

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 681.269

doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-71-82

## Автоматизированные средства контроля сборочных операций космических аппаратов на основе системы тензометрических датчиков\*

Я.Ю. Пикалов, М.В. Брунгардт, Е.А. Спири́н

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

## Automated means to control the spacecraft assembly operations based on a strain-gauge sensor systems

Y.Y. Pikalov, M.V. Brungardt, E.A. Spirin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

К качеству изготовления космических аппаратов предъявляются повышенные требования. Отклонения характеристик космического аппарата от расчетных вследствие неточностей изготовления деталей или их сборки оказывает критическое влияние на его работоспособность. Одним из показателей качества технологического процесса сборки является точность позиционирования деталей собираемого изделия. Рассмотрена схема весоизмерительной установки для контроля положения точек центра тяжести деталей в процессе сборки. Предложена методика такого контроля, основанная на использовании системы тензометрических датчиков. Выполнен анализ выборочных данных сигналов аналоговых тензометрических датчиков в составе весоизмерительной платформы. Проверены гипотезы о виде закона распределения и значимости коэффициентов корреляции. По результатам проверки таких гипотез можно судить о качестве конструкции весоизмерительной установки. Обработаны результаты натурального эксперимента, подтверждающие работоспособность методики. Проверена значимость различия теоретических и экспериментальных данных. Дана оценка доверительным интервалам координат точки центра тяжести объекта сборки.

**Ключевые слова:** автоматизированные средства контроля, тензометрические датчики, центр тяжести, анализ выборочных данных, сборка космических аппаратов

Increased requirements are being submitted to quality in spacecraft manufacture. Deviations in the spacecraft characteristics from those calculated due to inaccuracies in parts manufacture or their assembly are critically impacting its performance. Precision in positioning the assembled product components is one of the quality indicators in the assembly process. The paper considers a diagram of a weighing installation to control position of the

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Договор № FEFE-2020-0017).

center of gravity points of components during the assembly process. A technique for such control is proposed based on introduction of the strain-gauge sensor system. Sample data from the analog strain-gauge signals were analyzed as part of the weighing platform. Hypotheses were tested on the form of the distribution law and significance of the correlation coefficients. Based on the results of testing such hypotheses, quality of the weighing installation design could be assessed. Results of the full-scale experiment were processed, and they confirmed the technique efficiency. Significance of difference between theoretical and experimental data was tested. Confidence intervals of the coordinates of the center of gravity point of the assembly object were estimated.

**Keywords:** automated control means, strain gauges, center of gravity, analysis of sample data, assembly of spacecraft

При проектировании автоматизированных процессов сборки механических систем сложных структур и конфигураций, какими являются космические аппараты, возникает задача контроля положения центра тяжести (ЦТ) системы тел. Такой контроль необходим для проверки последовательности операций технологического процесса сборки. Подобные задачи встречаются в различных областях техники [1–5].

Добавляя к сборке новый элемент с известными координатами его точки ЦТ и массой, можно аналитически вычислить координаты точки ЦТ новой системы тел. Реальное положение точки ЦТ определяют методом взвешивания. Этот метод широко применяют для взвешивания автомобильной техники [2–4], летательных аппаратов [6] и другого транспортного оборудования, а также в сельском хозяйстве [7, 8], медицине [9, 10] и машиностроении [11, 12].

Особую важность контроль качества сборочных операций приобретает в аэрокосмической отрасли, в том числе при сборке малого космического аппарата. На его динамические и прочностные характеристики существенно

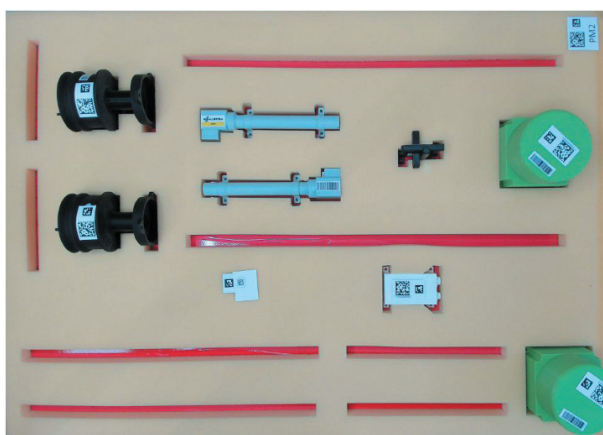
влияют даже относительно малые отклонения от формы и размеров деталей и узлов [13–15].

Помимо погрешностей изготовления, на массогабаритные характеристики космического аппарата оказывают влияние погрешности позиционирования элементов при сборочных операциях. Для минимизации последних предлагается использовать метод взвешивания на всех этапах технологического процесса сборки.

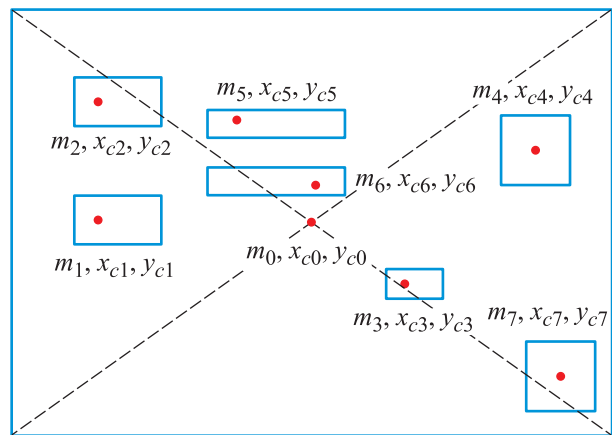
Обычно этот метод реализуют с помощью платформенных весов, имеющих четыре опоры, которые связаны либо со штоками гидроцилиндров и датчиками давления, либо с тензотрическими датчиками (ТД). Весовая платформа на четырех опорах имеет некоторые недостатки, например, неравномерность распределения сил между ними. На это указывают как разработчики, так и пользователи.

Цель статьи — разработка методов контроля сборочных операций, которые дополняют автоматизированную систему контроля, основанную на системе технического зрения.

Разработка включает в себя также формализацию и оценку критериев качества конструкции весоизмерительной платформы (ВИП).



а



б

Рис. 1. Внешний вид (а) и модель (б) ВИП с деталями

Предлагается контролировать реальное положение ЦТ с помощью системы взвешивания, состоящей из платформы, опирающейся на четыре аналоговых ТД.

**Постановка задачи.** Решим плоскую задачу для платформы, на которой, согласно директивному технологическому процессу, закреплены  $k$  деталей (рис. 1). Последовательность крепления деталей известна, как и координаты их точек ЦТ  $x_{ci}$  и  $y_{ci}$  ( $i = 0, 1, \dots, k$ ), а также массы деталей  $m_i$ . Пустая платформа имеет координаты точки ЦТ  $x_0, y_0$  и массу  $m_0$ .

Платформа опирается на четыре ТД. В каждой опоре возникает сила реакции. Декартова система координат  $XOY$  поставлена в соответствие ВИП таким образом, чтобы ее оси проходили через точки приложения реакций в ТД (рис. 2). Все координаты точек отсчитываются в этой системе координат. Платформа имеет вполне определенную конструкцию, т. е. известны расстояния между датчиками  $w$  и  $h$  вдоль каждой из осей.

Введем следующие обозначения:  $M_n$  — масса системы тел после нагружения платформы деталью на шаге  $n$ ,

$$M_n = \sum_{i=0}^n m_i;$$

$X_{cn}$  и  $Y_{cn}$  — функции координат точки ЦТ системы тел после нагружения платформы деталью на шаге  $n$ , выраженные через координаты точки ЦТ системы тел до нагружения текущей деталью, массу системы тел до нагружения и координаты точки ЦТ текущей детали;  $\bar{X}_{cn}$  и  $\bar{Y}_{cn}$  — функции координат точки ЦТ, выраженные через показания ТД.

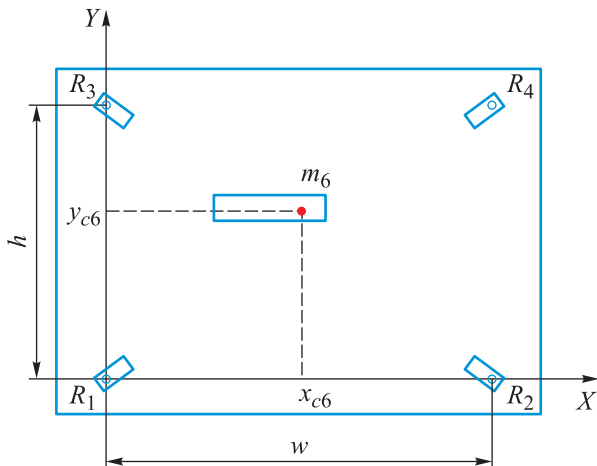


Рис. 2. Система координат, связанная с ТД

Относительные ошибки позиционирования  $E_{xn}$  и  $E_{yn}$  вдоль осей  $X$  и  $Y$  соответственно имеют вид

$$E_{xn} = \frac{\bar{X}_{cn} - X_{cn}}{X_{cn}} \cdot 100\%; \quad E_{yn} = \frac{\bar{Y}_{cn} - Y_{cn}}{Y_{cn}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Условия выполнения операции позиционирования текущей детали

$$E_{xn} \leq \varepsilon_x; \quad E_{yn} \leq \varepsilon_y,$$

где  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  — заранее известные значения допускаемой ошибки позиционирования деталей.

**Метод решения задачи.** В выражение (1) входят две пары величин. Пара  $X_{cn}$  и  $Y_{cn}$  — аналитическая оценка координат точки ЦТ нагруженной платформы, пара  $\bar{X}_{cn}$  и  $\bar{Y}_{cn}$  — оценка координат той же точки, выраженная через показания ТД.

Аналитически координаты оценивают как координаты точки ЦТ системы тел с применением понятия о центре параллельных сил. Рассматривая последовательное нагружение платформы деталями в соответствии с технологическим процессом сборки, после арифметических преобразований получаем следующие выражения для координат точки ЦТ системы тел на шаге  $n$ :

$$X_{cn} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i x_i}{\sum_{i=0}^n m_i}; \quad Y_{cn} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i y_i}{\sum_{i=0}^n m_i}. \quad (2)$$

Для восстановления функций координат  $\bar{X}_{cn}$  и  $\bar{Y}_{cn}$ , выраженных через показания ТД, записываются уравнения статического равновесия ВИП относительно осей системы координат, связанной с ТД.

Пусть ВИП нагружена набором деталей. Равнодействующую силу тяжести такой системы тел считаем приложенной в точке с координатами  $\bar{X}_{cn}$  и  $\bar{Y}_{cn}$ . Функцию координаты  $\bar{Y}_{cn}$  будем определять из суммы моментов всех сил относительно оси  $X$ , функцию координаты  $\bar{X}_{cn}$  — из суммы моментов всех сил относительно оси  $Y$ . Предполагаем, что ТД откалиброваны грузом известной массы и имеют показания в граммах,

$$S_j = \frac{R_j}{g}, \quad j = 1 \dots 4,$$

где  $j$  — номер датчика;  $R_j$  — сила реакции в  $j$ -м ТД;  $g$  — ускорение свободного падения.

Тогда можно записать

$$\bar{X}_c = \frac{(S_2 + S_4)w}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}; \quad \bar{Y}_c = \frac{(S_3 + S_4)h}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}. \quad (3)$$

После подстановки выражений (2) и (3) в формулу (1) выражения для относительной ошибки позиционирования на шаге  $n$  вдоль осей системы координат, связанной с ВИП, приобретают вид

$$E_{xn} = \left[ \frac{(S_2 + S_4)M_n w}{(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)(M_{n-1}X_{n-1} + m_n x_n)} - 1 \right] \cdot 100 \%;$$

$$E_{yn} = \left[ \frac{(S_3 + S_4)M_n h}{(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)(M_{n-1}Y_{n-1} + m_n y_n)} - 1 \right] \cdot 100 \%.$$

Показания ТД представляют собой случайные величины, под величинами  $S_j$  подразумеваются некоторые средние выборочные значения.

**Экспериментальная установка.** Экспериментальный весоизмерительный стенд смонтирован на неподвижном основании, на которое через проставки установлены четыре балочных ТД с регулируемыми по высоте опорами. На них опирается ВИП, где в определенной последовательности размещены грузы массами  $m_1, m_2, \dots, m_k$ .

На рабочих поверхностях балочных ТД наклеены четыре тензорезистора, соединенные по мостовой схеме. Постановка груза на ВИП вызывает деформацию ТД и изменение сопротивления тензорезисторов, сигнал с которых через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) НХ711 поступает на микроконтроллер Arduino Uno и выводится на экран компьютера.

При сборке измерительного стенда необходимо установить высоту опор так, чтобы ВИП имела контакт со всеми опорами. Контроль положения ВИП на ТД выполняют без грузов. Необходимо добиться наиболее равномерных значений реакций всех опор.

Известные конструкции весовых платформ выполнены с упругими опорами. Для уменьшения погрешностей, связанных с неплоскостностью опорных поверхностей, дополнительно используют шаровые опоры. Исследованы два вида опор — с точечным контактом (рис. 3, а) и упругим элементом (рис. 3, б).

Опора с точечным контактом имеет пять степеней подвижности. На ТД передается толь-

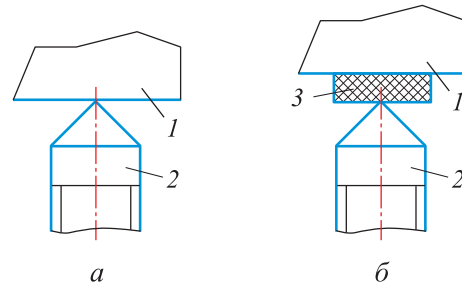


Рис. 3. Схемы опор ТД с точечным контактом (а) и упругим элементом (б):

1 — ВИП; 2 — металлическая регулируемая опора; 3 — упругий элемент

ко одна вертикальная сила реакции. Опора с упругим элементом также будет иметь пять степеней подвижности, если пренебречь незначительными силами трения в упругом контакте конуса металлической опоры и упругого элемента. Силы трения и их влияние можно уменьшить, применяя антифрикционные покрытия или смазочные материалы.

**Обработка результатов эксперимента.** Порядок проведения эксперимента следующий. На ТД до их включения устанавливают плиту, моделирующую постоянную часть ВИП. После включения системы измерения снимают показания ТД, соответствующие «нулю» системы взвешиваемых тел. На этой плите монтируют платформу с ложеентами для более точной установки грузов (рис. 4), моделирующую подвижное основание собираемого изделия, на котором в процессе сборки закрепляют детали.

Снимают показания ТД, соответствующие взвешиванию пустой платформы. Грузы предварительно взвешивают. Определяют координаты центров ложементов платформы в системе координат, связанной с ТД.

Последовательно в первый, третий и четвертый слоты платформы с ложеентами устанавливают грузы известной массы. Точки ЦТ грузов совпадают с точками центров соответствующих слотов, координаты которых известны. После установки каждого груза снимают показания ТД, по которым оценивают реальное положение точки ЦТ груза и реальную массу системы взвешиваемых тел.

Показания ТД представляют собой случайную величину. Ожидается, что после преобразования в АЦП, выходной сигнал, состоящий из реального сигнала с ТД и шумов, будет иметь нормальное распределение. Выборка данных размера  $N$  — набор  $N$  последовательных сигнала-

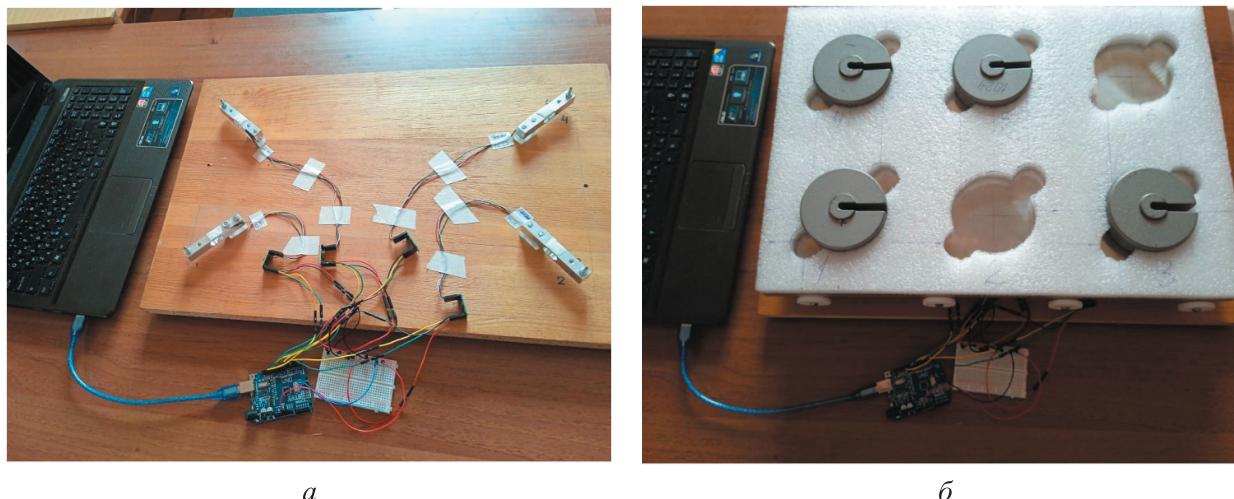


Рис. 4. Внешний вид ВИП до (а) и после (б) установки на нее платформы с ложементами и грузами

лов с АЦП. Каждый элемент выборки представляет собой случайный вектор  $\mathbf{V} = [S_1, S_2, S_3, S_4]$ , элементами которого являются сигналы с ТД. В качестве оценок качества конструкции ВИП предлагается использовать вид законов распределения показаний ТД и их попарные коэффициенты корреляции. Эти оценки отражают качество установки в целом, включая в себя конструкционные и схмотехнические компоненты качества стенда.

Анализ выборочных данных включает в себя следующие шаги:

- 1) группировку данных по интервалам постоянной ширины и построение гистограммы;
- 2) проверку гипотезы о виде закона распределения с помощью критерия Пирсона;
- 3) проверку коллинеарности параметров случайного вектора;
- 4) определение значимости коэффициентов корреляции;
- 5) поиск выбросов в выборочных данных методом оценки границ расположения значений случайной величины через межквартильное расстояние;
- 6) оценку того, насколько сильно кандидат на выброс влияет на характеристики выборки, для очищенных данных, заключающаяся в повороте пунктов 1–4.

Показания ТД случайны, следовательно, и рассчитываемые по формуле (3) величины являются таковыми. Теоретические значения координат точки ЦТ системы тел (2) сравнивают с выборочными средними реальных координат (3).

Для оценки значимости такого расхождения проверяют следующую статистическую гипотезу

$H_0$ : математическое ожидание массы системы взвешиваемых тел  $\mu(M_n)$  и координат ее точки ЦТ  $\mu(X_{cn})$ ,  $\mu(Y_{cn})$  равны величинам, вычисляемым по характеристикам технологического процесса сборки:

$$\mu(M_n) = \sum_{i=0}^n m_i;$$

$$\mu(X_{cn}) = \frac{\sum_{i=0}^n m_i x_i}{\sum_{i=0}^n m_i}; \quad \mu(Y_{cn}) = \frac{\sum_{i=0}^n m_i y_i}{\sum_{i=0}^n m_i}.$$

Это означает, что различие между теоретическими и реальными значениями массы и координат можно объяснить случайной вариацией и признать незначимой. Альтернативная гипотеза  $H_1$ : математическое ожидание массы системы взвешиваемых тел и координат ее точки ЦТ не равны теоретическим значениям. Наблюдаемую величину сравнивают с критическим значением критерия Стьюдента. По их соотношению делают вывод о том, нужно ли отвергнуть нулевую гипотезу.

**Результаты решения задачи.** Результаты проверки гипотезы о виде закона распределения случайных величин  $S_j$  на всех этапах нагружения приведены в табл. 1, где знак «–» означает, что наблюдаемое значение критерия больше критического, и гипотезу о нормальности распределения  $S_j$  принять нельзя, а знак «+» — что наблюдаемое значение критерия меньше критического, и гипотезу принять можно.

Здесь и далее для этапов введены следующие обозначения: УН и ПП — нагружение ВИП по-

Таблица 1

**Результаты проверки гипотезы о виде закона распределения случайных величин  $S_j$   
на всех этапах нагружения**

Этап	$S_1$		$S_2$		$S_3$		$S_4$	
	$\chi^2_{\text{набл}}$	$N(\mu, \sigma)$	$\chi^2_{\text{набл}}$	$N(\mu, \sigma)$	$\chi^2_{\text{набл}}$	$N(\mu, \sigma)$	$\chi^2_{\text{набл}}$	$N(\mu, \sigma)$
УН	9,04/134,48	-/-	71,05/39,79	-/-	77,03/40,14	-/-	26,15/86,52	-/-
ПП	43,83/37,89	-/-	39,23/260,52	-/-	47,97/75,37	-/-	43,81/6,18	-/-
С1	42,74/8,87	-/-	34,26/11,19	-/-	30,98/6,78	-/-	17,06/3,26	-/+
С3	9,05/59,02	-/-	10,48/50,21	-/-	6,20/42,87	-/-	0,91/22,77	+/-
С4	35,55/5,06	-/+	18,11/6,32	-/-	24,14/6,15	-/-	7,92/9,51	-/-

*Примечание.* В числителе дроби указаны значения для опор с точечным контактом, в знаменателе — для опор с упругим элементом.

стоянной частью стэнда (условным нулем) и пустой платформой соответственно; С1, С2 и С3 — установка груза в первый, второй и третий слот соответственно.

Критическое значение  $\chi^2_{\text{набл}}$  с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$  и количеством степеней свободы  $k = 2$  (пять интервалов группирования, два оцениваемых параметра)  $\chi^2_{0,05;2} = 5,99$ . Как следует из табл. 1, нормальное распределение на сырых данных практически никогда не встречается.

Для анализа коллинеарности компонент случайного вектора  $\mathbf{V} = (S_1, S_2, S_3, S_4)$  использованы матрицы ковариации  $\text{cov}(\mathbf{V})$  и попарных коэффициентов корреляции  $\mathbf{r}(\mathbf{V})$ . Показания датчиков ВИП связаны уравнениями статики, т. е. между компонентами существует линейная зависимость. Тогда можно ожидать высоких значений коэффициента корреляции, близких к единице. Указанные матрицы для опор с точечным контактом и упругим элементом приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты анализа коллинеарности компонент случайного вектора  $\mathbf{V}$  для исследуемых опор**

Этап	Матрица $\text{cov}(\mathbf{V})$	Матрица $\mathbf{r}(\mathbf{V})$
<i>Для опор с точечным контактом</i>		
УН	$\begin{pmatrix} 0,040 & & & & \\ -0,094 & 0,450 & & & \\ -0,101 & 0,469 & 0,498 & & \\ 0,014 & -0,037 & -0,039 & 0,014 & \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & & \\ -0,701 & 1,000 & & & \\ -0,713 & 0,991 & 1,000 & & \\ 0,590 & -0,470 & -0,478 & 1,000 & \end{pmatrix}$
ПП	$\begin{pmatrix} 0,495 & & & & \\ -0,487 & 0,497 & & & \\ -0,511 & 0,518 & 0,546 & & \\ 0,487 & -0,497 & -0,520 & 0,522 & \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & & \\ -0,983 & 1,000 & & & \\ -0,983 & 0,994 & 1,000 & & \\ 0,959 & -0,976 & -0,973 & 1,000 & \end{pmatrix}$
С1	$\begin{pmatrix} 0,534 & & & & \\ -0,511 & 0,500 & & & \\ -0,502 & 0,488 & 0,489 & & \\ 0,489 & -0,474 & -0,471 & 0,478 & \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & & \\ -0,990 & 1,000 & & & \\ -0,983 & 0,987 & 1,000 & & \\ 0,968 & -0,970 & -0,975 & 1,000 & \end{pmatrix}$
С3	$\begin{pmatrix} 5,469 & & & & \\ -5,325 & 5,229 & & & \\ -5,453 & 5,345 & 5,531 & & \\ 5,559 & -5,500 & -5,821 & 8,678 & \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & & \\ -0,996 & 1,000 & & & \\ -0,991 & 0,994 & 1,000 & & \\ 0,807 & -0,817 & -0,840 & 1,000 & \end{pmatrix}$

Окончание табл. 2

Этап	Матрица cov(V)	Матрица r(V)
<i>Для опор с точечным контактом</i>		
C4	$\begin{pmatrix} 0,218 & & & \\ -0,220 & 0,242 & & \\ -0,205 & 0,225 & 0,227 & \\ 0,223 & -0,244 & -0,236 & 0,333 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & \\ -0,957 & 1,000 & & \\ -0,922 & 0,960 & 1,000 & \\ 0,827 & -0,860 & -0,860 & 1,000 \end{pmatrix}$
<i>Для опор с упругим элементом</i>		
УН	$\begin{pmatrix} 0,133 & & & \\ -0,469 & 2,775 & & \\ -0,448 & 2,707 & 2,662 & \\ 0,254 & -1,270 & -1,260 & 0,792 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & \\ -0,772 & 1,000 & & \\ -0,752 & 0,996 & 1,000 & \\ 0,783 & -0,857 & -0,868 & 1,000 \end{pmatrix}$
ПП	$\begin{pmatrix} 0,213 & & & \\ -0,209 & 0,226 & & \\ -0,195 & 0,209 & 0,204 & \\ 1,032 & -1,011 & -1,058 & 16,723 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & \\ -0,953 & 1,000 & & \\ -0,938 & 0,975 & 1,000 & \\ 0,546 & -0,520 & -0,573 & 1,000 \end{pmatrix}$
C1	$\begin{pmatrix} 0,202 & & & \\ -0,183 & 0,170 & & \\ -0,182 & 0,168 & 0,174 & \\ 0,013 & -0,006 & -0,045 & 1,353 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & \\ -0,990 & 1,000 & & \\ -0,974 & 0,981 & 1,000 & \\ 0,024 & -0,013 & -0,092 & 1,000 \end{pmatrix}$
C3	$\begin{pmatrix} 0,135 & & & \\ -0,128 & 0,130 & & \\ -0,141 & 0,138 & 0,156 & \\ 0,167 & -0,163 & -0,184 & 0,351 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & \\ -0,964 & 1,000 & & \\ -0,972 & 0,971 & 1,000 & \\ 0,767 & -0,763 & -0,788 & 1,000 \end{pmatrix}$
C4	$\begin{pmatrix} 2,419 & & & \\ -2,318 & 2,278 & & \\ -2,345 & 2,296 & 2,383 & \\ 2,119 & -2,093 & -2,158 & 2,004 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,000 & & & \\ -0,987 & 1,000 & & \\ -0,977 & 0,986 & 1,000 & \\ 0,962 & -0,979 & -0,988 & 1,000 \end{pmatrix}$

Значимость коэффициентов попарной корреляции проверяют с помощью критерия Стьюдента с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$ . Вычисляемую  $t$ -статистику сравнивают с критическим значением  $t_{кр}(n) = 2,024$ , где  $n = N - 1$  — число степеней свободы.

Получены следующие результаты:

- для этапа УН

$$t_{набл}^I(n) = \begin{pmatrix} \text{н/о} & & & \\ -6,063 & \text{н/о} & & \\ -6,273 & 46,099 & \text{н/о} & \\ 4,500 & -3,284 & -3,355 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

$$t_{набл}^{II} = \begin{pmatrix} \text{н/о} & & & \\ -8,239 & \text{н/о} & & \\ -7,746 & 75,392 & \text{н/о} & \\ 8,544 & -11,259 & -11,833 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

- для этапа ПП

$$t_{набл}^I = \begin{pmatrix} \text{н/о} & & & \\ -32,917 & \text{н/о} & & \\ -33,159 & 55,600 & \text{н/о} & \\ 20,884 & -27,620 & -26,229 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

$$t_{\text{набл}}^{\text{II}} = \begin{pmatrix} \text{н/о} \\ -22,412 & \text{н/о} \\ -19,374 & 31,092 & \text{н/о} \\ 4,657 & -4,346 & -4,996 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

• для этапа С1

$$t_{\text{набл}}^{\text{I}} = \begin{pmatrix} \text{н/о} \\ -42,925 & \text{н/о} \\ -32,709 & 38,343 & \text{н/о} \\ 23,917 & -24,762 & -26,784 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

$$t_{\text{набл}}^{\text{II}} = \begin{pmatrix} \text{н/о} \\ -43,370 & \text{н/о} \\ -27,215 & 31,750 & \text{н/о} \\ 0,152 & -0,080 & -0,583 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

• для этапа С3

$$t_{\text{набл}}^{\text{I}}(n) = \begin{pmatrix} \text{н/о} \\ -70,042 & \text{н/о} \\ -49,032 & 58,638 & \text{н/о} \\ 8,851 & -9,167 & -10,043 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

$$t_{\text{набл}}^{\text{II}} = \begin{pmatrix} \text{н/о} \\ -22,869 & \text{н/о} \\ -26,358 & 25,499 & \text{н/о} \\ 7,555 & -7,455 & -8,102 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

• для этапа С4

$$t_{\text{набл}}^{\text{I}}(n) = \begin{pmatrix} \text{н/о} \\ -21,401 & \text{н/о} \\ -15,483 & 22,123 & \text{н/о} \\ 9,529 & -10,939 & -10,901 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

$$t_{\text{набл}}^{\text{II}} = \begin{pmatrix} \text{н/о} \\ -41,356 & \text{н/о} \\ -30,244 & 38,592 & \text{н/о} \\ 23,489 & -32,200 & -41,790 & \text{н/о} \end{pmatrix};$$

где индекс «I» соответствует опорам с точечным контактом, индекс «II» — опорам с упругим элементом; н/о — элемент не определен.

Для улучшения качества выборки выполнен поиск выбросов в данных. Верхняя и нижняя границы данных построены с помощью межквартильного расстояния — диапазона между первым и третьим квартилем, в который попа-

дает половина наблюдений. Все данные за пределами указанных границ назначались кандидатами на выброс, после удаления которых снова проводилась проверка статистической гипотезы о виде закона распределения компонент случайного вектора.

По результатам проверки гипотез на сырых и обработанных данных, можно сделать вывод, что в них содержится небольшое число незначительных выбросов, которые не оказывают влияния на закон распределения показаний ТД.

Очевидно, существуют фундаментальные причины искажения показаний ТД. К ним относятся, во-первых, конструктивные и схемотехнические причины: неточности в изготовлении и монтаже конструкции ВИП, некачественная топология печатных плат, неправильная разводка источника питания и неудачное заземление. Во-вторых, внешние воздействия: изменение температуры внешней среды и случайный нагрев АЦП, случайные вибрации и толчки.

В основной части эксперимента проводилась последовательная установка грузов на ВИП. Последовательность взвешивания, теоретические значения массы  $M$  и координаты точек приложения грузов  $X_{ci}$ ,  $Y_{ci}$  приведены в табл. 3.

Результаты взвешивания платформы и грузов на опорах с точечным контактом и с упругим элементом приведены в табл. 4, где  $m_v$  — выборочное среднее;  $\sigma_v$  — выборочное стандартное отклонение;  $\delta$  — относительное отклонение от теоретической величины;  $t_{\text{набл}}$  — наблюдаемое значение  $t$ -статистики.

Критическое значение критерия Стьюдента  $t_{\text{крит}}(n) = 1,68$ . Уровень значимости  $\alpha = 0,05$ . Таким образом, для опор с точечным контактом и упругим элементом математическое ожидание масс и координат точки ЦТ системы тел значительно отличается от теоретического. У опор с точечным контактом размах доверительных интервалов для массы и координат не превышает 0,97 г и 0,05 мм, у опор с упругим элементом — 2,15 г и 0,15 мм.

Таблица 3

Теоретические значения параметров груза

Этап	$M$ , г	$X_{ci}$ , мм	$Y_{ci}$ , мм
ПП	3115	223	114,0
С1	1026	68	31,5
С3	1024	378	31,5
С4	1022	68	196,5



Таблица 4

## Результаты взвешивания платформы и грузов на опорах с точечным контактом и упругим элементом

Характеристика	Этап			
	ПП	С1	С3	С4
<i>Для массы системы взвешивания <math>\bar{M}</math></i>				
$m_b$ , Г	$\frac{3144,53}{3144,60}$	$\frac{4171,50}{4182,52}$	$\frac{5198,05}{5197,56}$	$\frac{6213,77}{6220,93}$
$\sigma_b$	$\frac{0,202}{3,897}$	$\frac{0,196}{1,209}$	$\frac{1,605}{0,392}$	$\frac{0,327}{0,297}$
$\delta$ , %	$\frac{0,95}{0,95}$	$\frac{0,74}{1,00}$	$\frac{0,64}{0,63}$	$\frac{0,43}{0,55}$
$t_{\text{набл}}$	$\frac{926,11}{55,29}$	$\frac{983,84}{222,46}$	$\frac{136,61}{538,36}$	$\frac{543,46}{774,66}$
<i>Для координаты точки ЦТ системы взвешивания <math>\bar{X}_{ci}</math></i>				
$m_b$ , мм	$\frac{221,06}{217,85}$	$\frac{68,12}{69,06}$	$\frac{373,88}{366,17}$	$\frac{65,81}{64,37}$
$\sigma_b$	$\frac{0,015}{0,267}$	$\frac{0,013}{0,077}$	$\frac{0,077}{0,018}$	$\frac{0,014}{0,020}$
$\delta$ , %	$\frac{-0,87}{-2,31}$	$\frac{0,17}{1,56}$	$\frac{-1,09}{-3,13}$	$\frac{-3,22}{-5,34}$
$t_{\text{набл}}$	$\frac{809,08}{140,28}$	$\frac{580,05}{326,12}$	$\frac{181,02}{1963,37}$	$\frac{872,88}{1677,98}$
<i>Для координаты точки ЦТ системы взвешивания <math>\bar{Y}_{ci}</math></i>				
$m_b$ , мм	$\frac{114,24}{111,66}$	$\frac{32,24}{32,48}$	$\frac{32,56}{27,46}$	$\frac{193,56}{192,68}$
$\sigma_b$	$\frac{0,008}{0,141}$	$\frac{0,005}{0,039}$	$\frac{0,046}{0,011}$	$\frac{0,007}{0,008}$
$\delta$ , %	$\frac{0,21}{-2,05}$	$\frac{2,36}{3,10}$	$\frac{3,38}{-12,82}$	$\frac{-1,50}{-1,85}$
$t_{\text{набл}}$	$\frac{184,56}{120,88}$	$\frac{564,06}{272,27}$	$\frac{92,08}{1141,22}$	$\frac{45,96}{1986,02}$
Примечание. В числителе дроби указаны значения для опор с точечным контактом, в знаменателе — для опор с упругим элементом.				

Вариация координат точки ЦТ очень мала, особенно для координаты вдоль оси Y. Доверительные интервалы для среднего также невелики и в некоторых случаях составляют менее десятой доли миллиметра. Большие значения относительного отклонения от теоретических значений на некоторых этапах эксперимента связаны, вероятно, с неточной начальной установкой платформы и грузов относительно постоянной части ВИП, что приводит к изменению констант в математической модели параметров системы тел.

## Выводы

1. Предложены схема ВИП для контроля положения точки ЦТ системы тел на всех этапах

технологического процесса сборки и методика проведения такого контроля.

2. Проведен анализ выборочных данных сигналов ТД для опор с точечным контактом и упругим элементом. Установлено, что распределение сигналов значительно отличается от ожидаемого нормального. Приблизиться к нормальному распределению не позволяет даже предварительная обработка данных с очищением выборки от выбросов. Кроме того, не всегда наблюдается ожидаемая зависимость между показаниями ТД, что нельзя объяснить только случайными возмущениями. В то же время качество оценивания параметров системы тел находится на приемлемом уровне.

3. Разработанная методика позволяет оценивать массу и координаты точки ЦТ системы тел

на всех этапах технологического процесса сборки. Малая величина доверительных интервалов параметров технологического процесса свидетельствует о достаточно высоком качестве их оценки. Расхождение с теоретическими результатами расчета объясняется неточностью измерения начальных значений параметров для пустой платформы. Этого можно избежать, если отказаться от априорного определения начальных параметров и вычислять их только на осно-

вании показаний ТД. Имеются следующие возможности по улучшению весоизмерительной установки для повышения стабильности показаний ТД и уменьшения ошибки оценивания параметров технологического процесса: применение более быстрых АЦП, переработка конструкции с целью избавления от лишних связей в опорах датчиков, использование программного усреднения показаний ТД.

## Литература

- [1] Царик Р.С. Оценка влияния аппликаты центра тяжести контейнера на нагрузки палубного контейнерного штабеля. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*, 2021, т. 13, № 2, с. 207–221, doi: <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2021-13-2-207-221>
- [2] Малиновский М.П. Определение центра тяжести автотранспортного средства с использованием массово-габаритных характеристик его агрегатов. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*, 2020, № 4, doi: <https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/961#>
- [3] Беляев А.Н., Оробинский В.И., Тришина В.И. Аналитическое определение продольной координаты центра тяжести навесного МТА. *Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Мат. межд. науч.-практ. конф. Ч. I. Воронеж, Воронежский ГАУ*, 2018, с. 12–15.
- [4] Рыжиков В.А., Берков А.М. Автомобильные весы с уравновешенной опорной поверхностью. *Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса. Мат. V Межд. науч.-практ. конф. Т. 5. Санкт-Петербург*, 2022, Машиностроение, 2022, с. 27–28.
- [5] Mori K., Kono D., Matsubara A. A robust level error estimation method for machine tool installation. *Precis. Eng.*, 2019, vol. 58, pp. 70–76, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.04.014>
- [6] Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И. и др. Определение центра тяжести беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2022, № 5, с. 258–268, doi: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-5-258-268>
- [7] Li G., Li B., Shi Z. et al. Design and evaluation of a lighting preference test system for laying hens. *Comput. Electron. Agric.*, 2018, vol. 147, pp. 118–125, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.024>
- [8] Dong Y., Hansen H. Development and design of an affordable field scale weighing lysimeter using a microcontroller system. *Smart Agric. Technol.*, 2023, vol. 4, art. 100147, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100147>
- [9] Vandekerckhove L.M.J., Herregodts S., Saunders J.H. et al. Development and validation of a device to measure the force applied to the coxofemoral joint during stress radiography for early diagnosis of canine hip dysplasia. *Med. Eng. Phys.*, 2023, vol. 112, art. 103953, doi: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2023.103953>
- [10] Borrelli J., Komisar V., Novak A.C. et al. Extending the center of pressure to incorporate handhold forces: derivation and sample application. *J. Biomech.*, 2020, vol. 104, art. 109727, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109727>
- [11] Lapsomthop W., Wongsirirax N., Kititeerakol A. et al. Design and experimental investigation on 3- component force sensor in mini CNC milling machine. *Mater. Today: Proc.*, 2019, vol. 17–4, pp. 1931–1938, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.232>
- [12] Meymand S.Z., Ahmadian M. Design, development, and calibration of a force-moment measurement system for wheel–rail contact mechanics in roller rigs. *Measurement*, 2016, vol. 81, pp. 113–122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.012>
- [13] Михнев М.М., Кудрявцев И.В., Сильченко П.Н. Технологическая проблема изготовления протяженных волноводно-распределительных систем космических аппаратов.

*Решетневские чтения*. Т. 1. Красноярск, СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2020, с. 383–387.

- [14] Silchenko P.N., Mikhnev M.M., Kudryavtsev I.V. et al. Improvement of assembly accuracy and strength of waveguide-distributive systems of communication spacecrafts. *CriMiCo 2014*. Sevastopol, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014, pp. 645–646, doi: <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2014.6959568>
- [15] Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнев М.М. и др. Оценка влияния погрешностей изготовления на динамическое состояние волноводов космических аппаратов связи. *Безопасность и живучесть технических систем. Труды IV Всерос. конф.* Т. 2. Красноярск, ИФ СО РАН, 2012, с. 273–277.

## References

- [1] Tsarik R.S. Evaluation of container center of gravity height influence on deck container stack loads. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 207–221, doi: <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2021-13-2-207-221> (in Russ.).
- [2] Malinovskiy M.P. Determination of the gravity centre of a vehicle using mass and dimensional characteristics of its units. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*, 2020, no. 4, doi: <https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/961#> (in Russ.).
- [3] Belyaev A.N., Orobinskiy V.I., Trishina V.I. [Analytical determination of the longitudinal coordinate of the centre of gravity of a mounted MTA]. *Nauka i obrazovanie na sovremen-nom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya. Mat. mezhd. nauch.-prakt. konf.* Ch. I [Science and Education at the Present Stage of Development: Experience, Problems and Ways of Their Solution. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. P. 1]. Voronezh, Voronezhskiy GAU, 2018, pp. 12–15. (In Russ.).
- [4] Ryzhikov V.A., Berkov A.M. [Vehicle scales with balanced base surface]. *Modernizatsiya i innovatsionnoe razvitie toplivno-energeticheskogo kompleksa. Mat. V Mezhd. nauch.-prakt. konf.* T. 5 [Modernisation and Innovative Development of the Fuel and Energy Complex. Proc. V Int. Sci.-Pract. Conf. Vol. 5]. Sankt-Petersburg, 2022, Mashinostroenie Publ., 2022, pp. 27–28. (In Russ.).
- [5] Mori K., Kono D., Matsubara A. A robust level error estimation method for machine tool installation. *Precis. Eng.*, 2019, vol. 58, pp. 70–76, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.04.014>
- [6] Nabiev R.N., Abdullaev A.A., Garaev G.I. et al. Determination of the center of gravity of an unmanned aerial vehicle of a tiltrotor type. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2022, no. 5, pp. 258–268, doi: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-5-258-268> (in Russ.).
- [7] Li G., Li B., Shi Z. et al. Design and evaluation of a lighting preference test system for laying hens. *Comput. Electron. Agric.*, 2018, vol. 147, pp. 118–125, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.024>
- [8] Dong Y., Hansen H. Development and design of an affordable field scale weighing lysimeter using a microcontroller system. *Smart Agric. Technol.*, 2023, vol. 4, art. 100147, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100147>
- [9] Vandekerckhove L.M.J., Herregodts S., Saunders J.H. et al. Development and validation of a device to measure the force applied to the coxofemoral joint during stress radiography for early diagnosis of canine hip dysplasia. *Med. Eng. Phys.*, 2023, vol. 112, art. 103953, doi: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2023.103953>
- [10] Borrelli J., Komisar V., Novak A.C. et al. Extending the center of pressure to incorporate handhold forces: derivation and sample application. *J. Biomech.*, 2020, vol. 104, art. 109727, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109727>
- [11] Lapsomthop W., Wongsirirax N., Kititeerakol A. et al. Design and experimental investigation on 3- component force sensor in mini CNC milling machine. *Mater. Today: Proc.*, 2019, vol. 17–4, pp. 1931–1938, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.232>
- [12] Meymand S.Z., Ahmadian M. Design, development, and calibration of a force-moment measurement system for wheel–rail contact mechanics in roller rigs. *Measurement*, 2016, vol. 81, pp. 113–122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.012>

- [13] Mikhnev M.M., Kudryavtsev I.V., Silchenko P.N. [Technological issue of manufacturing extended waveguide distribution systems for spacecraft]. *Reshetnevskie chteniya*. T. 1 [Reshetnev Readings. Vol. 1]. Krasnoyarsk, SibGU im. akademika M.F. Reshetneva Publ., 2020, pp. 383–387. (In Russ.).
- [14] Silchenko P.N., Mikhnev M.M., Kudryavtsev I.V. et al. Improvement of assembly accuracy and strength of waveguide-distributive systems of communication spacecrafts. *CriMiCo 2014*. Sevastopol, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014, pp. 645–646, doi: <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2014.6959568>
- [15] Silchenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M. et al. [Estimation of influence of manufacturing errors on dynamic state of waveguides of space communication vehicles]. *Bezopasnost i zhivuchest tekhnicheskikh sistem. Trudy IV Vseros. konf.* Vol. 2 [Safety and survivability of technical systems. Proc. IV Russ. Conf. Vol. 2]. Krasnoyarsk, IF SO RAN Publ., 2012, pp. 273–277. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 04.10.2022

## Информация об авторах

**ПИКАЛОВ Яков Юрьевич** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические системы». Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, Российская Федерация, пр-т им. газеты Красноярский рабочий, д. 31, e-mail: yapibest@mail.ru).

**БРУНГАРДТ Максим Валерьевич** — кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические системы». Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, Российская Федерация, пр-т им. газеты Красноярский рабочий, д. 31, e-mail: maxbrung@gmail.com).

**СПИРИН Евгений Анатольевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические системы». Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, Российская Федерация, пр-т им. газеты Красноярский рабочий, д. 31, e-mail: spirin-evgeniy@yandex.ru).

## Information about the author

**PIKALOV Yakov Yurievich** — Candidate of Science (Eng.), Leading Researcher, Robotic Systems Scientific Research Laboratory. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (660037, Krasnoyarsk, Russian Federation, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Bldg. 31, e-mail: yapibest@mail.ru).

**BRUNGARDT Maksim Valerievich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Researcher, Robotic Systems Scientific Research Laboratory. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (660037, Krasnoyarsk, Russian Federation, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Bldg. 31, e-mail: maxbrung@gmail.com).

**SPIRIN Evgeniy Anatolyevich** — Candidate of Science (Eng.), Leading Researcher, Robotic Systems Scientific Research Laboratory. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (660037, Krasnoyarsk, Russian Federation, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Bldg. 31, e-mail: spirin-evgeniy@yandex.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пикалов Я.Ю., Брунгардт М.В., Спиринов Е.А. Автоматизированные средства контроля сборочных операций космических аппаратов на основе системы тензометрических датчиков. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 11, с. 71–82, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-71-82

### Please cite this article in English as:

Pikalov Y.Y., Brungardt M.V., Spirin E.A. Automated means to control the spacecraft assembly operations based on a strain-gauge sensor systems. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 11, pp. 71–82, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-71-82