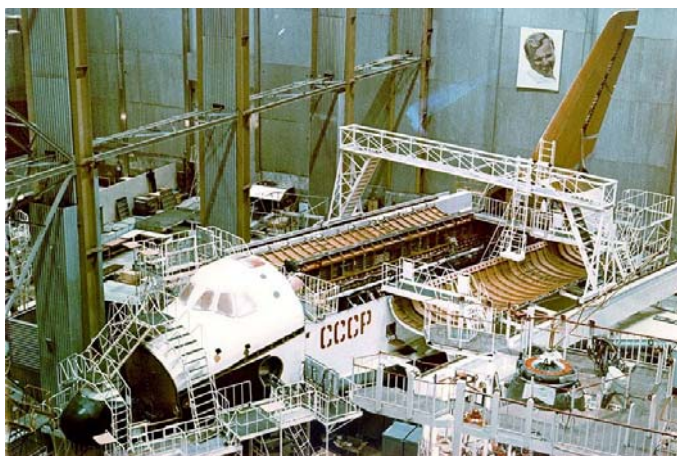


Рис. 7. Комплексный стенд КС-35 для электрических испытаний в зале КИС на территории РКК «Энергия» имени академика С. П. Королева

На КС-35 (рис. 7) выполнялись задачи: комплексная отработка электрической схемы с участием пневмогидросистем, в том числе: отработка взаимодействия бортовых систем при имитации штатных режимов работы и в расчетных нештатных ситуациях, отработка взаимодействия бортового и наземного (испытательного) многомашинных вычислительных комплексов, проверка электромагнитной совместимости (ЭМС) и помехозащищенности бортовой аппаратуры, отработка взаимодействия наземного и бортового комплексов управления в режиме передачи управляющих воздействий с контро-

лем правильности их исполнения в бортовых системах по ТМИ; проверка электрических связей аналога ОК, входящего в состав КС-35, с эквивалентом ракеты-носителя «Энергия»; отработка программы и методики (ПМ) комплексных электрических испытаний ОК, режимов предстартовой подготовки и методики парирования нештатных ситуаций, возможных при наземной подготовке; отработка бортового и наземного (испытательного) программно-математического обеспечения и его сопряжения с аппаратными средствами вычислительных комплексов, бортовых систем и наземного испытательного оборудования для всех рабочих мест наземной предполетной подготовки ОК с учетом возможных (расчетных) нештатных ситуаций; отработка эксплуатационной документации, предназначенной для проведения испытаний и наземной предполетной подготовки ОК на техническом и стартовом комплексах и для натурных испытаний; проверка правильности выполнения доработок материальной части, корректировки ПМО и эксплуатационной документации (ЭД) по результатам испытаний и техническим решениям до проведения соответствующих доработок на ОК; обучение и тренировка специалистов, участвующих в наземной предполетной подготовке и натурных испытаниях ОК [3].

Для разработки ПМО испытаний в НПО «Энергия» был создан отдел 384. Электрические испытания (ЗО, ПВ) на КС-35 начались в марте 1984 года.

Весной 1986 года после окончания Московского высшего технического училища (МВТУ) им. Н. Э. Баумана (ныне – МГТУ им. Н. Э. Баумана, специальность инженер-механик по производству летательных аппаратов) по распределению меня направили на работу в НПО «Энергия». Диплом «Транспортный космический корабль» я делал на НПО «Энергия» в конструкторском отделе 281, где занимались конструкцией космического корабля (КК) «Союз», и готовился прийти туда же на работу, в чем был заинтересован начальник этого отдела. Однако все получилось иначе. На предприятии было выпущено распоряжение о направлении молодых выпускников, делавших дипломные работы на НПО «Энергия», на новую тематику – МКС «Энергия»–«Буран».

В самом НПО «Энергия» меня направили в отдел 385, в сектор который занимался технологией наземной подготовки к полету ОК «Буран». Однако я узнал об организации сектора комплексных электрических испытаний в отделе 384, где требовались люди, и перевелся туда.

В секторе комплексных испытаний, было принято распределение по системам и меня для начала поставили вторым номером по бортовому радиотехническому комплексу (БРТК). Этот комплекс предусматривал организацию связи с Землей в дециметровом, сантиметровом и метровом диапазонах волн. Он должен был обеспечивать проведение траекторных измерений, передачу ТМИ на Землю, обмен командно-программной и телефонно-телеграфной информацией между центром управления полетом (ЦУП, город Королев Московской обл.) и экипажем ОК, а также речевой обмен членов экипажа со службами посадочного комплекса на участке спуска [2]. Предполагалось, что третий полет ОК будет с экипажем. Мы так же отвечали и за систему служебного телевидения. Все наши программные комплексы для электроиспытаний создавались с участием БРТК и имели название «Дежурный режим» (КИ-7), «Сеанс связи» (КИ-1С, связь ОК «Буран», находящегося на открытой площадке огневых комплексных испытаний (ОКИ), через спутник-ретранслятор «Луч» или «Альтаир» с центром управления полетом (ЦУП) в городе Королев Московской области), а также мне пришлось заниматься комплексом «Безэховая камера» (КИ-1Б, проверялась работа радиосистем по открытому каналу (без насадок на антеннах) и ЭМС радиосистем на этапе подготовки к спуску, спуск и посадки ОК на ВПП). Перед тем, как приступить к работе необходимо было ознакомиться с устройством ОК «Буран» (в РКК «Энергия» на КС-35, а с реальным ОК в МИК ОК на космодроме) и более подробно с системами, которые функционировали в будущих моих комплексах. Надо было разобраться, как каждая система работает и знать об их функциональных особенностях («узкие места», принцип действия и техническую эксплуатацию), чтобы случайно не вывести систему из строя в процессе испытаний. На практике у некоторых сотрудников такие случаи были [1].

В то время нигде нельзя было прочитать о работах по ОК. Конкретная информация о системах в основном передавалась в разговорах между сотрудниками. Мы ездили в командировки на разные фирмы, где общались с разработчиками систем и они также приезжали на нашу фирму. В этом проекте многое было неясно, так как он был секретным и впервые.

Программные комплексы (директивная испытательная логика (ДИЛ) на языке «Диполь») мы составляли сами из отдельных программ (частная директивная испытательная логика – ЧДИЛ), исходя из программы полета (ПП, полетного задания), состоящей из многочисленных типовых полетных операций (ТПО), которые присылали нам разработчики систем орбитального корабля. Далее мы ретранслировали эти программы в понятный код для автоматизированного испытательного комплекса (АИК) и бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) орбитального корабля. После этого шли на комплексный стенд КС-35, находящийся в зале контрольно-

испытательной станции (КИС), и прогоняли эти программы через АИК. За нами также была закреплена подготовка эксплуатационной документации для операторов наземных пультов. Мы писали программы и методики (ПМ) и инструкции операторам по своим комплексам. Это был оглушительный вал бумажных документов. К этому надо прибавить еще и коррективы инструкций и ПМ, а также комплексных программ, связанных как с замечаниями, полученными на КС-35, так и с изменениями в версиях ПМО разработчиков бортовых систем и БЦВМ[1].

После большой коррекцией документов и программного комплекса, надо было идти на КС-35 и все повторялось заново. Коррекция программных комплексов отнимала много времени и требовала долгого напряжения зрения, сочетающегося с большой усидчивостью. После такой работы рябило в глазах. Откорректированные и прошедшие полную отработку на КС-35 программные комплексы с автором направлялись на Байконур, где в МИК ОК площадки № 254 уже на реальном корабле «Буран» проводились комплексные электрические испытания. И здесь также проявлялись всевозможные замечания и опять надо было корректировать все пока не получался полностью штатный прогон комплекса.

Надо отметить, что все разделы КИ проводились по типовой структуре, которая предусматривала [2]:

- подготовку к испытаниям эксплуатационной документации (инструкций операторам) и ПМО (для АИК и других автоматизированных наземных средств), пультов КПА и НТО, установку элементов бортовых систем и конструкции ОК в исходное состояние;
- включение КПА и НТО, проведение их самоконтроля и обеспечение готовности к работам с ОК;
- подачу напряжения на бортовые шины питания и включение общих бортовых средств испытаний;
- включение специальных бортовых средств испытаний (аппаратуры сотрудничающих бортовых систем);
- проведение собственно КИ или ЗАКЛ;
- выключение специальных бортовых средств испытаний;
- приведение бортовых систем в исходное состояние, выключение общих бортовых средств испытаний и снятие напряжения с бортовых шин питания;
- выключение КПА и НТО;
- оформление результатов испытаний.

Так случилось, что летом 1986 года мой первый номер ушел в отпуск, и мне пришлось проводить дни и ночи на КС-35 с самым первым комплексом нашего отдела КИ-7 «Дежурный режим», который до этого пытались безуспешно провести несколько раз, но безуспешно. После нескольких проверок этого комплекса на КС-35 выявилась интересная картинка. Комплекс почему-то останавливался на одном и том же месте, хотя борт корабля продолжала отрабатывать свои запрограммированные шаги. Частные программы, которые в связи с этим проводились, результата не давали. Комплекс КИ-7 не шел. В конце концов, я сел и внимательно проанализировав все наши действия, и стал осторожно задавать вопросы разработчикам планера (НПО «Молния»), что может их параметры «ломают» наш комплекс и естественно получал отрицательные ответы. Так как предприятие НПО «Молния» принадлежало Министерству авиационной промышленности (МАП), а наше НПО «Энергия» Министерству общего машиностроения (МОМ), то существовал всегда некий политический момент, когда на определенных этапах начинали искать виновных, который мог лишиться премии. В результате были проведены частные программы, которые подтвердили мои предположения. Действительно были выявлены группы параметров НПО «Молния», которые попадали в те же ячейки памяти БЦВМ, что и команды из нашего комплекса и не позволяли работать

штатно комплексу КИ-7. Свою часть программы НПО «Молния» откорректировала и комплекс заработал.

Комплексная экспериментальная отработка на КС-35 шла в круглосуточном режиме без выходных дней 1600 суток и была завершена лишь тогда, когда ОК «Буран» готовился на стартовом комплексе к запуску. На КС-35 было отработано 189 разделов комплексных испытаний и выявлено и устранено 21168 замечаний.

Планер первого летного ОК (индекс 11Ф35 1К1) был доставлен на космодром Байконур в декабре 1985 года. Однако к этому времени МИК ОК пл. №254 и площадка ОКИ в полном объеме не были подготовлены к проведению электрических испытаний и они (ЗО и ПВ) начались только в мае 1986 года. Параллельно проводилась заключительная отработка систем.

На Байконуре можно было оказаться буквально через несколько часов, если конечно не проспичь после 12-ти часовой работы по подготовке всего необходимого для работы там. На космодром Байконур обычно летели из аэропорта Внуково-3 на самолете Ту-134 [1].

В сентябре 1987 года я впервые оказался на космодроме Байконур с ознакомительной поездкой (должен был провести комплекс КИ-1С) длительностью в месяц. К проведению комплекса в зале КИС МИК ОК ничего не было готово. Тогда я вместе с коллегами постарался больше узнать и посмотреть, благо нам разрешали это делать. Что я там увидел, потрясло мое воображение. Все что там делалось, подымало дух и веру в будущее этого проекта. Я побывал на площадке № 254, где мне пришлось в дальнейшем работать, в МИК РН «Энергия» на площадки № 112 и в зале общей сборки МКС «Энергия – Буран». Первая ознакомительная поездка оказалась полезной с точки зрения ориентации в городе Ленинке (ныне – город Байконур), на космодроме, на площадке № 254 и в самом МИК ОК (в служебных помещениях, пультовых, лабораториях и зале, где находился ОК). МИК ОК имел следующие размеры: длина 230 м, ширина 125 м, высота примерно 30 м. Четыре этажа со служебными помещениями, аппаратными и пультовыми опоясывали с трех сторон здание МИК ОК. Электроиспытания ОК по моим комплексам проводились в двух залах: зал КИС (104, рис. 8) – проведение электрических испытаний ОК (ответственные Завод экспериментального машиностроения (ЗЭМ) и Тушинский машиностроительный завод (ТМЗ)); зал БЭК (105, рис. 9) – безэховая камера для контроля радиоантенн (связи) – ответственный ЗЭМ [3].



Рис. 8. Орбитальный корабль в зале КИС МИК ОК пл. № 254



Рис. 9. Безэховая камера в МИК ОК «Буран» пл. № 254 космодром Байконур

Вторая моя состоялась в декабре 1987 года уже рабочая и на два месяца. Главное все произошло быстро. Вечером оформил все документы и до поздней ночи подготовил две магнитные ленты (программа комплекса и полетное задание), а уже утром на автобус в аэропорт и на самолет. Поехал я с комплексом по работе в БЭК КИ-1Б, а пришлось заниматься еще и многим другим. Такая была традиция если ты «комплексник», то должен уметь работать не только по своей системе, но и по другим. На космодроме в большей степени чувствуешь себя нужным, чем в НПО «Энергия». Космодром для нас был самым хорошим местом, где мы могли проявить самостоятельность. Мало было руководителей и много вопросов, которые мог решить только ты сам [1].

В процессе электроиспытаний на Байконуре проявлялись все наши просчеты и ошибки, а также дефекты аппаратуры, которые не смогли вскрыть на КС-35.

Также были случаи, связанные с организационными неувязками. Могли выключить рубильник на электрошите для проведения каких-нибудь работ или отсоединить кабель, отвечающий за связь с наземным проверяющим оборудованием для запланированной профилактики.

При проведении комплекса КИ-1С часто были «просадки напряжения» (понижение напряжения в электросети), которые допускало «Казахэнерго», приводящие к выключению всего работающего на электричестве и естественно прекращалась работа моего комплекса.

Во всех этих случаях приходилось приводить в исходное состояние бортовые системы ОК и начинать все сначала, а комплексы были объемные и занимали по времени не менее 6 часов [1].

Был и такой случай, когда на корабле после работы по комплексу «Сеанс связи» КИ-1С оказалось, что не выключился один из электроклапанов носового блока управляющих двигателей корабля. Сначала определили, где этот клапан находится, а затем нашли причину. Вместо команды на отключение электроклапана в программе, приводящей к исходному состоянию борта, была заложена команда на включение.

Мой комплекс по электромагнитной совместимости в БЭК КИ-1Б (работа радиосистем по открытому каналу перед спуском и в момент спуска корабля в БЭК) никак не хотел пройти из-за различных организационных и технических причин. Комплекс проводился пять раз, пока не было принято решение отключить ОК и перевести его в другой зал для дальнейших работ. Причиной была не программа, а кроссировочная стойка, на которой неправильно соединили провода, что было выявлено разработчиками наземного оборудования из города Харьков специальным оборудованием, но на это потребовалось время [1].

Мне также пришлось отрабатывать на штатном ОК «Буран» комплексы КИ-10 и КИ-9 (разработки другого специалиста) соответственно подготовка и спуск ОК с посадкой на ВПП и аварийную посадку на «живот». Фактически эти комплексы имели одинаковую программную начинку, отличие было в специальной блокировке алгоритма по выпуску шасси. Кроме этого мне также пришлось проверять отдельно выпуск шасси и работу гидрокомплекса и гидросистем ОК «Буран». Занимался я и ОДУ орбитального корабля.

По «Бурану» на ТК ОК космодрома Байконур была проделана грандиозная работа. За всё время подготовки к полету ОК было выявлено и устранено 15 000 замечаний к материальной части корабля, наземному испытательному и технологическому оборудованию бортовому и наземному программному обеспечению, эксплуатационной документации, работе операторов. И все это не просто так, это была упорная и тяжелая работа. Надо было все эти замечания подробно разобрать и правильно написать заключение.

По результатам наземной подготовки ОК и РН на ТК, готовности СК, всех технических средств, эксплуатационной документации и расчетов Госкомиссия приняла

решение о вывозе ОК «Буран» в составе МКС на СК 10 октября 1988 г. для проведения предстартовой подготовки и запуска, намеченного на 29 октября 1988 года.

29 октября 1988 года за 51 секунду до команды «Контакт подъема» в систему управления ОК и АИК поступила команда «Аварийное прекращение подготовки РН», по которой системы ОК «Буран» были автоматически приведены в исходное состояние и выключены.

Такая нештатная ситуация отрабатывалась на КС-35 и проверялась на ОК при экспериментальном транспортировании на СК.

Причиной отбоя запуска стало несвоевременный отвод платы системы азимутального наведения (прицеливания) РН.

Старт отменили и слили низкокипящие компоненты топлива из ОК и РН. После устранения всех замечаний, имевших место при предстартовой подготовке, и докладов о готовности к повторному запуску было принято решение о проведении предстартовой подготовки и запуске 15 ноября 1988 года в 6 часов утра московского времени.



Рис. 10. Посадка ОК «Буран»
в автоматическом режиме

Пуск состоялся 15 ноября 1988 года в 6:00:1.25 по московскому времени (точно по циклограмме прошла команда «Контакт подъема»). Все системы в полете отработали нормально. Корабль был выведен на рабочую орбиту высотой 251×263 км, наклонением $51,64^\circ$ и периодом обращения 89,45 минут.

Орбитальный корабль сделал два витка вокруг Земли на орбите и совершил автоматическую посадку на ВПП (рис. 10). При этом блестяще сработала система «Вымпел»: в 09:24:42, опережая всего на секунду расчетное время, «Буран» на скорости 263 км/ч изящно коснулся ВПП и через 42 секунды, пробежав 1620 м, замер в ее центре с от-

клонением от осевой линии всего +5 м. Последняя траекторная проводка, полученная от системы «Вымпел», прошла двумя секундами раньше (в 09:24:40,4) и зафиксировала вертикальную скорость снижения 1 м/с [3].

Несмотря на встречно-боковой порывисто-штормовой ветер 17 м/с и 10-бальную облачность высотой 550 м, условия касания для первой в истории автоматической посадки ОК «Буран» были отличными: недолет (продольный промах) составил 190 м, боковое отклонение вправо от оси ВПП – 9,4 м, вертикальная скорость касания всего 0,3 м/с. Посадка 80-тонного корабля получилась необычно красивой, правильной и изящной. Общее время полета составило 206 минут. Таким образом, была подтверждена правильность принятых решений по наземной подготовке, в том числе и по электроиспытаниям.

Выводы

1. Правильно была выбрана методика электрических испытаний, которая позволяла для подготовки ОК к очередному пуску сократить объем работ по наземной предполетной подготовке ОК без снижения ее качества.

2. Комплексный стенд КС-35 сыграл исключительную роль в обеспечении безопасности и сокращении сроков наземной предполетной подготовки ОК «Буран», в снижении расходов материальных ресурсов на его создание.

3. Большую эффективность испытательных работ на КС-35 обеспечил высокий уровень автоматизации испытаний, который составил 77 % от общего объема работ.

4. Во время полета ОК «Буран» и его автоматической посадки, проверенные в КЭИ все системы отработали без замечаний, что говорит о хорошей работе отдела 384, в котором мне довелось работать и внести свою лепту в общее грандиозное дело.

Библиографические ссылки

1. Евтифьев М. Д. Как мы готовили к полету орбитальный корабль «Буран» // История науки и техники. 2006. № 6. С. 38–42.

2. Многоразовый орбитальный корабль «Буран» / Ю. П. Семенов, Г. Е. Лозино-Лозинский, В. Л. Лапыгин и др. ; под ред. Ю. П. Семенова и др. М. : Машиностроение, 1995. 448 с.

3. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королева / гл. ред. Ю. П. Семенов. Королев Моск. обл. : РКК «Энергия», 1996. 672 с.

4. Шабанов В. К. Экспериментальная отработка «Бурана» // Авиационно-космические системы : сб. ст. под ред. Г. Е. Лозино-Лозинского и А. Т. Братухина. М. : Изд-во МАИ, 1977. С. 261–267.

© Евтифьев М. Д., 2020

КОНТРОЛЬ КРИВИЗНЫ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

В. В. Тимофеев
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 VT-ak@yandex.ru

Проводится анализ возможности контроля кривизны параболического зеркала антенны космического аппарата при неравномерном термическом нагружении в условиях тепловакуумных испытаний, определяются основные требования к испытательному стенду и прибору контроля кривизны параболической антенны.

Ключевые слова: параболическая антенна, контроль кривизны, тепловакуумные испытания.

Введение. Одним из основных качеств параболических космических антенн является их геометрическая стабильность в условиях сложного термического воздействия, при эксплуатации на орбите. В результате интенсивно нагрева под воздействием солнечного излучения, неизбежно деформирование и искажение конструкции от теоретического профиля параболоида. Степень деформирования и искажения зеркала антенны определяется по среднеквадратическому отклонению (СКО) прогиба. Эта величина зависит от жесткости конструкции и распределение зон нагрева.

В настоящей работе исследуется возможность контроля формы параболической антенны при неравномерном нагреве потоком солнечной радиации с имитацией космических условий и возможность точного замера СКО.

Методы измерения геометрии поверхности зеркальных антенн. Можно выделить два основных вида контроля геометрии поверхности зеркальных антенн контактные (с использованием юстировочного шаблона) и бесконтактные. Контактный метод, с использованием юстировочного шаблона, не подходит т.к. не позволяет точно определить величину отклонений от теоретического профиля. Поэтому нужно использовать бесконтактные методы, к которым относятся: фотограмметрия, радиоголографические методы контроля профиля, использование лазерных радаров, трекеров, трехмерных сканеров, геодезических тахеометров и оптических схем [1]. Основные требования к методам измерения является высокая точность, а также возможность измерений в условиях имитации космоса, в частности при тепловакуумных испытаниях.

Существуют различные схемы установок для тепловакуумных испытаний в NASA (США), Европе и РФ. Одной из установок находящихся в РФ является установка для Тепловакуумных испытаний в Федеральное казенное предприятие, Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности (ФКП «НИЦ РКП»), которую можно приспособить для контроля за деформацией параболической антенны в условиях космических температур и вакуума.

ФКП «НИЦ РКП» имеет испытательный комплекс ИС-618. Испытательный комплекс ИС-618 предназначен для проведения тепловакуумных испытаний (ТВИ) орбитальных средств, как штатных изделий, так и их тепловых макетов, систем, агрегатов и

узлов КА в условиях, воспроизводящих основные воздействующие факторы космического пространства.

В состав этого комплекса входит вакуумная камера ВК 600/300 ИС-618, имеющая следующие характеристики [2]: габариты испытываемого объекта: диаметр – 4,5 м, высота – 8,0 м; масса испытываемого объекта – до 16 000 кг; вакуумная камера: объём полный – 1 080 м³, объём полезный – 300 м³, диаметр – 7,9 м, высота (длина) – 15,2 м, диаметр загрузочного люка – 4,995 м, наличие криогенных экранов – имеются, внутренний диаметр поверхностей экранов – 5,95 м, время выхода камеры на рабочий режим – 15 ч 24 мин., время штатного останова камеры – 12 ч 16 мин, время штатной разгерметизации камеры до давления 760 мм рт. ст. – 30 ч 40 мин, давление в вакуумной камере (предельное давление разрежения) – $1,3 \times 10^{-4}$ Па, расположение оси камеры – вертикальное.

Состав средств имитации условий штатной эксплуатации объекта испытаний: вакуумная камера, имитатор реликтового фоновое излучения, имитатор солнечного излучения, имитатор инфракрасного излучения, имитатор пространственного положения объекта испытаний.

На рис. 1 изображена схема установки для тепловакуумных испытания в ФКП «НИЦ РКП».

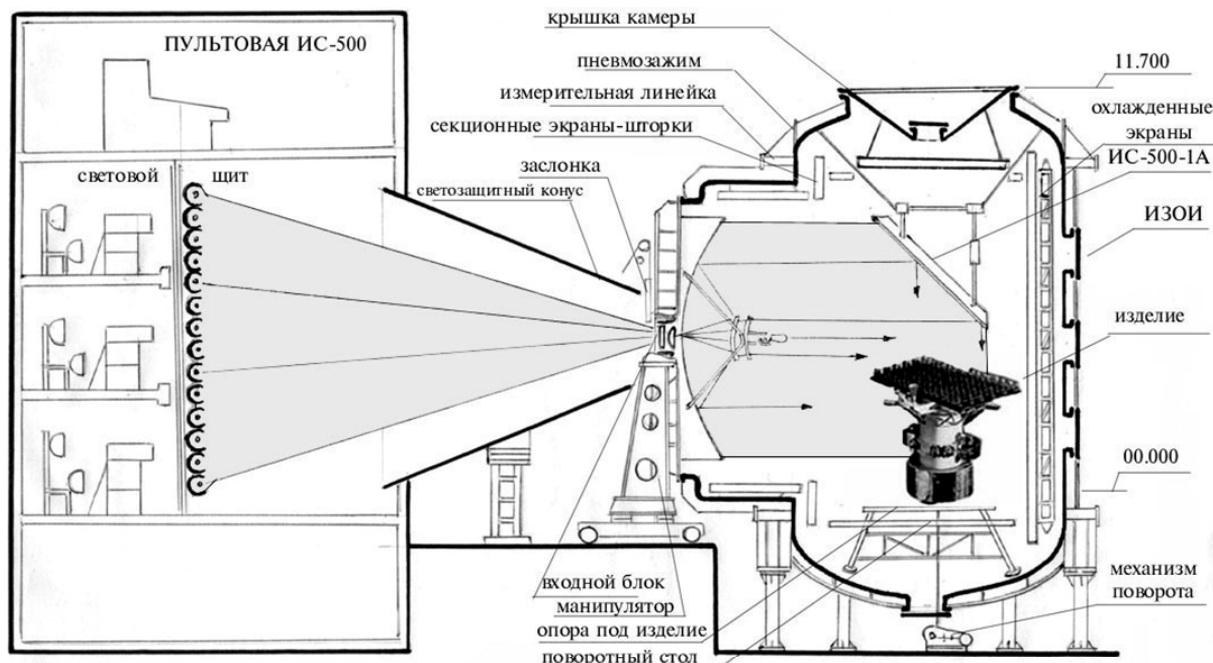


Рис. 1. Схема установки для тепловакуумных испытания в ФКП «НИЦ РКП»

В связи с особенностями устройства вакуумной камеры для проведения высокоточных замеров потребуются автоматизированный процесс сканирования на рис. 2 возможная схема сканирования с помощью сканера установленного на робот-манипулятор.

Сканирующее устройство не должно сильно мешать нагреву испытываемого изделия поэтому в промежутках между сканированием не должно загораживать излучение.

Возможная схема испытания изделия на рис. 3.

Для параболических космических антенн требуется, чтобы СКО было менее 0,05 мм. Следовательно, сканер должен иметь способность обеспечить сканирование с разрешением позволяющим определить СКО менее 0,05 мм. Также требуется способность работать в вакууме.

Сканеры имеющие такую высокую точность измерений существуют. На сайте официального дилера 3D сканеров ЗАО «Группа компаний «Глобатэк» имеются сканеры с точностью более 30 мкм. Один из таких сканеров **ATOS Triple Scan** – 3D-сканер промышленного класса (бесконтактная координатно-измерительная машина) компании GOM, предназначенный для высокоточного измерения как очень мелких так и крупных объектов. Обеспечивает точность до 10 микрон со скоростью сбора данных до 16 млн точек в секунду. Использует сразу три независимых сканирования и технологию подсветки Blue-Light, обеспечивающую максимальное качество и стабильность результатов [3].

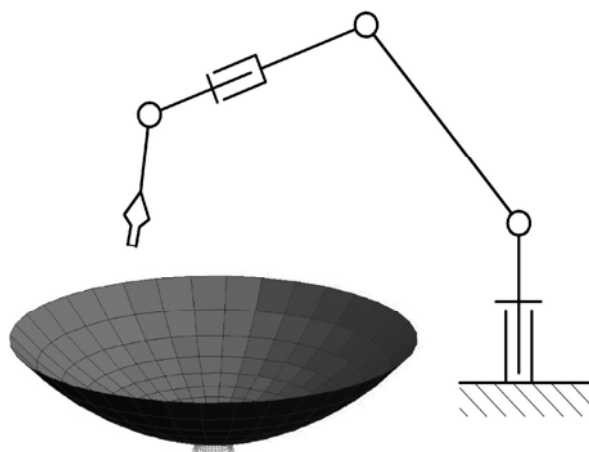


Рис. 2. возможная схема сканирования

Основной проблемой при работе с оптическими (и иными бесконтактными) методами является возможность работы приборов промышленного назначения в вакууме, а также в условиях экстремальных перепадов температур (при имитации космического пространства) и сохранение точности измерений при изменении оптической плотности среды.

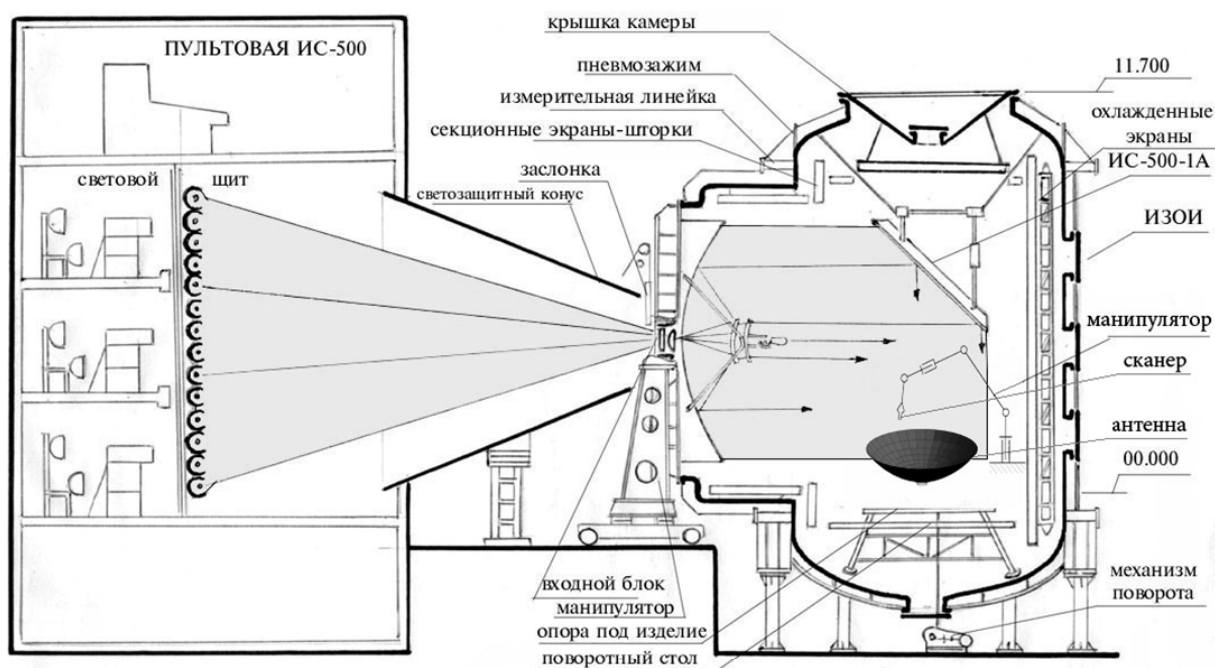


Рис. 3. Возможная схема сканера сканирования антенны во время испытаний

Для работы в условиях эксперимента, этот прибор можно поместить в специальный герметичный корпус. Возможна калибровка фокусировка для корректировки стекла корпуса и вакуумной среды как настройкой и/ или модификации или программными методами. (Или заказать сканер для специальных условий.)

Вывод. Существует возможность испытаний параболической антенны, на термические нагрузки с использованием российского испытательного комплекса ИС-618 в ФКП «НИЦ РКП». С использованием сканеров ATOS с доработкой для работы в вакууме или другим методом сканирования.

Библиографические ссылки

1. Митрохин В. Н., Можаров Э. О. Радиоголографический метод контроля профиля параболических зеркальных антенн по электромагнитному полю в ближней зоне // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 4. С. 81–95.
2. Тепловакуумные испытания [Электронный ресурс] // Федеральное казенное предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности». URL: http://www.nic-rkp.ru/default.asp?page=servises_thermal_vacuum_tests (дата обращения: 04.12.2019).
3. 3 мкм [Электронный ресурс] / ЗАО «Группа компаний «Глобатэк». URL: <http://3d.globatek.ru/3d-scanners/30mkm/> (дата обращения: 04.12.2019).

© Тимофеев В. В., 2020

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЧАСТИЧНЫХ БАЛАНСОВЫХ ИСПЫТАНИЙ МИКРОТУРБИН

Ю. Н. Шевченко, О. В. Шилкин, Е. Н. Луговой, М. О. Шилкина, М. А. Ермаков

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

Рассмотрена и предложена методика проведения энергетических испытаний микротурбин включающая элементы балансовых испытаний с выделением гидравлических потерь в подводящем устройстве (направляющем аппарате) и гидравлических потерь в рабочем колесе центробежной реактивной микротурбины малой мощности до 500 Вт с дозвуковым перепадом давления турбины такого класса имеют низкий коэффициент быстроходности и как следствие низкий общий гидравлический КПД, что связано с низкой энтальпией и малым расходом рабочего тела. Учитывая изложенные низкие теплоэнергетические параметры потока, возникает необходимость разработки методик исследовательских испытаний микротурбин как двигателя электрогенератора (нагрузки) в балансирном корпусе, позволяющим учитывать механический крутящий момент на корпусе.

Ключевые слова: энергетические испытания микротурбин, методика обработки результатов на входном участке, подводящем устройстве, адиабатная работа, уравнение энергии, диаграмма скоростей на входе в рабочее колесо, крутящий момент.

Основой расчета энергетической системы с энергетической установкой является исследование процессов тепло-, массо- и энергообмена в граничных условиях базовых элементов установки. В общем случае цель таких расчетов – определение производительности и энергетической эффективности установки. Сложность конструкции и специфические особенности процессов теплопередачи (нестационарность процессов теплообмена, комплексный характер коэффициентов теплопередачи и т. д.) и энергообмена (зависимость удельных параметров от конструктивного исполнения, наличие значительного числа потерь в энергетическом балансе, необходимость учета изменения свойств рабочих тел) требуют сложных методов проектирования, в то время, как необходимость проведения сравнительного анализа различных конструкций установки предъявляет к таким методам требования достаточной простоты для целей оперативного анализа.

Для решения поставленной задачи необходима разработка соответствующих методов и алгоритмов, позволяющих проводить многовариантные расчеты энергетических систем с энергоустановками и определять наиболее эффективные, в части массо-энергетических характеристик, схемные решения при проектировании.

Таким образом, разработка математических методов расчета и моделирования ЭС с ЭУ, позволяющих проводить многовариантные расчеты с возможностью оценки влияния конструктивных и режимных параметров, представляет сложную научно-техническую задачу, решение которой представлено в материалах данной работы

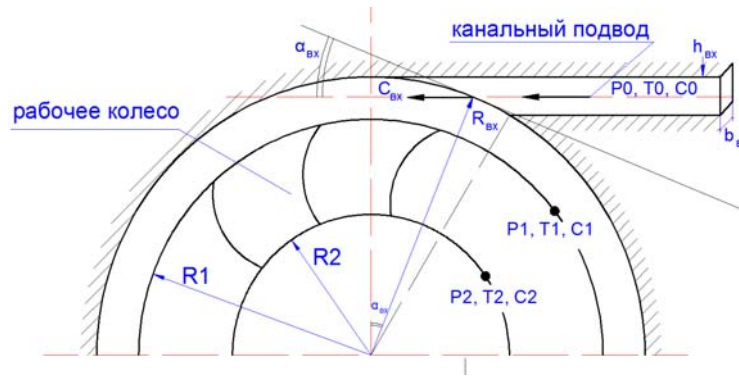
Энергетические испытания проводятся с элементами балансовых испытаний, возможных на материальной части физического макета с дополнительной установкой измерительных (станций) постов:

P^* – полного давления; p – статического; $T_{\text{изм}}$ – измеренной равновесной температуры.

Расположение постов (измерительных станций), с целью коррекции расчетного алгоритма, полностью совпадает с принятой расчетной схемой (рис. 1).

Последовательность постов измерений соответствует:

- пост измерений перед входом в канальном подводе $P_{\text{вх}}^*$; $T_{\text{вх}}^* = T_{\text{вх}}$;
- в канале подводящего устройства P_0 ; P_0^* , $T_{0 \text{ изм}}$;
- на выходе из канального подводящего устройства, на входе в рабочее колесо P_1 ; $P_{1\text{и}}^*$; $T_{1 \text{ изм}}$, где $P_{1\text{и}}^*$ – измеряется в окружном направлении;
- на выходе из рабочего колеса на радиусе R_2 , P_2 , $P_{2\text{и}}^*$, $T_{1 \text{ изм}}$.



Расчетная схема радиальной ступени

Поскольку технически сложно разместить приемник полного давления на радиусе R_1 , продувка канальных подводящих устройств проводятся в специальном приспособлении, без рабочего колеса, на радиусе входе в рабочее колесо, при необходимости эти испытания согласуются по P_1 – статическому давлению при энергетических испытаниях.

Методика обработки результатов на участке /вх – о/ [3]:

Измеряемое $P_{\text{вх}}^*$; $T_{\text{вх}}^*$; P_0 ; P_0^* ; $T_{0 \text{ изм}}$:

$$M_0; T_0; \tau_{f0}; T_0^*; p_0; p_{\text{вх}}^*; C_0; p_0^*.$$

Дополнительно рассчитывает массовый расход двумя способами для исключения промаха.

$$\dot{m} = p_0 \cdot C_0 \cdot F_0 = m \cdot P_0 \cdot F_0 \cdot q_{f0}, \quad (1)$$

где

$$m = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{1}{R}}; \quad (2)$$

$$q_{f0} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \frac{M_0}{\left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_0^2 \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}, \quad (3)$$

$$F_0 = h_0 \cdot b_0, \quad (4)$$

где F_0 – площадь проходного сечения канала подводящего устройств.

Коэффициент потерь $\xi_{\text{вх}}$ для рассчитывается [2]:

$$\frac{2}{C_0} \frac{k}{(k-1)} \cdot \left(\frac{P_{\text{вх}}^*}{p_{\text{вх}}^*} - \frac{P_0^*}{p_{\text{вх}}^*} \right) = \xi_{\text{вх}}. \quad (5)$$

Методика обработки результатов на участке /0 – 1/

Измеренные: P_{1u}^* ; P_1 ; $T_{1 \text{ изм.}}$.

Известны: P_0^* ; P_0 ; p_0 ; T_0 .

Рассчитываются по выражениям для окружной составляющей C_{1u} :

$$M_{1u}, T_{1u}, \tau_{f1}, T_{1u}^*, C_{1u}, p_u. \quad (6)$$

Параметры рассчитаны по окружной составляющей C_{1u} не обходима коррекция

$$C_1 = \sqrt{C_{1u}^2 + C_{1R}^2}, \quad (7)$$

где C_{1R} – радиальная составляющая абсолютной скорости на входе определяется в первом приближении $p_1 = p_{1u}$.

$$C_{1R} = \frac{\dot{m}}{p \cdot F_2} = \frac{\dot{m}}{p_1 \cdot 2\pi \cdot R_1 \cdot b_1}, \quad (8)$$

где $\dot{m}$ (1) Корректируется полное давление:

$$P_1^* = P_1 + \frac{C_1^2}{2} \cdot \frac{k-1}{k}. \quad (9)$$

И совершается прогон пока $\frac{C_{1i+1} - C_{1i}}{C_{1i+1}} \leq 0,01$.

При известных C_1 ; C_{1u} ; C_{1R} рассчитывается угол абсолютной скорости:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{C_{1R}}{C_{1u}}. \quad (10)$$

Угол относительной скорости:

$$\beta_1 = \arctg \frac{C_{1R}}{C_{1u} - U_1} = \arctg \frac{C_{1R}}{(C_{1u} - \omega_1 \cdot R_1)}. \quad (11)$$

$$W_1 = \frac{|C_{1u} - U_1|}{\cos \beta_1}.$$

Угол атаки:

$$i = \beta_{1\text{л}} - \beta_1, \quad (12)$$

где $\beta_{1\text{л}}$ – конструктивный параметр.

Коэффициент потерь сопла (подводящего аппарата) для выражения:

$$\xi_c = \left(\frac{P_0^*}{p_0^*} - \frac{P_0^*}{p_1^*} \right) \cdot \frac{2}{C_1^2} \frac{k}{(k-1)}. \quad (13)$$

Методика обработки результатов на участке /1 – 2/

Измерение: P_{2u}^* ; p_2 ; $T_{2u \text{ изм.}}$.

Известны: P_1^* ; P_1 ; T_1 .

В первом приближении C_{2u} рассчитываются по p_u^* .

Абсолютная скорость на входе

$$C_2 = \sqrt{C_{2u}^2 + C_{2R}^2}, \quad (14)$$

Где в первом приближении $p_u = p$.

$$C_{2R}^2 = \frac{\dot{m}}{p_2 \cdot F_2} = \frac{\dot{m}}{p_2 \cdot 2\pi R_2 \cdot b_2}, \quad (15)$$

где $\dot{m}$ (2) – массовый расход.

Корректируется полное давление:

$$P_2^* = P_2 + \frac{C_1^2}{2} \cdot \frac{k-1}{k}. \quad (16)$$

И совершается прогон до относительной точности 0,00.

В результате известны:

$$P_2; C_2; C_{2u}; C_{2R}; P_2^*; p_2; p_2^*. \quad (17)$$

Если известно $P_2 = P_{\text{атм}}$; $p = p_{\text{атм}}$, то:

$$C_{2R} = \frac{\dot{m}}{p_2} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot R_2 b_2}, \quad (18)$$

$$W_2 = \frac{C_{2R}}{\sin \beta_2}, \quad (19)$$

где β_2 – задано конструктивно;

$$C_2 = \sqrt{W_2^2 + (\omega \cdot R_2)^2 - 2W_2 R_2 \omega \cdot \cos \beta_{2л}}, \quad (20)$$

$$C_{2u} = U_2 - W_2 \cos \beta_{2a}, \quad (21)$$

где $U_2 = \omega \cdot R_2$,

Составляющие скоростей для (16), рассчитываются по (17)...(20).

Коэффициент потерь для рабочего колеса рассчитывается:

$$\xi_k = \left| \left(\frac{P_1}{p_1} - \frac{P_2}{p_2} \right) \frac{k}{k-1} - \left(\frac{U_1^2 - U_2^2}{2} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2} \right) \right| \frac{2}{W_2^2}, \quad (22)$$

$$U_1 = R_1 \cdot \omega, \quad U_2 = R_2 \cdot \omega, \quad W_1 = \frac{C_{1u} - U}{\cos \beta_1}, \quad (23)$$

W_2 из (18).

Энергетические характеристики ступени [1]:

Адиабатная работа:

$$L_{\text{ад}} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_{\text{вх}}^*}{P_{\text{вх}}^*} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{k}{k-1} \cdot R T_{\text{вх}}^* \left[1 - \frac{P_2}{P_{\text{вх}}^*} \right]. \quad (23)$$

Абсолютная скорость:

$$C_{ад} = \sqrt{2L_{ад}}, \quad (24)$$

По значениям (8), (9) отношения $\frac{U_1}{C_1}$:

$$\frac{U_1}{C_1} = \frac{\omega \cdot R_1}{C_1}. \quad (25)$$

Затраченная мощность:

$$N_{затр} = \dot{m}L_{ад}, \quad (26)$$

где $\dot{m}$ (2).

Полезная работа на валу:

$$N_{пол} = M_{г} \cdot \omega, \quad (27)$$

где ω – угловая скорость; $M_{г}$ – реактивный момент балансированного подвеса генератора.

Окружная мощность:

$$N_u = M_u \cdot \omega = L_u \cdot \dot{m}(C_{1u}U_1 - C_{2u}U_2). \quad (28)$$

Окружной момент:

$$M_u = \frac{\dot{m}}{\omega}(C_{1u}U_1 - C_{2u}U_2). \quad (29)$$

Окружной КПД ступени:

$$\eta_u = \frac{N_u}{N_{затр}}. \quad (30)$$

Полный КПД ступени:

$$\eta = \frac{N_{пол}}{N_{затр}}. \quad (31)$$

Предложенная методика проведения энергетических испытаний позволяет оценивать энергетику парциального потока в подводящем устройстве по периферии рабочего колеса с расчетной оценкой коэффициента потерь подводящего устройства, а также энергетику исходящего потока с рабочего колеса с расчетом коэффициента гидравлических потерь в рабочем колесе. Результаты испытаний необходимы для верификации расчетных моделей течений с целью оптимизации проточной части микротурбины.

Библиографические ссылки

1. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М. : Энергоатомиздат, 1990. 423 с.
2. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2003. 336 с.
3. Галеркин Ю. Б., Рекстин Ф. С. Методы исследования центробежных компрессорных машин. Л. : Машиностроение, 1969. 304 с.

© Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Луговой Е. Н.,
Шилкина М. О., Ермаков М. А., 2020.

ВЛИЯНИЕ СТЕНДОВЫХ СИСТЕМ И КОНСТРУКЦИИ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЯГИ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

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

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

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

*E-mail: alex-beg95@mail.ru

Рассматривается влияние основных негативных факторов на процесс измерения тяги двигателей летательных аппаратов (ДЛА) вызванных особенностями конструкции силоизмерительного устройства (СИУ) испытательного стенда, влиянием стендовых систем, а также специфичных характеристик испытуемых ДЛА. Приведены примеры учета негативных влияний с помощью расчетных поправок, или же на примере существующих патентов продемонстрированы технические решения исключающие данные негативные влияния процесса силоизмерения.

Ключевые слова: силоизмерительное устройство, испытательный стенд, измерение тяги

Введение. В процессе опытной отработки ДЛА существует необходимость определения достоверной, величины и направления вектора тяги двигателя. Для прямого измерения тяги ДЛА испытательные стенды оборудуются специальными СИУ. Зачастую характеристики двигателей диктуют требования к конструкции СИУ, а также к выбору способа измерения тяги и оценки результатов испытания. К основным характеристикам ДЛА можно отнести тип, конструкторское исполнение, особенности режима работы, мощностные характеристики и др. Назначение, технические данные СИУ, взаимосвязь с другими стендовыми системами, должны соответствовать характеристикам испытуемого ДЛА. Процесс измерения силы тяги двигателя является сложной метрологической задачей, при которой необходимо учесть влияющие факторы от двигателя, конструкции СИУ, а также влияние стендовых систем на процесс силоизмерения. Негативные факторы, проявляющиеся в процессе испытания, пытаются полностью исключить, либо учесть в виде точно учтенных поправок. Чаще всего попытки исключить негативные факторы можно наблюдать при испытании микродвигателей (МД) и измерении боковых составляющих тяги, поскольку регистрируемые нагрузки могут находиться на грани точности измерения применяемой аппаратуры.

Влияние конструкции СИУ. Габариты и тип конструкции СИУ напрямую зависит от величины тяги ДЛА, измерение которой необходимо произвести. Для измерения тяги двигателей малой тяги (ДМТ) используются высокочувствительные конструкции: на базе рычажной шарнирной балки, по схеме крутильных весов, с помощью чувствительной динамометрической платформы и т. д. Так как имеет место измерение силы малой величины, то даже незначительное влияние может свести к неприемлемому применению определённых конструкций СИУ. Для измерения тяги мощных двигателей, СИУ обычно представляет собой добротную конструкцию для испытания двигателя факелом вниз или в горизонтальном положении. Горизонтальное расположение в большинстве случаев применяется при испытании ракетных двигателей твердого топлива, за счет использования стапельного оборудования, или же СИУ с динамометрической

платформой. При испытании мощных ЖРД обычно применяются конструкции СИУ с подвижной рамой на ленточных подвесках или упругих шарнирах, а также конструкции с жестким соединением между силовоспринимающей рамой и несущей конструкцией стенда.

При отсутствии необходимости определения градуировочной величины, т. е. зависимости показаний датчика силы от известной приложенной нагрузки, с учетом, установленного на рабочем месте ДЛА, может допускаться градуировка датчика в измерительной лаборатории в период профилактики стенда. Но в большинстве случаев необходимо предварительно отградуировать датчик в сборе с испытуемым двигателем, в связи, с чем в состав СИУ вводится специальное градуировочное устройство. Процесс градуировки вносит свою погрешность в процесс измерения тяги двигателя, представляющую собой сумму систематической погрешности средств задания усилия, случайной составляющей погрешности при градуировке и погрешности регистрирующего прибора [1]. Систематическая составляющая основной погрешности зависит от типа и конкретной конструкции градуировочной системы. В общем случае создание градуировочного усилия выполняют с помощью эталонных грузов или же силового пневмо- или гидропривода. Градуировка СИУ для измерения тяги ДМТ преимущественно выполняется с помощью эталонных грузов, так как последние обладают технологической простотой, т. е. обладают очень высокой точностью, не усложняют процесс градуировки, не требуют дополнительных устройств увеличивающих усилие, что в целом минимально влияет на погрешность градуировки. В случае испытания мощных ДЛА, градуировка может производиться аналогично с помощью эталонных спецгрузов, но с использованием устройства увеличивающее приложенную нагрузку. В качестве такого устройства применяется система рычагов на призмных опорах, имеющая определенное, заданное при проектировании, передаточное отношение. Более технологичным решением создания усилия считается использование гидравлического градуировочного привода, позволяющего производить градуировку в дистанционном режиме. В обоих случаях погрешность процесса градуировки имеет более высокое влияние на получение достоверной величины тяги ДЛА, в связи, с чем на него обращают особое внимание. В случае рычажной градуировочной системы вносятся дополнительные погрешности за счёт неточности передаточного отношения, упругих свойств рычагов, не учтенных процессов сопряжения в призмной опоре и др. В свою очередь силовой привод имеет сложный технологический состав оборудования, каждый элемент из которого может вносить погрешность на процесс создания градуировочного усилия.

В процессе установки двигателя на рабочее место может иметь место смещение точки приложения или несовпадение оси вектора тяги ДЛА образцовому вектору измерения СИУ. Важно отметить в скольких точках позволяет производить измерение силы конструкция СИУ, или же каким техническим решением осуществляется совмещение геометрической оси ДЛА с образцовой осью измерения. Если конструкция СИУ имеет две опоры и соответственно две ветви измерения, то влияние несовпадения точек приложения образцового и измеряемого усилия можно учесть определением поправки. Определение поправки основано на определении смещения точки приложения усилия при измерении в ходе испытания и в ходе градуировки. Таким образом, определяется зависимость смещения измеряемого усилия на одну или на другую ветвь измерения, из чего в процессе анализа для каждого испытания делается вывод о действительном значении тяги ДЛА. В случае, когда СИУ имеет одну ветвь измерения, важно максимально приблизить геометрическую ось двигателя к оси измерительной системы. Одним из технических решений является источник [2], в котором для совмещения геометрической оси электроракетного двигателя (ЭРД) и оси приложения градуировочного усилия конструкция СИУ оборудовано специальными средствами юстировки, либо источник

[3] в котором при горизонтальном СИУ погрешность за счет несоосности исключается установкой шарнирного устройства.

Влияние стендовых технологических систем. Наиболее большим количеством технологических систем оборудуются стенды для испытания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРД МТ), поскольку должны включать системы для возможности подачи и работы с компонентами жидкого ракетного топлива (КЖРТ). Если в данном случае применяется конструкция СИУ, подразумевающая подвешивание двигателя к силовоспринимающей раме, то начинают возникать такие влияющие факторы, как жесткость связей абсолютно всех систем подключаемых к двигателю, так и влияние КЖРТ в процессе огневого испытания. Влияние КЖРТ на результаты измерения тяги минимизируется лишь в случае, когда объектом испытания является двигательная установка (ДУ) и градуировка произведена в заправленном состоянии изделия. В общем случае по условиям обеспечения безопасности стендового персонала градуировка СИУ перед огневым испытанием проводится при отсутствии КЖРТ в магистралях и рабочих полостях двигателя [4]. Перед огневым испытанием проводятся операции по подаче КЖРТ на входы двигателя в связи, с чем в силу изменения начальной массы объекта испытаний происходит смещение «нулевых» показаний датчиков силы зарегистрированных в процессе градуировки. Учет этого воздействия осуществляется поправкой, которая определяется расчетным путем по формуле

$$R_{в1} - g_{мест} \left(\sum_{i=1}^n V_{iA} \cdot \rho_A + \sum_{j=1}^n V_{jГ} \cdot \rho_{Г} \right) \cos \alpha,$$

где V_{iA} , $V_{jГ}$ – объемы i -й и j -й полостей стендовых расходных магистралей и двигателя, заполняемых компонентами топлива после регистрации нулевых показаний датчиков СИУ: окислителя с плотностью ρ_A и горючего с плотностью $\rho_{Г}$ соответственно; n , m – количество полостей, заполняемых после регистрации нулевых показаний СИУ окислителем и горючим соответственно; $g_{мест}$ – местное ускорение свободного падения; α – значение угла между векторами силы тяжести и измеряемого усилия [4].

При испытании ЖРД для обеспечения динамического соответствия стендовых и объектовых систем питания высокоэффективен метод использования разделительных емкостей, или так называемых пусковых баков. [5] Пусковые баки включены в работу в момент запуска двигателя, после чего по программе отсекаются запирающей арматурой, и дальнейшее питание двигателя производится из основных стендовых баков. Пусковые баки заправляются с помощью стендовой системы измерения уровня до требуемого значения объема газовой подушки в баках, рассчитанной для данного изделия. Данная операция выполняется после подачи КЖРТ на входы двигателя и имеет влияние на изменение начальных показаний датчиков силы в связи, с чем вводится поправка за счет изменения массы компонента в пусковых баках. Определение данной поправки зависит от типа используемых стендовых систем измерения уровня и сводится к определению зависимости изменения веса компонента в пусковом баке по градуировочным характеристикам системы измерения уровня с учетом программы испытания.

КЖРТ кроме влияния массы на процесс измерения тяги, оказывают также влияние силами возникающими от изменения направления скорости потока КЖРТ. Влияние учитывается поправкой определяемой единожды для одного состава технологических связей и в общем случае описывается формулой

$$R_{ис} = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{m}_i^2}{g_{мест} \rho_i F_i} \cdot \sin \varphi_i,$$

где n – количество магистралей, заполняемых компонентами при огневых испытаниях ЖРД; $\dot{m}_i$ – значение массового расхода в i -й расходной магистрали; $g_{\text{мест}}$ – местное ускорение свободного падения; ρ_i – плотность компонента в i -й магистрали; F_i – площадь поперечного сечения трубопровода i -й магистрали; φ_i – угол между продольной осью трубопровода i -й магистрали и перпендикуляром к продольной оси СИУ в плоскости, проходящей через оси трубопровода и СИУ [4].

Влияние жесткости связей между испытуемым ДЛА и СИУ. Одним из технических решений по уменьшению погрешности измерения тяги МД является задача скомбинировать стендовую систему обеспечения компонентом топлива или же систему питания ДУ с элементами конструкции СИУ. В частности данная задача актуальна для испытания ДУ малых тяг, поскольку монтаж всей установки на СИУ приводит к значительному увеличению массы испытуемого объекта, а следствием к увеличению погрешности замеров тяги. Примерами разрешения данной задачи являются источники [6; 7], в которых произведена комбинация питающей подводящей системы и СИУ. Решения заключаются в использовании измерительной рычажной балки с внутренней полостью для питания однокомпонентного МД, или же системы подводящих трубопроводов парно соединенных жесткими элементами, для испытания ЖРДМТ, с целью исключения изгибающих моментов от сил давления компонентов топлива. Приведенные решения нацелены на исключение данного фактора, но не всегда имеется возможность исключить данное влияние.

Если сохранить связь между испытуемым ДЛА и системой питания в процессе градуировки датчика силы будет возникать систематическая погрешность, которая для испытания МД может иметь решающее значение. В случае испытания мощных ЖРД данное влияние невозможно исключить, в связи с тем, что расходные магистрали имеют внушительные размеры, и кроме этого изделие подвергается так называемой обвязке: подстыковке кабельных переходников, измерительных трубопроводов, трубопроводов системы послепусковой обработки изделия и т. д. В данном случае учитывается поправка на влияние разности значений сил, воспринимаемых связями при градуировке и измерении за счет изменения жесткости связей СИУ. Поправка учитывается конкретно для каждого испытания. В общем случае вид функции влияния за счет изменения жесткости связей имеет вид

$$R_{\text{ж}} = c_{\Sigma}^{\text{исп}} h_{\text{исп}} - c_{\Sigma}^{\text{гр}} h_{\text{гр}},$$

где $c_{\Sigma}^{\text{исп}}$, $c_{\Sigma}^{\text{гр}}$ – коэффициенты пропорциональности между нагрузкой на силоизмеритель и перемещением подвижной рамы СИУ совместно с присоединенными к ней расходными магистралями (жесткость связей СИУ) при испытании и градуировке соответственно; $h_{\text{исп}}$, $h_{\text{гр}}$ – перемещение подвижной рамы СИУ в месте крепления к ней расходных магистралей при огневых испытаниях и градуировке соответственно [4].

В данном случае возникает задача определения коэффициентов пропорциональности [4]. Данная задача решается, анализируя зависимость величин перемещения подвижной рамы от ступеней градуировочной нагрузки. Показания перемещения рамы снимаются с помощью индикаторов. Данную зависимость исследуют для различных составов технологических связей. При подготовке систем стенда к огневых испытаниям исследуют влияние стационарных стендовых пневмогидравлических систем (ПГС) на СИУ, включающих в себя расходные магистрали и установленную на данных линиях агрегатов ПГС. Данное влияние будет иметь место при силоизмерении тяг всех ЖРД на данном СИУ, в независимости от конструкции двигателя и количества подсоединяемых элементов. Производится градуировка СИУ по одинаковым градуировочным ступеням, с присоединением к нему технологической системы и без присоединения.

После чего с помощью полученных графических зависимостей значений перемещения от нагрузки, методом графического вычитания находится зависимость усилия, возникающего за счет изменения жесткости расходных магистралей. Такой же подход используется при подготовке СИУ к конкретному изделию, так как обвязка каждого типа ЖРД будет отличаться, а соответственно представлять собой различные поправки при измерении тяги конкретного двигателя.

Влияние специфичных характеристик ДЛА. Конструкция СИУ или же ход проведения испытания зачастую могут быть продиктованы особенностями испытуемого ДЛА, но в обоих случаях нацелены на минимизацию погрешностей измерения тяги. К специфичным характеристикам двигателя можно отнести особенность режима работы, характеристики требующие учета влияния дополнительных факторов и т. д. Примером влияния режима работы ДЛА может послужить источник [8], в котором при отработке противораковой ракеты, у которой двигатель работает на двух режимах тяги, возникли проблемы с точностью определения тяги на втором режиме. Поскольку первый режим необходим для разгона ракеты, требуется определение тяги с высоким номинальным значением, но при переходе работы двигателя на основной второй режим работы, тяга значительно снижается в связи, с чем измерение тяги той же измерительной системой не осуществляется с требуемой точностью. Техническим решением является добавление в конструкцию СИУ дополнительной измерительной системы, первая из которых снабжается гасителем кинетической энергии, который предохраняет вторую измерительную систему от передачи усилия на первом режиме работы и своевременно переводит на другую систему при втором режиме работы малой тяги.

Достоверное измерение тяги МД осуществимо только при полной имитации условий, в которых функционирует двигатель. Первым и самым важным условием для двигателей космических аппаратов является имитация космического пространства, которая в наземных условиях осуществляется с помощью барокамер. Существуют барокамеры для испытания одного МД, или же партии двигателей. В целом к СИУ в данном случае предъявляются одинаковые требования, заключающиеся, в оптимальной компоновке двигателей внутри пространства барокамеры или же в минимизации размеров СИУ. При испытании партии МД существует способ [9] установки МД в барокамере по спирали, учитывая расчетные габариты конуса факела двигателей или же способы с вертикальной установкой всех двигателей. В данных способах отмечается влияние изменения окружающей температуры на посадочное место, а следствием и на датчик силы, в связи, с чем в процессе испытания для сохранения точности требуется периодическая переградуировка датчика с учетом окружающей температуры. Так как градуировка производится в условиях вакуума, требуется обеспечить дистанционное управление процессом градуировки без нарушения хода испытания, что отражается на конструкции СИУ и на анализе результатов измерения тяги двигателей. Примером решения данной технической задачи является источник [2].

Один из специфичных факторов, влияющих на процесс силоизмерения, проявляется в испытании ЭРД. К типовым особенностям силоизмерения МД, к ЭРД в значительной мере добавляется влияние электромагнитных помех (так называемых «наводок» на показания СИУ), первичным генератором которых является сам двигатель. При этом источником этих помех для СИУ может являться не только сам двигатель, но и кабель его электропитания, а также истекающая из двигателя струя. При протекании электрического тока по кабелям питания разряда двигателя между этими кабелями будет наблюдаться силовое взаимодействие. Часть кабелей, подходящих непосредственно к двигателю, располагается на подвижной системе СИУ, а часть вне ее. При работе двигателя между этими частями кабелей будут возникать силовые взаимодействия, которые приведут к созданию дополнительной силы на подвижную систему СИУ, что понижает точность измерения силы тяги двигателя. Существуют способы учета данных

влияний. Первым примером решения может быть источник [10] при котором в конструкцию СИУ внедряется специальный приемник пучка плазменной струи напротив двигателя. Величину силы тяги определяют по разности показаний СИУ до и после установки приемника пучка. При этом электромагнитные помехи присутствуют до и после установки приемника пучка напротив двигателя и «вычитаются» при определении величины силы тяги. Или же существуют способы проведения хода испытания поэтапным запуском двигателя, приведенные в источнике [11], при котором производится учет электромагнитных помех датчика силы.

Библиографические ссылки

1. Эткин Л. Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 408 с.
2. Пат. 2312316 Российская Федерация, G01L 5/00, G01M 15/00. Способ измерения тяги электрореактивных двигателей и устройство для его реализации / Никипелов А. В. № 2006105132; заявл. 20.02.2006; опубл. 10.12.2007.
3. Пат. 2225527 Российская Федерация, F 02 К 9/96. Стенд для измерения тяги ракетного двигателя / Большаков А. Н., Завальнюк А. Г. № 2002114953/06; заявл. 05.06.2002; опубл. 10.03.2004.
4. 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.
5. Галеев А. Г. Основы устройства испытательных стендов для отработки жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок : руководство для инженеров-испытателей. г. Пересвет Московской области : Изд-во ФКП «НИЦ РКП», 2010. 178 с.
6. Пат. 2307331 Российская Федерация, G01L 5/13, G01M 15/00. Способ определения тяги микродвигателя и устройство для его осуществления / С. А. Пиюков, А. В. Дубов, В. А. Котовщиков и др. №2005135386/28; заявл. 14.11.2005; опубл. 27.09.2007.
7. Пат. 2312318 Российская Федерация, G01L 5/16. Устройство для измерения силы / Ульянов Г. В. № 2005102847; заявл. 04.02.2005; опубл. 10.12.2007.
8. Пат. 2171454 Российская федерация, G01L 5/13. Способ измерения силы тяги двухрежимного реактивного двигателя / Поломских Н. Л., Рыжкова Е. А. № 99125977; заявл. 07.12.1999; опубл. 27.07.2001.
9. Пат. 2221996 Российская Федерация, G01L 5/00, G01M 15/00. Способ измерения силы тяги реактивных двигательных установок и стенд для его осуществления / Орлов С. А., Ромашко А. В., Накипелов А. В. № 2001117417; заявл. 21.06.2001; опубл. 20.07.2003.
10. Esker D. W., Kroutil J. C., Checkley R. J. Design and performance of radiation-cooled MPD arce thruster. AiAA Pp. 69–245.
11. Пат. 2204814 Российская Федерация, G01L 5/00, G01M 15/00. Способ измерения силы тяги электрореактивного двигателя (варианты) и устройство для его осуществления / Беликов М. Б., Васин А. И., Шпанов И. Г. и др. № 2001131128; заявл. 20.11.2001; опубл. 20.05.2003.

© Бегишев А. М., Журавлев В. Ю., Торгашин А. С., 2020

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ КАМЕРЫ ЖРД НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ МЕТОДОМ БАРОАКВАРИУМА

Е. П. Талай, С. Е. Канюка
Научный руководитель – 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: il20596@mail.ru; kanyuka_98@inbox.ru

Рассматриваются методики, применяемые при испытаниях на герметичность камер ЖРД. Приведен анализ методики испытания камеры ЖРД на герметичность в бароаквариуме, предложены способы повышения качества измерений.

Ключевые слова: испытания ЖРД на герметичность, газогидравлические испытания, бароаквариум.

Целью исследования является проведение мероприятий по повышению качества измерений при испытании камеры ЖРД на герметичность методом бароаквариума.

Как показал отечественный и зарубежный опыт эксплуатации различных типов ракетносителей, уровень негерметичности ЖРД и двигательных установок в целом оказывает высокое влияние на показатели надежности. Ужесточение требований к герметичности ЖРД и двигательных установок напрямую связаны с двумя основными причинами – это взрыво- и пожароопасность, которые возникают при истечении компонентов топлива. Проведение испытаний на герметичность занимают немаловажное место в производственном цикле ЖРД, следовательно, они и по сегодняшний день остаются актуальными.

Метод бароаквариума это один из вариантов метода аквариума (рис. 1) являющегося разновидностью газогидравлического метода испытания ЖРД на герметичность.

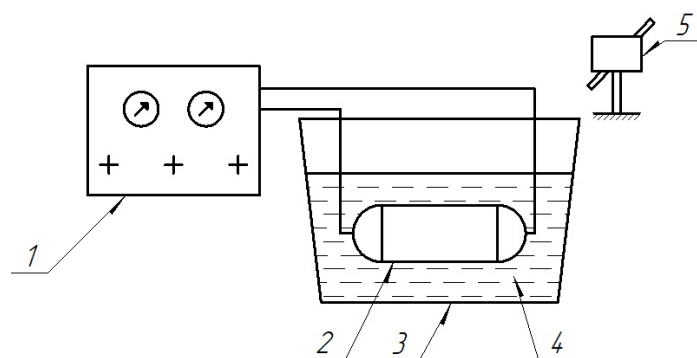


Рис. 1. Принципиальная схема испытаний методом аквариума:
1 – пневмопульт; 2 – объект испытания; 3 – ванна;
4 – технологическая жидкость; 5 – микроскоп

Метод аквариума позволяет определять локальные течи в узлах пневмогидравлических схем ЖРД. Объект испытания погружают в ванну с жидкостью на глубину 50...100 мм, при этом он должен быть предварительно заполнен контрольным газом до давления, составляющего 10...20 % от испытательного, чтобы жидкость ванны

не закупорила течи. Ванну выполняют из прозрачного материала либо делают в ней смотровые окна. Затем объект испытания заполняют газом до испытательного давления и выдерживают в жидкости в течение времени, достаточного для его осмотра, но не менее 3 мин. Появление газовых пузырьков свидетельствует о наличии течи.

Значение локальных течей $Q_{л.т}$ определяют по формуле

$$Q_{л.т} = \frac{5,32 \cdot 10^{-3} d^3 n}{\tau_{набл}},$$

где d – диаметр пузырька в момент отрыва, мм; n – число пузырьков; $\tau_{набл}$ – время наблюдения, с. Чувствительность метода аквариума зависит от вязкости технологической жидкости. При использовании жидкости с малой вязкостью (например, спирта) чувствительность выше (до $5 \cdot 10^{-7}$ Вт), а при использовании более вязких жидкостей (например, обессоленной воды) чувствительность снижается до $5 \cdot 10^{-6}$ Вт.

Повысить чувствительность данного метода можно, вакууммируя объем над поверхностью технологической жидкости – вариант бароаквариума (рис. 2), т. е., устранив воздействие атмосферного давления на образование пузырьков, снижают давление, достаточное для их образования.

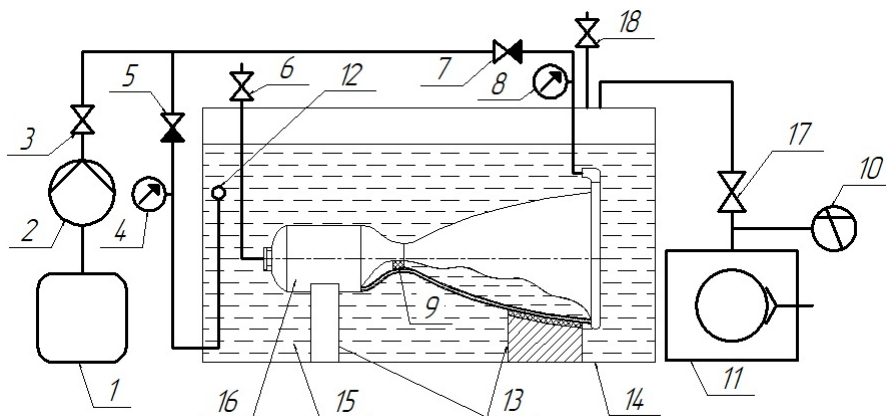


Рис. 2. Принципиальная схема испытания камеры ЖРД методом бароаквариума:
1 – резервуар контрольного газа; 2 – насос; 3, 6, 17, 18 – вентили; 4, 8 – манометры;
5, 7 – редукторы давления; 9 – заглушка; 10 – вакуумметр; 11 – вакуумный насос;
12 – жиклер контрольной течи; 13 – опоры камеры; 14 – ванна; 15 – технологическая
жидкость; 16 – камера ЖРД

Проведя анализ методики испытания камеры ЖРД на герметичность в бароаквариуме, мы выделили такую проблемную процедуру, как фиксация образовавшихся пузырьков от искомой течи в камере ЖРД.

Фиксацию ведется одним или несколькими испытателями через смотровые окна в ванной либо напрямую через стенки при варианте ванной выполненной из прозрачного материала. Испытатель должен измерить время, посчитать число пузырьков, а также измерить диаметр пузырька в момент отрыва. Так как здесь имеют место ошибки человеческого фактора, мы предлагаем внедрение в методику испытания оборудования для фото и видео фиксации процесса испытания.

Суть внедрения заключается в том, чтобы в ходе испытания одновременно с тем как испытатель засекает время и проводит испытание визуально, происходило фотографирование и видеосъемка процесса испытания несколькими широкоугольными камерами объекта испытания внутри испытательной ванны. Вследствие чего после проведения испытания появляется возможность сравнить данные записанные испытателем

с продублированной покадровой статичной картиной испытания на фотографиях либо с динамичной видеосъемкой.

Для установки фото- и видеоаппаратуры необходимо решить несколько задач:

- расположение камер;
- количество камер;
- процесс фиксации.

Расположение камер обусловлено тем, что контроль течей проводится в основном по местам сварочных соединений, именно напротив них и устанавливаем камеры (рис. 3).

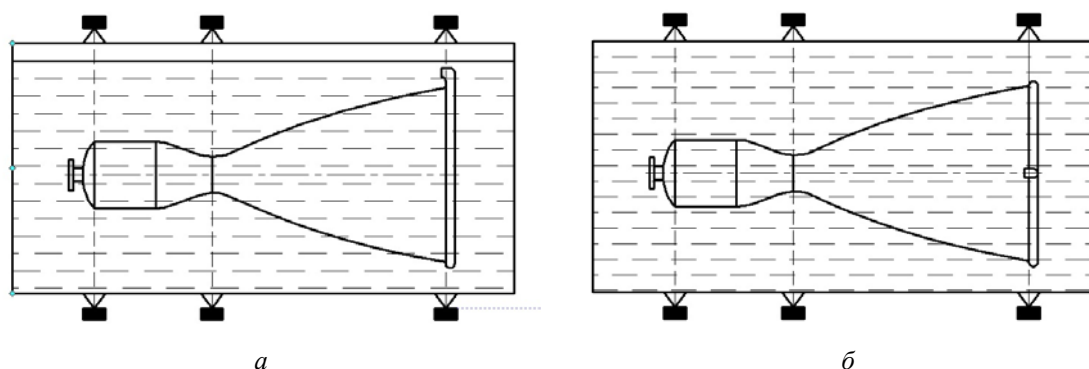


Рис. 3. Схема расположения фото- и видеокамер для фиксации течи:
а – вид слева; б – вид сверху

На нашей схеме исключением является переход от цилиндрической части к докритической. При наличии течи на этом участке ее можно будет зафиксировать по снимкам или видеозаписи одной из соседних камер, так как у них широкий угол захвата изображения. Именно поэтому нет необходимости располагать еще ряд камер напротив этого участка. Из всех расположенных камер на схеме боковые и нижние камеры используются для фиксации местоположения течи, а верхние для фиксации диаметров пузырьков.

Количество фото- и видеокамер можно менять в зависимости от размеров и позиционирования в ванной самой камеры ЖРД. В нашей схеме установлено двенадцать камер по три на каждой грани, кроме торцевых. При малых размерах камеры сгорания можно ограничиться одним рядом камер находящимся между сварочными соединениями смесительной головки с цилиндрической частью и цилиндрической части к докритической. Широкоугольные камеры позволят зафиксировать течи из обоих соединений. При варианте испытания камеры стоящей вертикально в цилиндрической ёмкости можно ограничиться тремя камерами, установленными в каждом ряду под углом 120 градусов между ними. Широкоугольные камеры позволят и здесь провести фиксацию, так как охватят сварочные соединения по всей окружности.

Процесс фиксации напрямую зависит от интенсивности и числа пузырьков образовавшихся из искомой течи. Интенсивность и число пузырьков зависят в свою очередь от давления контрольного газа в рубашечном пространстве, а также от создаваемого вакуума над технической жидкостью в ванной. Критерием фиксации у камер будет являться скорость съемки, то есть число кадров в секунду. Возникновение пузырьков мы регулируем в ходе испытания давлением контрольного газа и вакуумом в ванной. Поэтому при медленном возникновении и перемещении пузырьков скорость съемки снижаем, а при быстром наоборот повышаем.

Благодаря нашему предложенному нововведению мы прогнозируем минимизацию ошибок при измерениях, а также повышение качества самих измерений. Испыта-

тели будут проводить сравнения данных с фото и видеосъемкой. Преимущество фиксации в том, что фото и видео можно неоднократно пересматривать при спорных моментах, чего мы не можем сказать о визуальном наблюдении за ходом испытания в реальном времени.

В будущем после отработки нововведения его можно будет усовершенствовать. В настоящее время активно ведутся работы по технологии определения местоположения одного или нескольких объектов во времени и пространстве с помощью специальных видеокамер. Эта технология называется *трекинг*. Алгоритм анализирует кадры видео и выдает положение движущихся целевых объектов относительно кадра.

С помощью данной технологии в нашем случае можно бы было фиксировать измерения времени, количества пузырьков, и их диаметра в момент отрыва с помощью специальных видеокамер для захвата движения. На основе полученных данных компьютер автоматически мог бы рассчитывать значения локальных течей.

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. Технология производства жидкостных ракетных двигателей : учебник / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков, А. С. Филимонов ; под ред. В. А. Моисеева, В. А. Тарасова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 381 с.: ил. (Технологии ракетно-космического машиностроения).

3. Жуковский А. Е., Кондрусев В. С., Окорочков В. В. Испытания жидкостных ракетных двигателей : учеб. для студ. авиац. спец. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1992.

4. Патент RU 2 117 269 C1, 1998.08.10. Бароаквариум [Электронный ресурс]. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2117269C1_19980810.pdf (дата обращения: 10.01.2020).

5. Патент RU 2 213 945 C2, 2003.10.10. Способы контроля герметичности изделий. [Электронный ресурс]. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2213945C2_20031010.pdf (дата обращения: 10.01.2020).

© Талай Е. П., Канюка С. Е., 2020

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ КАВИТАЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИИ НАСОСОВ ЖРД

А. С. Торгашин, А. М. Бегишев, А. В. Власенко, И. А. Клешина
Научный руководитель – Д. А. Жуиков

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ttarg23@yandex.ru

Рассматривается возможность применения акустического метода регистрации пузырей кавитации при испытании насосов ЖРД.

Ключевые слова: гидрогазодинамика насосов, кавитация, установка для измерения.

В наше время к проектированию и производству ракетных двигателей предъявляются все большие требования не только к энергоэффективности, но и требования по обеспечению высокой надежности и безотказной, стабильной работе агрегатов. Жидкостный ракетный двигатель (ЖРД) по сравнению с другими видами тепловых двигателей имеют наилучшие удельные показатели по преобразуемой энергии, массе, размерам. В части проектирования агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей, особое внимание уделяется обеспечению устойчивого безкавитационного режима работы агрегата. Кавитацией называют частный случай кипения жидкости (фазовый переход жидкости в газ внутри жидкости при определенной температуре и давлении), которое возникает в движущейся жидкости вследствие местного понижения давления до давления, насыщенного пара [1]. В гидродинамике машин кавитация играет особую и отрицательную роль, так как вызывает нарушение сплошности среды. Возникновение и развитие кавитации в жидкости связывают наличием в жидкости, вследствие испытываемой ей значительных растягивающих напряжений, так называемых ядер кавитации. В технических жидкостях всегда имеются ядра кавитации. В насосах понижение давления внутри проточной части связано с обтеканием профилей лопаток, где, как и при обтекании любого профиля, образуется полость пониженного давления у входа с задней (нерабочей) стороны. Область минимального давления является областью зарождения кавитации. Чем большую скорость имеет поток, обтекающий лопатку, тем больше будет разрежение на лопатке. Поэтому наиболее отдаленная от оси вращения точка входной кромки лопатки может явиться центром зарождения кавитации. Неравномерное поле абсолютных скоростей при подходе жидкости к лопатке также приводит к дополнительному падению давлений (в той струйке, где имеет место наибольшая скорость потока). В ракетном двигателе, во время работы, кавитация появляется на входе в насос и приводит к трем основным отрицательным последствиям:

а) к срыву режимы работы машины, т. е. к резкому снижению основных выходных параметров – напора, расхода и КПД.

б) к эрозийному разрушению (схлопывание пузырьков кавитации пара в районе лопаток, сопровождаемое сильными ударами, способствует разрешению лопаток) рабочего колеса машины – обычно при длительной работе на кавитационном режиме.

в) к возможности неустойчивой работы (низкочастотные автоколебания) [2].

Воспроизведение кавитации в лабораторных условиях представляло интерес не только исследования гидродинамических явлений, но и кавитационной эрозии.

Как в ходе конструкторских работ, так и во время производства агрегатов жидкостных ракетных двигателей, насосный агрегат подвергается испытанию на подтверждение антикавитационных качеств насосов. В общей гидродинамике существуют несколько методов обнаружения кавитации и определения места кавитации можно разделить на следующие [3].

1. Косвенное обнаружение кавитации по ее влиянию на характеристики элемента конструкции (энергетический метод).

2. Косвенное обнаружение кавитации по ее влиянию на распределение давлений, измеряемое вдоль границы, на которой она происходит.

3. Косвенное обнаружение кавитации по кавитационному шуму.

4. Косвенное обнаружение кавитации по рассеянному свету лазерного луча, воспринимаемому фотоэлементом.

5. Непосредственное наблюдение кавитации визуальным методом или при помощи фотографирования.

Первый метод ограничен, поскольку он не дает никакой информации о характере самого гидродинамического явления, однако является основным при регистрации кавитации в насосах ввиду фиксированного внутреннего объема испытываемого изделия. Второй метод дает информацию о местоположении зоны кавитации, а также о силах и моментах, возникающих при взаимодействии жидкости с твердыми стенками, однако возможность установки датчиков в область входа в насос затруднена. Данные методы позволяют обнаружить только достаточно развитую кавитацию значительно позднее стадии ее возникновения [3].

Остальные методы обеспечивают наилучшие возможности для исследования условий возникновения кавитации. Особенно полезны акустические измерения, поскольку они очень чувствительны даже к незначительной кавитации, которую невозможно наблюдать даже лучшими оптическими приборами. Кроме того, применение направленных акустических датчиков позволяет определить местоположение источника шума. Четвертый метод также позволяет обнаружить присутствие чрезмерно мелких каверн. Пятый метод с использованием фотографии представляет единственную возможность проведения подробных исследований гидродинамических явлений в стадиях возникновения и последующего развития кавитации [3]. Однако последние два варианта тяжело применимы в части исследования кавитации на телах в потоке, гребных винтах, турбинах и других устройствах работающих в открытом потоке воды.

Виброакустический метод предусматривает измерение интенсивности звуковых колебаний или уровня кавитационного шума, зависящего от степени развития кавитации. Основными регистрирующими приборами предлагается использовать гидрофоны обычного мембранного типа или с пьезокерамическими элементами, преобразующими звуковые колебания в электрические сигналы. Обнаружение происходит путем регистрации на приёмнике энергетического значения уровня сигнала, подаваемого с возбуждающего генератора на акустический излучатель. Кавитационный процесс сопровождается появлением в спектре акустического сигнала, кроме первой гармоники основной частоты излучения еще и высокочастотных составляющих. Существуют даже патенты в которых совершенствуют точность обнаружения кавитации, путем увеличения энергии возбуждающего генератора с равным ее приращением энергии, сравнивают с приращением по времени энергии акустического сигнала первой гармоники основной частоты на излучателе с соответствующим приращением энергии акустического сигнала той же гармоники на выходе приемника и по моменту уменьшения приращения энергии акустического сигнала [4]. Однако даже данный метод имеет погрешность 1–2 %, что является высоким показателем в сравнении с энергетическим методом регистрации кавитации, что делает невозможным его применение на данный момент.

Таким образом, рассмотренный альтернативный метод на данный момент имеет недостатки в виде сравнительно высокой погрешности измерения.

Библиографические ссылки

1. Основы гидравлики и аэродинамики : учебник / В. И. Калицун, Е. В. Дроздов, А. С. Комаров. К. И. Чижик. М. : Стройиздат, 2001. 296 с.
2. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей : учебник для студ. вузов по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин. В. А. Володин и др. ; под общ. ред. Г. Г. Гахуна. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.
3. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М. : Мир, 1974. 687 с.
4. Патент SU 804873 [Электронный ресурс]. URL: <http://patents.su/2-804873-sposob-obnaruzheniya-kavitacii.html> (дата обращения: 10.01.2020).

© Торгашин А. С., Бегишев А. М.,
Власенко А. В., Клешнина И. А., 2020