



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2022 №2



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2022 № 2 февраль

Ежемесячный
научно-технический
журнал

Основан в 1939 г.

С 1958 г. переводится
на английский язык
под названием
«Measurement Techniques»
издательством
Springer Nature
www.springer.com/11018

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д. И. Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических и
радиотехнических измерений»

ФГБУ «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

МОО «Метрологическая академия»

СОДЕРЖАНИЕ

■ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- А. В. Лапко, В. А. Лапко.** Нетрадиционная методика выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической регрессии 3
- М. В. Мостовской.** Регулируемый электропривод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схематехнического моделирования 8

■ ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- О. В. Захаров, К. Г. Пугин.** Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения 14

■ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

- В. Ф. Фатеев, Ф. Р. Смирнов, С. С. Донченко.** Измерение эффекта гравитационного замедления времени дуплексным наземным квантовым нивелиром 22

■ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- С. В. Медведевских, К. В. Чекирда.** Исследование макета ватт-весов с верхним пределом измерений 10 грамм 28
- Л. А. Трибушевская, Ю. Р. Шимолин.** Первичная референтная методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки 34
- В. С. Волобуев, А. Р. Горбушин, В. А. Завьялов.** Верификация метода оценки систематических погрешностей стенда для калибровки шестикомпонентных тензометрических весов 44

■ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

- В. Н. Крутиков, В. В. Окрепилов.** Метрология денег 2.0 51

■ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Л. А. Назаренко, П. И. Неежмаков, Р. В. Пушин, С. В. Филь.** Температурная шкала в диапазоне 692,67–1234,93 К: построение по инфракрасному излучению 61

■ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Д. В. Хаблов.** Система управления беспилотными транспортными электрокарами на основе радиоволновых доплеровских датчиков 66



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ

ТЕХНИКА

Izmeritel'naya Tekhnika

Главный редактор

В. Н. Крутиков

Редакционная коллегия:

И. В. Емельянова

(зам. гл. редактора)

В. И. Белоцерковский

С. И. Донченко

Л. К. Исаев

А. Д. Козлов

Е. П. Кривцов

А. Ю. Кузин

С. В. Медведевских

В. В. Окрепилов

В. Н. Храменков

И. А. Шайко

В. В. Швыдун

Научные редакторы Грачева И. Л., Федяева М. В.
Корректор Бучная М. В.
Иллюстрации Бабаев И. Н.
Компьютерная верстка Номт С. А.
Реклама, распространение и подписка Керсова Л. А.
Тел.: +7(495)430-28-02, kersova@vniims.ru

Сдано в набор: 25.01.2022.
Подписано в печать: 28.02.2022.
Формат 60х90 1/8. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 200 экз. Зак. 22-286.
Свободная цена.
Отпечатано в ООО «Типография «Миттель Пресс»,
127254, Москва, ул. Руставели, 14, с. 6, оф. 7.

Издание зарегистрировано Роскомнадзором
Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-21572
от 15.07.2005.

Издатель: ФГБУ «ВНИИМС».
Адрес редакции и издателя: 119361, Москва,
ул. Озёрная, 46, ФГБУ «ВНИИМС».
Тел.: +7(495)781-48-70
E-mail: izmt@vniims.ru
Сайт: www.izmt.ru

Редакция не несёт ответственности за содержание
рекламных материалов.
Точка зрения редакции может не совпадать с позицией
авторов.
Полное или частичное воспроизведение материалов
допускается с письменного разрешения редакции.
При перепечатке материалов ссылка на журнал
«Измерительная техника» обязательна.
Все поступившие в редакцию материалы подлежат
рецензированию.
Материалы, переданные в редакцию, не возвращаются.
Требования к оформлению статей размещены на сайте
www.izmt.ru
Знаком информационной продукции не маркируется.

CONTENTS

■ GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

- A. V. Lapko, V. A. Lapko. An unconventional method for selecting the blur coefficients of kernel functions in nonparametric regression 3
- M. V. Mostovskoy. Adjustable electric drive for laser technological installations: assessment of metrological characteristics by the method of circuit simulation 8

■ LINEAR AND ANGULAR MEASUREMENTS

- O. V. Zakharov, K. G. Pugin. The choice of reference circles when analysis the roundness of parts for ball bearings 14

■ TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

- V. F. Fateev, F. R. Smirnov, S. S. Donchenko. Measuring the effect of gravitational time dilation in a duplex ground-based quantum level 22

■ MECHANICAL MEASUREMENTS

- S. V. Medvedevskikh, K. V. Chekirda. Research on a watt-weights scales layout with an upper measurement limit of 10 grams 28
- L. A. Tribushevskaya, Yu. R. Shimolin. Primary reference methodology (method) of measurements the surface deformation of an elastically deformed beam 34
- V. S. Volobuev, A. R. Gorbushin, V. A. Zavyalov. Verification of the method for assessing systematic errors of the balance calibration machine 44

■ ECONOMIC PROBLEMS OF METROLOGY

- V. N. Krutikov, V. V. Okrepilov. Money Metrology 2.0 51

■ TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

- L. A. Nazarenko, P. I. Neyezmakov, R. V. Pushchin, S. V. Fil. Temperature scale in the range from 692.67 K to 1234.93 K: construction by infrared radiation 61

■ RADIO MEASUREMENTS

- D. V. Khablov. Control system for unmanned transport electric vehicles based on microwave Doppler sensors 66

Научная статья

УДК 519.7

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-3-7>

Нетрадиционная методика выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической регрессии

Александр Васильевич Лапко^{1✉}, Василий Александрович Лапко²

^{1, 2} Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН, Красноярск, Россия

^{1, 2} Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

¹lapko@icm.krasn.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0664-3870>

²valapko@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6938-9323>

Аннотация. Традиционная методика выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической регрессии основана на минимизации средней квадратической ошибки аппроксимации искомой зависимости по исходным статистическим данным. С увеличением объёма обучающей выборки значений переменных восстанавливаемой зависимости вычислительные затраты при оптимизации непараметрической регрессии значительно увеличиваются. Предложена нетрадиционная методика выбора коэффициентов размытости непараметрической регрессии, оптимальных для ядерных плотностей вероятностей переменных восстанавливаемой зависимости. В качестве критерия оптимальности при выборе коэффициентов размытости ядерных плотностей вероятностей использованы статистические оценки средних квадратических отклонений совместной плотности вероятности переменных восстанавливаемой зависимости. Предложенная методика позволила избежать вычислений ошибки аппроксимации восстанавливаемой зависимости непараметрической регрессией, что подтверждено результатами вычислительных экспериментов. Полученные результаты позволяют использовать методику быстрой оптимизации ядерных оценок плотностей вероятностей при синтезе непараметрической регрессии.

Ключевые слова: непараметрическая регрессия, ядерные оценки плотности вероятности, коэффициенты размытости ядерных функций, быстрые алгоритмы оптимизации

Для цитирования: Лапко А. В., Лапко В. А. Нетрадиционная методика выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической регрессии // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-3-7>

An unconventional method for selecting the blur coefficients of kernel functions in nonparametric regression

Aleksandr V. Lapko^{1✉}, Vasiliy A. Lapko²

^{1, 2} Institute of Computational Modelling, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

^{1, 2} Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

¹lapko@icm.krasn.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0664-3870>

²valapko@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6938-9323>

Abstract. The traditional method for selecting the blur coefficients of kernel functions in nonparametric regression is based on minimizing the root mean square error in the approximation of the desired dependence from the initial statistical data. With an increase in the volume of the training sample of the values of the variables of the restored dependence, the computational costs of optimizing nonparametric regression increase significantly. An unconventional method for selecting the nonparametric regression blurriness coefficients optimal for the kernel probability densities of the variables of the recovered dependence is proposed. Statistical estimates of the mean square deviations of the joint probability density of the variables of the restored dependence were used as an optimality criterion for selecting the blur coefficients of kernel probability densities. The proposed technique made it possible to avoid calculating the approximation error of the restored dependence by nonparametric regression, which is confirmed by the results of computational experiments. The results obtained make it possible to use the method of fast optimization of kernel estimates of probability densities in the synthesis of nonparametric regression.

Keywords: nonparametric regression, kernel probability density estimates, blur coefficients of kernel functions, fast optimization algorithms

Введение. Вычислительная эффективность непараметрических алгоритмов обработки информации, основанных

на ядерных оценках плотности вероятности типа Розенблатта-Парзена, во многом определяется объёмом статистических

данных и снижается по мере его увеличения. Поэтому в условиях выборок большого объема появляются трудности синтеза непараметрических моделей и алгоритмов принятия решений. Для исключения возникающих трудностей используются принципы декомпозиции исходных статистических данных и технология параллельных вычислений [1, 2].

Перспективным направлением повышения вычислительной эффективности непараметрических моделей и алгоритмов принятия решений является разработка быстрых методов выбора коэффициентов размытости ядерных функций. Впервые решение данной проблемы, основанное на результатах анализа формулы оптимального коэффициента размытости ядерных функций непараметрической оценки плотности вероятности, предложено в работе [3]. Основная составляющая указанной формулы зависит от нелинейного функционала плотности вероятности, который является константой для одномодальных и симметричных плотностей вероятностей и не зависит от их параметров. Разработаны процедуры быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных оценок плотностей вероятностей для симметричных и несимметричных законов распределения случайных величин [4–10]. Получены зависимости нелинейного функционала восстанавливаемой плотности вероятности от оценок коэффициентов контрэксцесса и асимметрии анализируемых случайных величин [11]. Эти результаты обобщены при синтезе непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности в двухальтернативной задаче распознавания образов [12].

Созданы условия для развития методики быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных функций при синтезе в непараметрической регрессии. Однако для её реализации необходимо обосновать возможность замены задачи выбора коэффициентов размытости ядерных функций из условия минимума ошибки аппроксимации восстанавливаемой зависимости на определение коэффициентов размытости по результатам оптимизации непараметрических оценок плотностей вероятностей анализируемых случайных величин.

Цель работы – обосновать возможность выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической регрессии из условия минимума оценок средних квадратических ошибок аппроксимации плотностей вероятностей анализируемых случайных величин.

Непараметрическая оценка кривой регрессии. Пусть имеется выборка $V = (x^i, y^i, i = 1, n)$ статистически независимых наблюдений случайных величин (x, y) , распределённых с неизвестной плотностью вероятности $p(x, y)$. Необходимо построить непараметрическую оценку $\bar{y} = \bar{\varphi}(x)$ однозначной стохастической зависимости $y = \varphi(x)$.

Минимум байесовского удельного риска $r = \int W(y, \bar{y}) p(y/x) dy$ по $\bar{y}$ при квадратической функции потерь $W(y, \bar{y}) = (y - \bar{y})^2$ определяется условным математическим ожиданием

$$\bar{y} = \frac{1}{p(x)} \int y p(x, y) dy. \quad (1)$$

Здесь и далее бесконечные пределы интегрирования опускаются.

Плотности вероятностей $p(x, y)$, $p(x)$ в оптимальной решающей функции (1) восстановим с использованием непараметрических оценок Розенблатта-Парзена:

$$\bar{p}(x, y) = \frac{1}{nc_1c_2} \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x-x^i}{c_1}\right) \Phi\left(\frac{y-y^i}{c_2}\right); \quad (2)$$

$$\bar{p}(x) = \frac{1}{nc} \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x-x^i}{c}\right), \quad (3)$$

где c_1, c_2, c – коэффициенты размытости ядерных функций; n – объём выборки V .

Ядерные функции $\Phi(u)$ в непараметрических статистиках (2), (3) удовлетворяют условиям

$$\begin{cases} \Phi(u) = \Phi(-u); \\ 0 \leq \Phi(u) < \infty; \\ \int \Phi(u) du = 1; \\ \int u^m \Phi(u) du < \infty; \\ 0 \leq m < \infty, \end{cases}$$

где m – степень аргумента u ядерной функции $\Phi(u)$.

Подставляя в выражение (1) ядерные оценки плотностей вероятностей (2), (3) получим непараметрическую регрессию

$$\bar{y} = \bar{\varphi}(x) = \sum_{i=1}^n y^i \Phi\left(\frac{x-x^i}{c_1}\right) / \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x-x^i}{c}\right). \quad (4)$$

При выполнении данного преобразования учитывается следующее условие:

$$\frac{1}{c_2} \int y \Phi\left(\frac{y-y^i}{c_2}\right) dy = y^i,$$

где y^i – математическое ожидание y с плотностью вероятности ядерной функции $1/c_2 \Phi((y-y^i)/c_2)$.

Для выполнения условия нормированности

$$\sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x-x^i}{c_1}\right) / \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x-x^i}{c}\right) = 1$$

в непараметрической регрессии (4) необходимо принять равенство $c = c_1$. Тогда непараметрическую регрессию (4) запишем в традиционном виде [13, 14]:

$$\bar{y} = \bar{\varphi}(x) = \sum_{i=1}^n y^i \Phi\left(\frac{x-x^i}{c_1}\right) / \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x-x^i}{c_1}\right). \quad (5)$$

Коэффициенты размытости c_1 ядерной функции убывают с увеличением объёма n выборки V . Традиционный подход выбора коэффициента размытости c_1 ядерных функций в статистике (5) основан на минимизации средней квадратической ошибки аппроксимации $y = \varphi(x)$ её моделью (5):

$$\bar{W}(c_1) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [y^j - \bar{\varphi}(x^j)]^2, \quad (6)$$

где $\bar{\varphi}(x^j)$ определяется выражением (5) при условии $i \neq j$.

Определим оптимальное значение коэффициента размытости $c_1 = c'_1$ ядерных функций в статистике (5), которое в паре с коэффициентом c_2 обеспечивает минимум среднего квадратического отклонения (СКО) $\bar{p}(x, y)$ от $p(x, y)$:

$$W_2(c'_1, c_2) = \iint [\bar{p}(x, y) - p(x, y)]^2 dx dy, \quad (7)$$

где c'_1 – коэффициент размытости ядерных функций для аргумента x в непараметрической оценке $\bar{p}(x, y)$.

В работах [15–18] обоснована возможность определения оптимальных значений c'_1, c_2 путём минимизации статистической оценки критерия (7):

$$\begin{aligned} \bar{W}_2(c'_1, c_2) = & \frac{1}{n^2(c'_1)^2 c_2^2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \int \Phi\left(\frac{x-x^j}{c'_1}\right) \Phi\left(\frac{x-x^i}{c'_1}\right) dx \times \\ & \times \int \Phi\left(\frac{y-y^j}{c_2}\right) \Phi\left(\frac{y-y^i}{c_2}\right) dy - \\ & - \frac{2}{n^2 c'_1 c_2} \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \Phi\left(\frac{x^j-x^i}{c'_1}\right) \Phi\left(\frac{y^j-y^i}{c_2}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Например, при ступенчатой ядерной функции

$$\frac{1}{c'_1} \Phi\left(\frac{x-x^i}{c'_1}\right) = \begin{cases} 0,5c'_1, & \text{если } |x-x^i| < c'_1; \\ 0, & \text{если } |x-x^i| \geq c'_1, \end{cases}$$

значения составляющих критерия (8) определяются выражениями

$$\begin{aligned} \int \Phi\left(\frac{x-x^j}{c'_1}\right) \Phi\left(\frac{x-x^i}{c'_1}\right) dx &= \begin{cases} \frac{2c'_1 - |x^j - x^i|}{4}, & \text{если } |x^j - x^i| < 2c'_1; \\ 0, & \text{если } |x^j - x^i| \geq 2c'_1, \end{cases} \\ \Phi\left(\frac{x^j - x^i}{c'_1}\right) &= \begin{cases} 0,5, & \text{если } |x^j - x^i| < c'_1; \\ 0, & \text{если } |x^j - x^i| \geq c'_1. \end{cases} \end{aligned}$$

Обозначим через $\bar{c}'_1, \bar{c}_2$ оценки оптимальных коэффициентов размытости ядерных функций непараметрической статистики $\bar{p}(x, y)$, минимизирующих критерий (8).

Принятое предположение о возможности выбора коэффициента размытости ядерных функций непараметрической регрессии (5) из условия минимума критерия (8) имеет объективную основу. Действительно, если определены ядерные оценки плотностей вероятностей $\bar{p}(x, y)$, $\bar{p}(x)$ и их оптимальные коэффициенты размытости, то непараметрическая регрессия, как оценка решающей функции (1), не требует использования критерия (6) при оптимизации статистики (5).

В качестве альтернативы рассмотрим возможность выбора оптимального коэффициента размытости $\bar{c}$ в статистике (5) при минимизации оценки СКО $\bar{p}(x)$ от $p(x)$

$$\begin{aligned} \bar{W}_1(c) = & \frac{1}{n^2 c^2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \int \Phi\left(\frac{x-x^j}{c}\right) \Phi\left(\frac{x-x^i}{c}\right) dx - \\ & - \frac{2}{n^2 c} \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \Phi\left(\frac{x^j - x^i}{c}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Вычислительная эффективность выбора оптимальных коэффициентов размытости ядерных функций из условий минимума ошибки аппроксимации (6) и критериев (8), (9) соизмеримы. Однако предлагаемый подход позволяет использовать результаты быстрой оптимизации ядерных оценок плотностей вероятностей [9–12] в задаче синтеза непараметрической регрессии, что важно при обработке данных большого объёма.

Анализ результатов вычислительных экспериментов.

Для проверки возможности замены задачи оптимизации непараметрической регрессии по традиционной методике на выбор коэффициентов размытости ядерных функций из условия минимума СКО $\bar{p}(x, y)$ либо $\bar{p}(x)$ проведём серию вычислительных экспериментов.

При формировании выборки $V = (x^i, y^i, i = \overline{1, n})$ датчики случайных величин x и y определим как

$$\begin{cases} x = \varepsilon; \\ y = F(x) + \sigma \left(\sum_{j=1}^r \varepsilon_j^j - 0,5r \right) 6/\sqrt{3r}, \end{cases} \quad (10)$$

где $F(x) = 3 - x + \exp[-20(x-0,5)^2]$ – восстанавливаемая зависимость; $\varepsilon \in [0, 1]$, $\varepsilon_1 \in [0, 1]$ – значения случайных величин с равномерными законами распределения; σ – СКО помехи с гауссовской плотностью вероятности, накладываемой на $F(x)$; значение параметра $r = 12$.

Объём n исходных статистических данных выборки V при организации вычислительных экспериментов определим значениями 100, 300, 500. При синтезе непараметрической регрессии используем оптимальные ядерные функции В. А. Епанечникова [20]. При конкретном объёме V значения средних относительных ошибок аппроксимации стохастической зависимости $F(x)$ для традиционного и предложенных методов оптимизации непараметрической регрессии (5) вычислим 50 раз, результаты вычислений усредним.

Среднюю относительную ошибку аппроксимации нелинейного полинома $F(x)$ (10) непараметрической регрессией (5) при традиционном методе оптимизации обозначим как

$$\bar{W}(c_1) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\bar{p}(x^j) - F(x^j)| / F(x^j), \quad (11)$$

где $N = 10000$ – объём контрольных значений случайных величин (x, y) .

Пусть при синтезе непараметрической регрессии (5) используется коэффициент размытости $\bar{c}$, который минимизирует критерий (9). В этих условиях среднюю относительную ошибку аппроксимации $F(x)$ непараметрической регрессией типа (5) определим как $\bar{W}_1(\bar{c})$. По аналогии обозначим $\bar{W}_2(\bar{c}_1)$ – значения средней относительной ошибки аппроксимации полинома $F(x)$ статистикой (5) при значении $\bar{c}'_1$, который в паре с коэффициентом размытости $\bar{c}_2$ минимизирует критерий (8). Вычислительные эксперименты в условиях конкретных объёмов исходных данных n и СКО σ помех, накладываемых на функцию $F(x)$, проведём 50 раз. Соответствующие им значения критериев $\bar{W}(\bar{c}_1)$, $\bar{W}_1(\bar{c})$, $\bar{W}_2(\bar{c}'_1)$ типа (11) усредним.

Результаты сравнения традиционного и предложенного методов выбора коэффициентов размытости непараметрической регрессии

n	σ	Ошибки аппроксимации			Коэффициенты размытости		
		$\bar{W}(\bar{c}_1)$	$\bar{W}_1(\bar{c})$	$\bar{W}_2(\bar{c}_1)$	$\bar{c}_1$	$\bar{c}$	$\bar{c}_1$
100	0	0,0005	0,0179	0,0028	0,0100	0,08	0,0300
	0,1	0,0097	0,0183	0,0098	0,0350	0,08	0,0490
	0,2	0,0167	0,0203	0,0165	0,0472	0,08	0,0640
	0,3	0,0272	0,0260	0,0256	0,0522	0,08	0,0768
300	0	0,0003	0,0074	0,0003	0,0100	0,05	0,0100
	0,1	0,0061	0,0083	0,0057	0,0284	0,05	0,0300
	0,2	0,0107	0,0105	0,0101	0,0370	0,05	0,0402
	0,3	0,0158	0,0139	0,0141	0,0388	0,05	0,0508
500	0	0,0001	0,0048	0,0001	0,0010	0,04	0,0060
	0,1	0,0051	0,0058	0,0048	0,0248	0,04	0,0229
	0,2	0,0097	0,0085	0,0085	0,0302	0,04	0,0349
	0,3	0,0120	0,0107	0,0108	0,0358	0,04	0,0436

Полученные усреднённые значения этих критериев обозначим $\bar{W}(\bar{c}_1)$, $\bar{W}_1(\bar{c})$, $\bar{W}_2(\bar{c}_1)$ (таблица). При анализе достоверности отличия значений $\bar{W}(\bar{c}_1)$ от $\bar{W}_1(\bar{c})$ и $\bar{W}_2(\bar{c}_1)$ используем методику сравнения двух средних произвольно распределённых генеральных совокупностей с уровнем значимости 0,05 [19].

Представленные в таблице средние значения коэффициентов размытости $\bar{c}_1$, $\bar{c}$, $\bar{c}_1$ определим по результатам вычислительных экспериментов. Тёмно-серым фоном в столбцах $\bar{W}_1(\bar{c})$, $\bar{W}_2(\bar{c}_1)$ выделены элементы, количественные характеристики которых достоверно не отличаются от соответствующих значений критерия $\bar{W}(\bar{c}_1)$. Светлым фоном отмечены элементы таблицы, в которых достоверно выполняются соотношения $\bar{W}_1(\bar{c}) < \bar{W}(\bar{c}_1)$ либо $\bar{W}_2(\bar{c}_1) < \bar{W}(\bar{c}_1)$. Например, при $n=100$ и $\sigma=0,1$ значения $\bar{W}(\bar{c}_1)=0,0097$, $\bar{W}_2(\bar{c}_1)=0,0098$ являются близкими и достоверно не отличаются, что отмечено в соответствующем элементе столбца $\bar{W}_2(\bar{c}_1)$ тёмно-серым фоном. При $n=100$ и $\sigma=0,3$ значения $\bar{W}(\bar{c}_1)=0,0272$, а $\bar{W}_2(\bar{c}_1)=0,0256$ достоверно отличаются (столбец $\bar{W}_2(\bar{c}_1)$, серый фон). В этих условиях наблюдается преимущество выбора коэффициента размытости ядерных функций непараметрической регрессии (5) из условия минимума критерия (8) по сравнению с традиционной методикой. Значения параметров в столбцах $\bar{W}_1(\bar{c})$, $\bar{W}_2(\bar{c}_1)$, не выделенные цветным фоном, указывают на преимущество традиционной методики оптимизации непараметрической регрессии (5) по сравнению с предложенной методикой.

Использование методики выбора коэффициента размытости ядерных функций непараметрической регрессии (5) путём минимизации критерия (8) обеспечивает близкие значения $\bar{W}(\bar{c}_1)$ и $\bar{W}_2(\bar{c}_1)$ при $n=100$, $\sigma \in [0,1; 0,2]$ и $n=300$, $\sigma=0$. Достоверное преимущество данной методики по сравнению

с традиционной наблюдается в условиях $n=100$ и $\sigma=0,3$, $n=300$ и $\sigma \geq 0,1$, а также при $n=500$ и $\sigma \geq 0$.

Методика выбора коэффициента размытости ядерных функций в непараметрической регрессии, основанной на минимизации критерия (9), является менее эффективной. Её преимущество отмечается при условиях $n \in [100; 300]$ и $\sigma \geq 0,3$, а также при $n=500$ и $\sigma \geq 0,2$.

Близким значениям $\bar{W}(\bar{c}_1)$, $\bar{W}_1(\bar{c})$ и $\bar{W}_2(\bar{c}_1)$ соответствуют близкие значения коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической регрессии $\bar{c}_1$, $\bar{c}$ и $\bar{c}_1$.

Полученные результаты обосновывают возможность выбора коэффициента размытости ядерной функции в непараметрической регрессии из условия минимума оценки СКО непараметрической статистики $\bar{p}(x, y)$. Данный вывод создаёт основу развития методики быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных плотностей вероятностей [9–12] на решение задачи оптимизации непараметрической регрессии.

Заключение. Предложенная методика выбора коэффициентов размытости ядерных функций непараметрической регрессии из условия минимума критерия (8)

менее чувствительна к высокому уровню помех, накладываемых на значения восстанавливаемой функции, по сравнению с традиционным подходом. Вычислительная эффективность рассматриваемых методик оптимизации непараметрической регрессии сопоставима. Однако предложенная методика позволяет использовать известные быстрые процедуры выбора коэффициентов размытости в ядерной оценке совместной плотности вероятности переменных восстанавливаемой зависимости при оптимизации непараметрической регрессии.

Полученные выводы подтверждены результатами вычислительных экспериментов в принятых условиях их организации при восстановлении нелинейной зависимости. Созданы условия разработки быстрых процедур выбора коэффициентов размытости ядерных функций непараметрической регрессии.

Список литературы

1. Зеньков И. В., Лапко А. В., Лапко В. А., Им С. Т., Тубольцев В. П., Авдеев В. Л. Непараметрический алгоритм автоматической классификации многомерных статистических данных большого объёма и его применение // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 2. С. 253–260. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-801>
2. Лапко А. В., Лапко В. А. Разработка и исследование двухуровневых непараметрических систем классификации // Автометрия. 2010. Т. 46. № 1. С. 70–78.
3. Варжапетян А. Г., Михайлова Е. Ю. Методы выбора определяющих характеристик непараметрических алгоритмов идентификации моделей надёжности сложных систем по эксплуатационным данным / Вопросы кибернетики. Вып. 094. Статистические методы в теории обеспечения эксплуатации. Сборник. Под ред. С. Ф. Левина. М.: АН СССР. Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика». 1982. С. 77–87.
4. Silverman B. W., *Density estimation for statistics and data analysis*, London, Chapman and Hall, 1986, 175 p.

5. Sheather S., Jones M., *Journal of Royal Statistical Society Series B*, 1991, vol. 53, no. 3, pp. 683–690.
<https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1991.tb01857.x>
6. Sheather S. J., *Statistical Science*, 2004, vol. 19, no. 4, pp. 588–597. <https://doi.org/10.1214/088342304000000297>
7. Terrell G. R., Scott D. W., *Journal of the American Statistical Association*, 1985, vol. 80, pp. 209–214.
<https://doi.org/10.2307/2288074>
8. Jones M. C., Marron J. S., Sheather S. J., *Journal of the American Statistical Association*, 1996, vol. 91, pp. 401–407.
<https://doi.org/10.2307/2291420>
9. Scott D. W. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*, New York, Wiley, 2015, 384 p.
10. Лапко А. В., Лапко В. А. Модифицированный алгоритм быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных оценок многомерных плотностей вероятностей // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 9–13.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-9-13>
11. Лапко А. В., Лапко В. А. Оценивание нелинейного функционала от плотности вероятности при оптимизации непараметрических решающих функций // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 14–20. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-14-20>
12. Лапко А. В., Лапко В. А. Быстрый выбор коэффициентов размытости в многомерном непараметрическом алгоритме распознавания образов // Измерительная техника. 2019. № 8. С. 8–13. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-8-8-13>
13. Härdle W., *Applied Nonparametric Regression*, Cambridge University Press, 1990, 434 p.
14. Нада́рая Э. А. Непараметрические оценки кривой регрессии // Труды ВЦ АН СССР. 1965. Вып. 5. С. 56–68.
15. Rudemo M., Empirical Choice of Histograms and Kernel Density Estimators, *Scandinavian Journal of Statistics*, 1982, vol. 9, no. 2, pp. 65–78.
16. Bowman A. W., *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 1985, vol. 21, pp. 313–327.
<https://doi.org/10.1080/00949658508810822>
17. Hall P., *Annals of Statistics*, 1983, vol. 11, no. 4, pp. 1156–1174. <https://doi.org/10.1214/aos/1176346329>
18. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ методов оптимизации непараметрической оценки плотности вероятности по коэффициенту размытости ядерных функций // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 3–8.
19. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1999. 479 с.
20. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применения. 1969. Т. 14. № 1. С. 156–161.
2. Lapko A. V., Lapko V. A., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 56–63.
<https://doi.org/10.3103/S8756699010010073>
3. Varzhapetyan A. G., Mikhailova E. Yu., Metody vybora opredelyayushchikh kharakteristik neparametricheskikh algoritmov identifikatsii modelei nadezhnosti slozhnykh sistem po ekspluatatsionnym dannym, *Voprosy kibernetiki*, vol. 094, *Statisticheskie metody v teorii obespecheniya ekspluatatsii*, ed. S. F. Levin., Moscow, AN SSSR, Nauchnyi sovets po kompleksnoi probleme Kibernetika, 1982, pp. 77–87. (In Russ.)
4. Silverman B. W., *Density estimation for statistics and data analysis*, London, Chapman and Hall, 1986, 175 p.
5. Sheather S., Jones M., *Journal of Royal Statistical Society Series B*, 1991, vol. 53, no. 3, pp. 683–690.
<https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1991.tb01857.x>
6. Sheather S. J., *Statistical Science*, 2004, vol. 19, no. 4, pp. 588–597. <https://doi.org/10.1214/088342304000000297>
7. Terrell G. R., Scott D. W., *Journal of the American Statistical Association*, 1985, vol. 80, pp. 209–214.
<https://doi.org/10.2307/2288074>
8. Jones M. C., Marron J. S., Sheather S. J., *Journal of the American Statistical Association*, 1996, vol. 91, pp. 401–407.
<https://doi.org/10.2307/2291420>
9. Scott D. W. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*, New York, Wiley, 1992, 317 p.
10. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 63, no. 11, pp. 856–861.
<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01873-w>
11. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 13–20. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01889-2>
12. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 8, pp. 665–672.
<https://doi.org/10.1007/s11018-019-01676-0>
13. Härdle W., *Applied Nonparametric Regression*, Cambridge University Press, 1990, 434 p.
14. Nadaraya E. A., Neparametricheskie otsenki krivoi regressii, *Proceedings of the Computer Center of the USSR Academy of Sciences*, 1965, issue 5, pp. 56–68. (In Russ.)
15. Rudemo M., Empirical Choice of Histograms and Kernel Density Estimators, *Scandinavian Journal of Statistics*, 1982, no. 9, pp. 65–78.
16. Bowman A. W., *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 1985, vol. 21, pp. 313–327.
<https://doi.org/10.1080/00949658508810822>
17. Hall P., *Annals of Statistics*, 1983, vol. 11, no. 4, pp. 1156–1174. <https://doi.org/10.1214/aos/1176346329>
18. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 515–522. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1228-x>
19. Gmurman V. E., *Probability theory and mathematical statistics*, Moscow, Vysshaya shkola Publisher, 1999, 479 p. (In Russ.)
20. Epanechnikov V. A., *Theory of Probability & Its Applications*, 1969, vol. 14, no. 1, pp. 153–158.
<https://doi.org/10.1137/1114019>

References

Статья поступила в редакцию 20.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 11.01.2022.
The article was submitted 20.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021; accepted for publication 11.01.2022.

Научная статья

УДК 681.5.034

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13>

Регулируемый электропривод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схемотехнического моделирования

Мостовской Михаил Владимирович

МИРЭА-Российский технологический университет, Москва, Россия, mvmost@yandex.ru

Аннотация. Описано актуальное направление развития станкостроения – внедрение лазерных технологических установок. Приведены способы повышения качества операций, выполняемых на лазерных установках, например операций резки листовых материалов. Показана необходимость совершенствования метода управления регулируемым электроприводом лазерных установок. Рассмотрены особенности построения информационно-измерительных и управляющих систем электропривода. Исследована работа регулируемого электропривода на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока с оригинальной компоновкой датчиков. Методом схемотехнического моделирования численно оценены метрологические характеристики регулируемого электропривода. Достоверность полученных данных экспериментально подтверждена результатами испытаний макетного образца.

Ключевые слова: информационно-измерительные и управляющие системы, электропривод, лазерные технологические установки, бесколлекторный двигатель постоянного тока, диапазон регулирования скорости, коэффициент неравномерности вращения, схемотехническое моделирование

Для цитирования: Мостовской М. В. Регулируемый электропривод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схемотехнического моделирования // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 8–13. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13>

Adjustable electric drive for laser technological installations: assessment of metrological characteristics by the method of circuit simulation

Mostovskoy Mikhail Vladimirovich

Russian Technological University, Moscow, Russia, mvmost@yandex.ru

Abstract. In this paper describes the current direction in the development of machine tool industry – the introduction of laser technological installations. Methods are given for improving the quality of operations performed on laser machines, for example, operations for cutting sheet materials. The need to improve the method of controlling the adjustable electric drive of laser systems is shown. The features of the construction of information-measuring and control systems of the electric drive are considered. The operation of an adjustable electric drive based on a brushless DC motor with an original arrangement of sensors has been studied. The metrological characteristics of an adjustable electric drive are numerically estimated by the method of circuit simulation. The reliability of the obtained data is experimentally confirmed by the results of tests of the mock-up sample.

Keywords: control system, electric drive, laser machines, brushless dc motor, speed control range, rotation unevenness coefficient, mathematical model, circuit simulation

Введение. Станкостроение – одна из передовых отраслей промышленности, целью которой является разработка и производство промышленного оборудования широкого спектра применения. Актуальное направление развития станкостроения – внедрение технологии лазерной обработки и создание станков на её основе. Станки лазерной обработки широко используются для сварки, упрочнения, резки, маркировки, гравировки, сверления и др.

Порядка 80 % всех лазерных технологических установок (далее – лазерных установок), применяемых на производствах Европы, России и стран СНГ, выполняют операции

резки листовых материалов и крупногабаритных изделий. Технология лазерной резки заключается в расплавлении обрабатываемой поверхности сфокусированным лазерным лучом и дальнейшем выдувании продуктов разрушения из канала реза сжатыми инертными газами [1].

Широкое применение лазерных установок обусловлено рядом преимуществ: отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал; выполнением сложного контурного раскроя в материалах любой твёрдости, плотности и толщины; чистотой среза обрабатываемой заготовки и отсутствием внутренних механических напряжений;

высокой точностью позиционирования; безотходностью; высокой производительностью. Качество операции резки листовых материалов можно повышать за счёт совершенствования кинематических и координатных систем лазерных установок, оригинальной компоновки датчиков, применением современных линейных и ротационных двигателей, а также электроприводов на их основе.

Современный электропривод состоит из электродвигателя и информационно-измерительной и управляющей системы, высокое качество работы которой обеспечивается путём совершенствования функциональных схем электропривода. В статье [2] определены технические требования к указанной системе электропривода лазерных установок: минимально необходимый диапазон регулирования скорости электрического привода не менее 8650; допустимая полоса пропускания частот контура скорости не менее 123 Гц; коэффициент неравномерности вращения $K_{0,001} \leq 0,25$.

Для предварительной количественной оценки метрологических характеристик проектируемых электроприводов согласно требованиям ГОСТ 27803-91 «Электроприводы, регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования» в [3] предложена методика схемотехнического моделирования, содержащая следующие этапы:

выбор и оценка адекватности математической модели электродвигателя, параметры математической модели должны соответствовать параметрам используемого двигателя;

разработка схемотехнической модели электропривода, соответствующей его общей структурной и электрической схемам;

расчёт передаточных функций регуляторов тока и скорости с учётом условий технического и симметричного оптимума, а также коэффициентов передачи и постоянных времени силового преобразователя, датчиков обратной связи (в рассматриваемом случае – датчиков тока и скорости);

установка ограничений относительно выходного управляющего сигнала регуляторов и схемы силового преобразователя;

численная оценка метрологических характеристик разрабатываемого электропривода (диапазона регулирования скорости, коэффициента неравномерности вращения) осуществляется путём подачи на вход схемотехнической модели сигнала задания скорости в виде ступенчатых воздействий разной амплитуды.

Для перемещения режущего инструмента в трёхкоординатных портальных кинематических схемах лазерных установок с рабочей областью более 1500 мм применяются ротационные электрические двигатели постоянного и переменного тока. В современных электроприводах лазерных установок широко используются бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ), что обусловлено их хорошими динамическими характеристиками, широким диапазоном регулирования скоростей, низкими энергетическими потерями и высокими показателями надёжности. Особенностью БДПТ является замена щёточно-коллекторного узла полупроводниковым преобразователем. Для переключения тока

в обмотках статора применяется схема преобразователя координат и датчик положения ротора, с помощью которого определяется текущее угловое положение вала двигателя. Высококачественное управление БДПТ представляет собой сложную задачу, её решение требует серьёзных исследований и расчётов с использованием математического моделирования.

Цель работы – оценка метрологических характеристик регулируемого электропривода на базе БДПТ, эксплуатируемого в составе лазерных установок.

Разработка и исследование схемотехнической модели регулируемого электропривода. В настоящее время разработано большое количество математических моделей БДПТ, однако не все пригодны для синтеза параметров проектируемого электропривода. В результате анализа математических моделей БДПТ [4–7] автором настоящей статьи выбрана модель, наиболее близко отражающая динамику объекта управления. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений вида [8]:

$$\left. \begin{aligned} U_A \sin(Zp) &= R I_A(Z) + L \frac{dI_A(Z)}{dt} + \Phi_0 \omega \sin(Zp); \\ U_B \sin\left(Zp - \frac{2\pi}{3}\right) &= R I_B(Z) + L \frac{dI_B(Z)}{dt} + \Phi_0 \omega \sin\left(Zp - \frac{2\pi}{3}\right); \\ U_C \sin\left(Zp - \frac{4\pi}{3}\right) &= R I_C(Z) + L \frac{dI_C(Z)}{dt} + \Phi_0 \omega \sin\left(Zp - \frac{4\pi}{3}\right); \\ M_\Sigma &= \left[I_A(Z) \Phi_0 \sin(Zp) + I_B(Z) \Phi_0 \sin\left(Zp - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + I_C(Z) \Phi_0 \sin\left(Zp - \frac{4\pi}{3}\right) \right] k_{дв}; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_\Sigma - M; \quad Z = Z_0 + p \int_0^t \omega dt, \end{aligned} \right\} (1)$$

где U_A, U_B, U_C и I_A, I_B, I_C – амплитуды напряжения и токи соответственно в обмотках А, В, С статора; R, L – сопротивление и индуктивность обмотки статора; Z – угол поворота ротора двигателя; p – количество пар полюсов; Φ_0 – магнитный поток; ω – угловая скорость вращения двигателя; M_Σ – электромагнитный момент; M – приведённый момент; J – момент инерции на валу двигателя; $k_{дв}$ – конструктивный коэффициент двигателя; Z_0 – начальный угол ротора двигателя; p – количество пар полюсов.

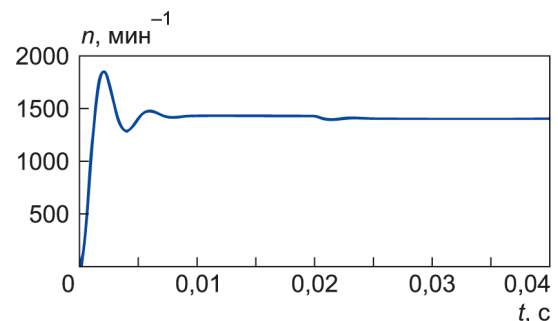


Рис. 1. Переходный процесс исследуемой модели бесколлекторного двигателя постоянного тока

Fig. 1. Transient process of the investigated BLDC model

На основе дифференциальных уравнений (1) разработана математическая модель БДПТ в пакете MatLab Simulink. Моделирование проводилось в течение 0,04 с при максимальных синусоидальных фазовых напряжениях 150 В частотой 50 Гц и приложенным моментом к валу двигателя 1 Н·м в момент времени 0,02 с. Параметры исследуемого двигателя КМ-090-32-02: $R=3$ Ом; $L=0,003$ Гн; $J=0,0002$ кг·м²; $p=4$; $k_{дв}=1$ Н·м/А. График переходного процесса исследуемой модели БДПТ представлен на рис. 1, откуда следует, что исследуемый БДПТ управляем и обладает хорошими динамическими характеристиками: время выхода на номинальную скорость 0,012 с; перерегулирование 30 %.

Для подтверждения работоспособности и оценки метрологических характеристик электропривода разработана схематехническая модель, структурная схема которой представлена на рис. 2. Структурная схема данного электропривода отличается от классических приводов с векторным управлением использованием одного подчинённого контура регулирования тока. Регулируемый электропривод работает следующим образом. Входной сигнал $U_{3с}$ постоянного либо переменного (гармонический сигнал) напряжения в диапазоне ± 10 В задаёт необходимое значение скорости вращения двигателя БДПТ. Согласно ГОСТ 27803-91 амплитуда входного напряжения задания скорости должна быть пропорциональна скорости вращения двигателя. Заданное значение скорости в виде амплитуды входного сигнала $U_{3с}$ поступает на вход блока регулятора скорости РС, где оценивается рассогласование действующего значения скорости вращения и формируется сигнал $U_{3м}$ задания момента двигателя. Регулятор скорости настраивается на симметричный оптимум.

Для устранения отрицательного знака сигнала задания скорости, возникающего при изменении направления вращения двигателя, сигнал задания момента $U_{3м}$ подаётся на вход схемы выделения модуля СВМ. В случае резкого увеличения скорости вращения или динамического изменения момента, приложенного к валу двигателя, для поддержания заданного значения скорости служит регулятор тока РТ, который настраивается на технический оптимум. В регуляторе тока происходит оценка рассогласования действующего значения тока в обмотках статора двигателя и формирование управляющего сигнала. Для задания направления вращения двигателя выходные сигналы регуляторов тока и скорости поступают на входы блока определения знака БОЗ.

После определения направления вращения в блоке БОЗ получившийся выходной сигнал поступает на вход схемы широтно-импульсной модуляции ШИМ. Частота модулирующего сигнала задается генератором пилообразных сигналов Г. Выходной сигнал блока ШИМ поступает на вход блока преобразователя координат БПК силового преобразователя СП. В БПК формируются управляющие сигналы для схемы силового преобразователя двигателя. Алгоритм работы этого блока корректируется выходным сигналом датчика положения ротора ДПР. Этот датчик выполняется на базе датчика Холла или оптического энкодера и встраивается в двигатель. Для упрощения структурной схемы датчик тока ДТ устанавливается на положительном полюсе источника питания ИП схемы силового преобразователя.

Блок преобразователя координат генерирует серию выходных импульсов, которые поступают на вход силового преобразователя, преобразующего входные импульсы в напряжение на обмотках статора двигателя.

Вал двигателя начинает вращаться с некоторой угловой скоростью и в определённом направлении в соответствии с амплитудой и полярностью сигнала задания скорости $U_{3с}$. Скорость вращения и перемещение вала двигателя измеряются датчиком скорости ДС. Зависимость потребляемого двигателем тока от изменения скорости вращения или момента на валу измеряется с помощью ДТ.

Схематехнически блок определения знака может быть основан на микросхеме AD633JN. Для определения знака перемножаются выходные сигналы регуляторов скорости и тока. Схема силового преобразователя базируется на IGBT-транзисторах с защитными диодами. Схема преобразователя ток/напряжение состоит из генератора пилообразных импульсов, схемы формирователя, преобразователя

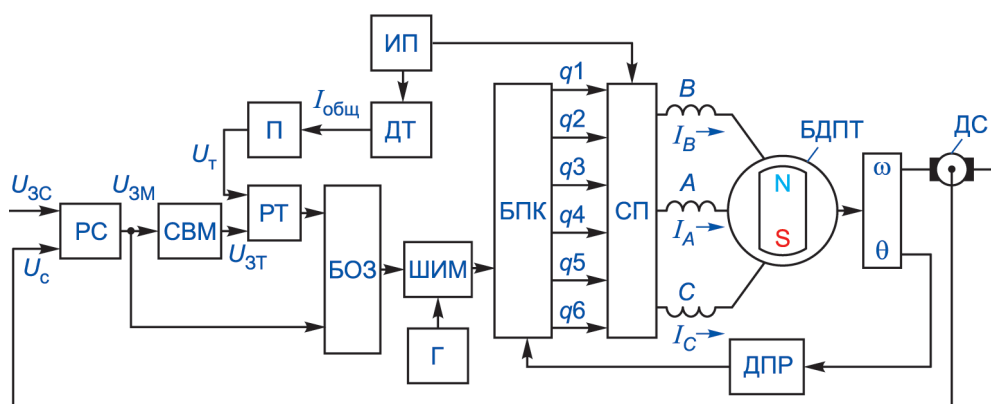


Рис. 2. Структурная схема регулируемого электропривода:

РС – регулятор скорости; СВМ – схема выделения модуля; РТ – регулятор тока; БОЗ – блок определения знака; ШИМ – блок широтно-импульсной модуляции; Г – генератор пилообразных импульсов; БПК – блок преобразователя координат; СП – силовой преобразователь; БДПТ – бесколлекторный двигатель постоянного тока; ДПР, ДС, ДТ – датчики соответственно положения ротора, скорости и тока; П – преобразователь ток/напряжение; ИП – источник питания

Fig. 2. Block diagram of variable electric drive:

SC – speed controller; MSS – module selection scheme; CR – current regulator; BDS – block for determining the sign; PWM; PG – pulse generator; CCB – coordinate converter block; PC – power converter; BDCM – brushless DC motor; SPR, SS, SC – sensors, respectively, of the position of the rotor, speed and current; C – current/voltage converter; PS – power supply

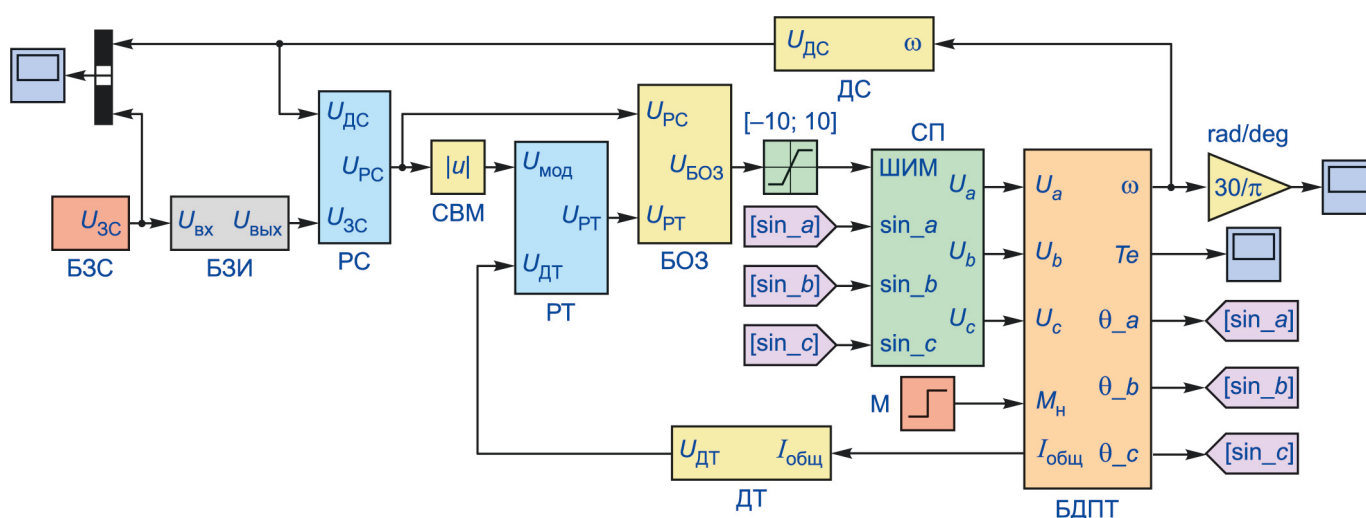


Рис. 3. Схемотехническая модель регулируемого электропривода:
БЗС, БЗИ – блоки задания соответственно сигнала и интенсивности; *М* – приведённый момент; *Т_е* – крутящий момент;
U_{мод} – выходной сигнал блока выделения модуля; остальные блоки те же, что на рис. 2

Fig. 3. Schematic model variable electric drive:
SB – setting blocks; *IB* – intensity block; *M* – reduced moment; *T_e* – torque; *U_{mod}* – signal block selection module;
the other designations are the same as in fig. 2

широтнo-импульснoй модуляции и схемы согласования, выполненнoй на бипoлярнoм транзисторе и oптoпаре. Выхoднoй сигнал схемы преобразователя ток/напряжeние U_T варьируется в диапазоне ± 10 В.

Плата управления разрабатываемого электропривода может быть реализована как на аналоговой, так и на цифровой элементной базе.

Предварительно расчёт параметров регуляторов тока и скорости электропривода проводится методом замены БДПТ эквивалентным магнитоэлектрическим двигателем постоянного тока [9, 10]. Математическое описание магнитоэлектрического двигателя постоянного тока имеет вид

$$\left. \begin{aligned} U_{06M} &= RI_{06M} + L \frac{dI_{06M}}{dt} + e; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M - M_H; \\ e &= k_e \omega; \\ M &= k_{\Pi} I_{06M}, \end{aligned} \right\}$$

где $U_{\text{обм}}$ – напряжение на обмотке статора; $I_{\text{обм}}$ – ток, протекающий в обмотке статора; e – противоэлектродвижущая (ПЭДС) сила якоря двигателя; M_n – номинальный момент двигателя; k_n – электромеханический коэффициент передачи; k_e – коэффициент передачи ПЭДС.

В теории линейных систем принято условно описывать схему силового преобразователя передаточной функцией вида

$$W_{C\Pi}(s) = k_{C\Pi} / (1 + T_{C\Pi}s),$$

где $k_{\text{СП}}$, $T_{\text{СП}}$ – коэффициент передачи ($k_{\text{СП}}=15$) и постоянная времени силового преобразователя.

В упрощённом виде передаточную функцию датчика тока опишем в виде усилительного звена

$$W_{\text{ДТ}}(s) = k_{\text{ДТ}},$$

где $k_{\text{дт}}$ – коэффициент передачи датчика тока.

Коэффициент передачи датчика тока рассчитаем по выражению

$$k_{\text{ДТ}} = U_{\text{РТ}} / (2i_{\text{я}}^{\text{H}}),$$

где U_{PT} – максимальное выходное напряжение регулятора тока ($U_{PT}=10$ В); i_a^H – номинальный ток якоря БДПТ ($i_a^H=2,5$ А).

Передаточную функцию датчика скорости, как и датчика тока, опишем усилительным звеном

$$W_{\text{DC}}(s) = k_{\text{DC}},$$

где $k_{ДС}$ – коэффициент передачи датчика скорости.

Коэффициент передачи датчика скорости определим в виде отношения максимального выходного напряжения регулятора скорости к максимальной угловой частоте вращения двигателя $\omega_{\max}=160$ рад/с:

$$k_{\text{ДТ}} = U_{\text{РТ}} / \omega_{\text{max}}.$$

Передаточную функцию регулятора тока найдём из общего требования настройки контура системы управления на технический оптимум:

$$W_{PT}(s) \frac{k_{\text{CП}}}{1 + T_{\text{CП}} s} (R + Ls)^{-1} k_{\text{ДТ}} = [2T_{\text{CП}} s (1 + T_{\text{CП}} s)]^{-1}.$$

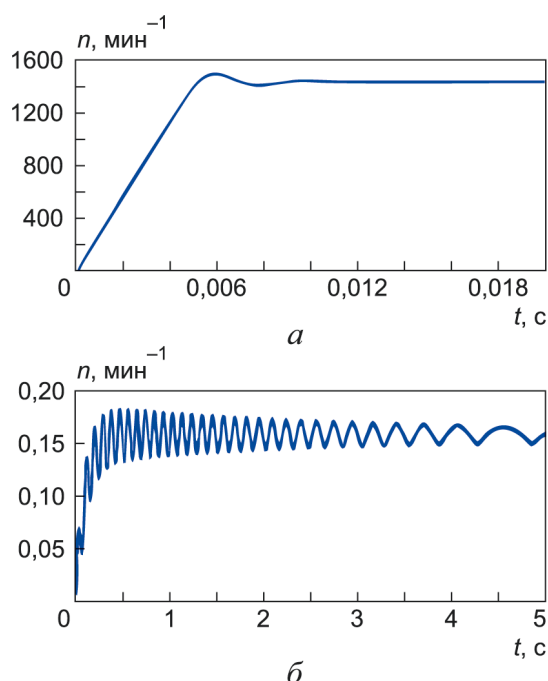


Рис. 4. Выходные тахограммы (зависимости скорости вращения n двигателя от времени t) модели электропривода при входном напряжении 10 и 0,001 В – а, б соответственно

Fig. 4. Output tachograms electric drive models at input voltage 10 (a) and 0.001 (b) V

Определим передаточную функцию регулятора скорости из условия симметричного оптимума:

$$W_{PC}(s) = \frac{1}{k_{дт}(1+2T_{сп}s)} \cdot \frac{p}{Js} k_{дс} k_n = \frac{1+8T_{сп}s}{32T_{сп}^2 s^2 (1+2T_{сп}s)}.$$

В конечном итоге передаточные функции регуляторов тока и скорости примут вид

$$W_{PT}(s) = k_{PT}; \quad W_{PC}(s) = k_{PC} \frac{1+T_{PC1}s}{1+T_{PC2}s},$$

где $k_{PT}=50$; $k_{PC}=5 \cdot 10^5$; T_{PC1} , T_{PC2} – постоянные времени, $T_{PC1}=0,5$ с; $T_{PC2}=10$ с.

Для устранения перерегулирования сигнал задания скорости поступает на вход схемотехнической модели через блок задания интенсивности. Блок задания интенсивности представляет собой аperiодическое звено первого порядка, постоянная времени которого определяется при анализе выходных тахограмм:

$$W_{ЗИ}(s) = k_{ЗИ} / (1+T_{ЗИ}s),$$

где $k_{ЗИ}$, $T_{ЗИ}$ – коэффициент передачи и постоянная времени блока задания интенсивности, $k_{ЗИ}=1$; $T_{ЗИ}=0,0005$ с.

На основании результатов теоретических вычислений проанализирована схемотехническая модель электропривода (рис. 3) в программном пакете MatLab Simulink. Параметры

модели: $k_{дт}=2$ В/А; $k_{дс}=0,06$ В·с/рад; значения остальных параметров указаны в тексте ранее. Напряжение на обмотках статора БДПТ $U_{обм}=\pm 150$ В, частота генератора широтно-импульсной модуляции $f_r=60$ кГц. Модель электропривода исследована методом интегрирования Рунге-Кутты.

Проанализируем адекватность работы модели: подадим на её вход скачкообразные импульсы напряжения амплитудой 0,001–10 В и снимем получившиеся выходные тахограммы (рис. 4). Тахограммы демонстрируют адекватность модели и правильность выполненных расчётов. Модель является устойчивой и имеет перерегулирование менее 40 %, что позволяет сделать следующие выводы:

при максимальном входном сигнале 10 В скорость n вращения ротора двигателя составляет 1436 мин⁻¹ см. рис. 4, а), при минимальном сигнале 0,001 В – 0,152 мин⁻¹ (см. рис. 4, б). Тогда согласно ГОСТ 27803-91 диапазон регулирования скорости исследуемой модели электропривода составит

$$K_d = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} = \frac{1436}{0,152} \approx 9450,$$

где n_{max} , n_{min} , ω_{max} , ω_{min} – максимальные и минимальные значения соответственно мгновенных и угловых скоростей вращения двигателя;

для входного сигнала амплитудой 0,001 В коэффициент неравномерности вращения

$$K_{0,001} = 2 \frac{n'_{max} - n'_{min}}{n'_{max} + n'_{min}} = 2 \frac{0,17 - 0,14}{0,17 + 0,14} \approx 0,194,$$

где n'_{max} , n'_{min} – максимальное и минимальное значения мгновенной скорости вращения двигателя.

Рассчитанные значения диапазона регулирования скорости и коэффициента неравномерности вращения соответствуют требованиям ГОСТ 27803-91.

Экспериментальное подтверждение результатов исследования. Для проверки работоспособности и подтверждения результатов схемотехнического моделирования изготовлен макетный образец предлагаемого электропривода. Испытания проводили с электродвигателем КМ-090-32-02.

Для оценки полосы пропускания частот на вход информационно-измерительной и управляющей системы электропривода подавали сигналы синусоидальной формы различной частоты и постоянной амплитуды 0,1 В. При замкнутом контуре регулирования скорости полоса пропускания частот электропривода определяется при выполнении одного из двух условий:

уменьшение амплитуды выходного сигнала датчика скорости составляет не менее 70,7 % (более 3 дБ) относительно сигнала задания;

сдвиг фазы выходного сигнала датчика скорости относительно входного сигнала задания не превышает 90°.

По результатам выполненных испытаний полоса пропускания частот контура скорости реального электропривода составила 123 Гц, диапазон регулирования скорости около 9000, коэффициент неравномерности вращения примерно 0,16.

Заключение. Предварительное схемотехническое моделирование предложенного регулируемого электропривода с одним подчинённым контуром тока доказало полную работоспособность электропривода. Изменение совокупности связей в структурной схеме регулируемого электропривода и отсутствие необходимости применения трёхконтурной схемы (векторного управления) управления током в обмотках БДПТ дало возможность упростить схему регулируемого электропривода и повысить его надёжность. Метрологические характеристики схемотехнической модели и макетного образца электропривода (диапазон регулирования скорости и коэффициент неравномерности вращения) имеют значения с отклонениями в пределах $\pm 10\%$. Полученные метрологические характеристики разработанного электропривода соответствуют требованиям ГОСТ 27803-91, что позволяет рекомендовать данный электропривод для использования в составе кинематических систем лазерных установок и промышленных роботов.

Список источников

1. Вакс Е. Д., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. Москва: Техносфера, 2013. 696 с.
2. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Определение технических требований для систем управления электрическим приводом в станках лазерного раскроя металла // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 6 (6). С. 27–29.
3. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схемотехнического моделирования // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 1 (6). С. 22–26.
4. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и приводы на их основе (курс лекций). СПб.: КОРОНА-Век, 2016. 336 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
6. Tashakori A., Ektesabi M., Hosseinzadeh N., Modeling of BLDC Motor with Ideal BackEMF for Automotive Applications, *Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2011*, London, U.K., July 6–8, 2011, vol. II, pp. 1504–1508.
7. Mehmet Çunkas, Omer Aydoğdu, *Mathematical and Computational Applications*, 2010, vol. 15, no. 2, pp. 218–229. <https://doi.org/10.3390/mca15020218>
8. Герман-Галкин С. Г. Многовариантный анализ вентильного электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока // Силовая электроника. 2017. № 4. С. 72–79.

9. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. СПб.: Корона Принт, 2017. 320 с.

10. Высоцкий В. Е., Воронин С. М., Горшков Р. Г. Имитационное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов вентильного двигателя // Вестник ИГЭУ. 2011. № 1. С. 1–4.

11. Richard Crowder, *Electric Drives and Electromechanical Systems*, Elsevier, 2006, 309 p.

References

1. Vaks E. D., Milenkiy M. N., Saprykin L. G., *Practice of precision laser processing*, Moscow, Technosphere Publ., 2013, 696 p. (In Russ.)
2. Sleptsov V. V., Mostovskoy M. V., Determination of technical requirements for electric drive control systems in metal laser cutting machine, *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2019, no. 6 (6), pp. 27–29. (In Russ.)
3. Sleptsov V. V., Mostovskoy M. V., Methods for assessing the metrological characteristics of a controlled electric drive by the method of circuit simulation, *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2021, no. 1 (6), pp. 22–26. (In Russ.)
4. Ovchinnikov I. E., *Valve electric motors and drives based on them* (course of lectures), St. Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2016, 336 p. (In Russ.)
5. German-Galkin S. G., *Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC*, St. Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2008, 368 p. (In Russ.)
6. Tashakori A., Ektesabi M., Hosseinzadeh N., Modeling of BLDC Motor with Ideal BackEMF for Automotive Applications, *Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2011*, London, U.K., July 6–8, 2011, vol. II, pp. 1504–1508.
7. Mehmet Çunkas, Omer Aydoğdu, *Mathematical and Computational Applications*, 2010, vol. 15, no. 2, pp. 218–229. <https://doi.org/10.3390/mca15020218>
8. German-Galkin S. G., Multivariate analysis of a valve drive with a non-contact DC motor, *Silovaya elektronika*, 2017, no. 4, pp. 72–79. (In Russ.)
9. German-Galkin S. G., *Computer modeling of semiconductor systems in Matlab 6.0: Textbook*, St. Petersburg, Korona Print Publ., 2017, 320 p. (In Russ.)
10. Vysotsky V. E., Voronin S. M., Gorshkov R. G., Simulation modeling of electromagnetic and electromechanical processes of a valve motor, *Vestnik IGEU*, 2011, no. 1, pp. 1–4. (In Russ.)
11. Richard Crowder, *Electric Drives and Electromechanical Systems*, Elsevier, 2006, 309 p.

Статья поступила в редакцию 27.10.2021; одобрена после рецензирования 27.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.
The article was submitted 27.10.2021; approved after reviewing 27.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения

Олег Владимирович Захаров¹✉, Константин Георгиевич Пугин²

¹ Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

^{1,2} Пермский государственный аграрно-технологический университет им. акад. Д. Н. Прянишникова, Пермь, Россия

¹zov20@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6186-6375>

²123zzz@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>

Аннотация. Рассмотрена актуальная производственная проблема уменьшения погрешности измерения круглости деталей подшипников качения. Обоснован выбор опорных окружностей при анализе круглости указанных деталей. В качестве критериев выбраны физическая интерпретируемость, минимальное значение круглости, надёжность и производительность алгоритма расчёта круглости. Измерены внутренние и наружные поверхности колец и шариков радиального однорядного подшипника на кругломере и координатно-измерительной машине. Рассчитаны значения круглости деталей подшипников по четырём опорным окружностям (наименьших квадратов, минимальной зоны, минимальной описанной, максимальной вписанной). Установлено, что расчёт по окружности минимальной зоны обеспечивает минимальное значение круглости. Для оценки распределения круглости деталей партии подшипников проведено статистическое моделирование методом Монте-Карло и разработана методика, позволяющая на основе гармонического анализа выявить параметры и смоделировать распределения амплитуд и начальных фаз гармоник профиля деталей в партии с учётом корреляции. По результатам статистического моделирования установлено, что минимальные среднеарифметическое значение и стандартное отклонение круглости имеет окружность минимальной зоны. Для расчёта центра окружности минимальной зоны применён надёжный и производительный численный алгоритм минимизации функционала в виде ширины минимальной зоны. Расчёт по окружности минимальной зоны для наружного и внутреннего колец подшипника позволил минимизировать зазор между ними. С учётом всех критериев для анализа круглости колец и шариков подшипников качения рекомендовано выбирать окружность минимальной зоны.

Ключевые слова: измерение, круглость, опорная окружность, шариковый подшипник качения, статистическое моделирование

Для цитирования: Захаров О. В., Пугин К. Г. Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 14–21. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-14-21>

The choice of reference circles when analysis the roundness of parts for ball bearings

Oleg V. Zakharov¹✉, Konstantin G. Pugin²

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

^{1,2} Perm State Agro-Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov, Perm, Russia

¹zov20@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6186-6375>

²123zzz@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>

Abstract. The scientific rationale for the choice of reference circles in the analysis of the roundness of rolling bearing parts is presented. The selection criteria were: physical interpretability, minimum roundness, reliability and performance of the calculation algorithm. The measurement of the inner and outer surfaces of the rings and balls of a single-row radial bearing was carried out on a roundness testers and a coordinate measuring machine. The values of roundness are calculated using four reference circles: least squares, minimum zone, minimum circumscribed, maximum inscribed. It was found that the calculation along the minimum zone circle provides the minimum value of roundness. Statistical Monte-Carlo modeling was carried out to assess the distribution of roundness in a batch of bearings. For this, a technique has been developed that allows, on the basis of harmonic analysis, to identify the distribution parameters of the amplitudes and initial phases of the harmonics of the profile of parts, and then to simulate the distribution in the batch into account the correlation. The results of statistical modeling have confirmed that the minimum zone circle has the minimum value of roundness in terms of the arithmetic mean and standard deviation. A numerical algorithm for minimizing the functional in the form of the width

of the minimum zone was applied to calculate the center of the minimum zone circle. In the area of performance of the objective function, there is one local minimum. The algorithm has proven to be reliable and efficient. Taking into account all the criteria, it is recommended to use the minimum zone circle for the analysis of the roundness of the rings and balls of rolling bearings.

Keywords: measurement, roundness, reference circle, ball bearing, statistical modeling

Введение. К деталям подшипников качения предъявляют высокие требования по точности формы. Примерно 70 % деталей машин, в том числе подшипников качения, содержат круговые поверхности, их сечением является окружность. Поэтому одним из наиболее распространённых на практике показателей погрешности формы является круглость, характеризующая отличие извлечённой окружной линии (круглограммы) от опорной окружности. Допуски круглости составляют для колец от 1,5 до 10 мкм, а для шариков от 0,1 до 1 мкм. В связи с этим измерение и анализ круглости – актуальная задача.

Различные методы измерения круглости (методы диаметров, хорд, радиусов, декартовых координат) имеют недостатки. Метод диаметров (двухточечный метод согласно ISO 4291:1985 “Methods for the assesement of departure from roundness – Measurement of variations in radius”) непригоден для измерения круглости деталей с нечётной огранкой. Метод хорд (трёхточечный метод по ISO 4291:1985) реализуется в виде комбинаций призм и датчиков линейных перемещений и имеет существенную методическую погрешность [1, 2]. Радиусный метод реализован в измерительных приборах типа кругломеров. Различают две разновидности кругломеров: с поворотным столом и с образцовым вращением шпинделя. Применение первого кругломера целесообразно для измерения круглости, эксцентриситета, соосности, перпендикулярности. Кругломеры с образцовым вращением шпинделя считаются наиболее точными и используются в качестве эталонных, но и они не лишены недостатков. Погрешности центрирования и нивелирования значительно влияют на получаемые результаты. Сложность заключается в том, что после центрирования искажается равномерность углового расположения точек профиля. Применение упрощённых алгоритмов компенсации с помощью гармонического анализа позволяет частично решить эту проблему [3].

Метод декартовых координат реализован в координатно-измерительных машинах, которые обладают большой универсальностью, позволяют построить полную геометрическую модель детали и затем определить все геометрические характеристики в виде размеров, формы, месторасположения, ориентации и биения. С совершенствованием координатно-измерительных машин стало возможно контролировать высокоточные подшипники качения [4]. Использование сканирующих методов повышает производительность координатно-измерительных машин в десятки раз. В последние годы для измерения круглости начали применять оптические [5] и лазерные [6, 7] методы.

Измерению и анализу круглости посвящено большое число исследований [1, 8, 9]. Однако до сих пор актуальны задачи измерения отдельных деталей, например цилиндров [10] и отверстий [11] малого диаметра, обечаек

цементных печей [12], коленчатых валов [13], незамкнутых поверхностей [14, 15]. Форма деталей нормируется исходя из их функционального назначения в механизме или приборе. Поэтому в методах анализа круглости необходимо учитывать принцип работы измерительных приборов, особенности размеров и точность детали или технологии её изготовления. Для подшипников качения круглость отдельных деталей влияет на зазор в узле и шумность работы. Вместе с тем отсутствие исследований, позволяющих обоснованно выбрать опорную окружность при измерении, представляет собой серьёзную производственную проблему.

Цель работы – предложить научно обоснованный выбор опорных окружностей на основе эвристического анализа, результатов измерения деталей подшипника и статистического моделирования.

Постановка задачи. ГОСТ 520-2011 «Подшипники качения. Общие технические условия» не регламентирует методы, приборы и методики выполнения измерения круглости. Геометрическая точность колец задаётся параметрами непостоянства диаметра, диаметра в единичной плоскости и среднего диаметра. Отдельные вопросы регламентируют другие стандарты. В ГОСТ 25256-2013 «Подшипники качения. Допуски. Термины и определения» даны термины допусков геометрической точности формы деталей подшипников, включающие круглость, овальность, огранку, сферичность, волнистость. В то же время в ГОСТ ISO 15241-2014 «Подшипники качения. Обозначения физических величин», ГОСТ 10058-90 «Подшипники радиальные шариковые однорядные для приборов. Технические условия» такие параметры не приведены. Для приборных подшипников разработана методика выполнения измерения круглости в диапазоне от 0,2 мкм до 2 мм (ГОСТ 58868-2020 «Подшипники качения приборные. Отклонение от круглости поверхностей деталей. Методика выполнения измерений»). Указано, что при выполнении измерений применяют кругломеры или аналогичные средства измерения, предназначенные для измерений отклонений формы и расположения поверхностей вращения, с пределом допускаемой относительной погрешности определения круглости не более 12 %.

В ГОСТ 3722-2014 «Подшипники качения. Шарiki стальные. Технические условия», ГОСТ 32932-2014 «Подшипники качения. Шарiki керамические» для шариков указан допуск на сферичность и рекомендовано в качестве опорной выбирать сферу наименьших квадратов. Средний диаметр шарика определяют как среднееарифметическое значение наибольшего и наименьшего единичных диаметров шарика, а непостоянство диаметра как их разность. Единичные диаметры измеряют при вращении шарика. Для шариков диаметром не более 6 мм, а также для шариков степеней точности G3 и G5 допустимо измерять единичные диаметры

без вращения, но не менее чем в трёх произвольных диаметральных плоскостях. Наибольшее значение круглости в каждой из трёх единичных центральных плоскостей принимают в качестве значения сферичности.

При извлечении данных необходимо использовать определённый процесс фильтрации, также может потребоваться дополнительная фильтрация извлечённых данных. Дополнительный фильтр может быть линейным (гауссов, сплайн, вейвлет) или нелинейным (например, морфологический). Тип фильтрации влияет на фактическое значение круглости. Некоторые особенности измерения деталей подшипников рассмотрены в работах [16–18].

Авторы настоящего исследования рассматривали четыре опорные окружности: наименьших квадратов, минимальной зоны, минимальная описанная, максимальная вписанная. Критериями сравнения опорных окружностей принимали физическую интерпретируемость, надёжность алгоритма расчёта и затраты машинного времени, минимальное значение круглости. Для расчёта центра опорных окружностей использовали наиболее распространённые на практике алгоритмы. Результаты измерений обрабатывали с помощью стандартного программного обеспечения измерительных приборов и разработанной программы в среде MATLAB. Для получения статистически устойчивых результатов разработали методику статистического моделирования на основе метода Монте-Карло.

Математические модели опорных окружностей. Опорные кривые являются идеализацией геометрически точной детали. Поэтому опорная кривая для сечения круговой поверхности должна иметь форму окружности. Другой подход на основе прилегающих и облегающих предложен в работе [19]. Понятие облегающей впервые было введено в работе [20]. Иногда используются термины «центр профиля», «центр сечения». По мнению авторов настоящей статьи, для анализа круглости целесообразно применять только стандартное понятие – центр опорной окружности.

Ключевой задачей всех методов измерения круглости является определение центра опорной окружности. При решении этой задачи круглость находится однозначно. Стандарт ISO 4291:1985 устанавливает методику определения круглости путём измерения отклонений размеров радиуса с помощью инструментов контактного действия (щупов). Круглость оценивается от центра одной из четырёх опорных окружностей: наименьших квадратов (least squares, LS), минимальной зоны (minimum zone, MZ), минимальной описанной (minimum circumscribed, MC), максимальной вписанной (maximum inscribed, MI). У каждой из опорных окружностей может быть собственное приложение.

Если извлечённый профиль (круглограмма) является геометрически правильной окружностью, то центры всех опорных окружностей совпадают. В реальности центры опорных окружностей не совпадают и, как следствие, не совпадают оценки круглости. Наименьшее значение круглости даёт окружность минимальной зоны. Окружность наименьших квадратов даёт оценку круглости больше примерно на 5 %, а описанная и вписанные окружности – на 10 % [1].

Окружность наименьших квадратов LS. Центр окружности LS определяется так, чтобы сумма квадратов локальных отклонений круглости была минимальной. Окружность LS исторически первой применялась для кругломеров. Физическая аналогия для метода наименьших квадратов заключается в том, что отклонение в каждой точке может быть представлено в виде эластичной ленты, натяжение которой зависит от квадрата длины. В результате минимизируется «энергия» системы. Алгоритм наименьших квадратов вычислительно стабилен и не чувствителен к выбросам.

Расчёт декартовых координат x_{01} , y_{01} центра O_{01} окружности LS (рисунок а) по декартовым координатам x_i , y_i точек профиля осуществляется на основе функционала:

$$F_1 = \min \left\{ \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_{01})^2 + (y_i - y_{01})^2} - r_0 \right\},$$

где r_0 – радиус окружности LS.

Центр окружности LS определяется однозначным образом. Данные усредняются, что уменьшает вероятность выбросов. Круглость Δ_1 определяется как разность максимального $r_{1\max}$ и минимального $r_{1\min}$ радиусов: $\Delta_1 = r_{1\max} - r_{1\min}$. Положение центра наименьших квадратов можно вычислить с помощью простого явного уравнения, приведённого в приложении F стандарта ISO 4291:1985:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i; \quad x_{01} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i r_i; \quad y_{01} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i r_i,$$

где R – радиус средней окружности, r_i – полярный радиус точек профиля, n – число точек профиля.

Согласно исследованиям [3] указанные выше формулы из ISO 4291:1985 справедливы только для центрированных круглограмм. Таким образом, применение центрированных круглограмм ограничивается радиусным методом при достаточно точном центрировании. В действительности погрешности формы детали на круглограмме отсчитываются не от опорной окружности, а от лимаконы [1]. Погрешности, возникающие при неточном центрировании, рассмотрены в работах [21–23].

Окружности минимальной зоны MZ. Окружности минимальной зоны представляют собой две концентрические окружности, охватывающие профиль и имеющие наименьшую разность их радиусов. Минимальная зона соответствует минимальному допуску круглости Δ_2 . Поскольку результат определяется по пикам и впадинам, алгоритм минимальной зоны может быть чувствителен к выбросам.

Расчёт декартовых координат x_{02} , y_{02} центра O_{02} окружностей MZ (рисунок б) осуществляется на основе функционала

$$F_2 = \min \left\{ \max \sqrt{(x_i - x_{02})^2 + (y_i - y_{02})^2} - \min \sqrt{(x_i - x_{02})^2 + (y_i - y_{02})^2} \right\}.$$

Минимизация функционалов F_1 , F_2 выполняется методами нелинейной оптимизации. Конкретный метод оптимизации,

используемый в программном обеспечении координатно-измерительных машин и кругломеров, производители не указывают. В разработанной программе [24] использован метод Ньютона. Известны эвристические алгоритмы, уменьшающие временные затраты при поиске окружности минимальной зоны [25, 26]. Однако их эффективность проверена на ограниченном числе примеров и в настоящее время не может считаться общепризнанной.

Минимальная описанная окружность МС. Минимальная описанная окружность представляет собой окружность наименьшего радиуса r_{3min} , которая может располагаться вокруг профиля (рисунок в). Соответствует минимальному кольцевому калибру, в который входит вал. Минимизация радиуса окружности сводит к минимуму площадь между окружностью и профилем. Окружность МС должна касаться трёх или двух точек профиля. Результат определяется по пикам и впадинам, поэтому алгоритм чувствителен к выбросам.

Максимальная вписанная окружность МІ. Максимальная вписанная окружность представляет собой окружность наибольшего радиуса r_{4max} , которая может быть вписана в профиль (рисунок г). Окружность МІ не является уникальной (например, для эллипса Кассини), однако на практике данная форма отверстия встречается исключительно редко. Как правило, круглограмму такого вида получают при большом увеличении отклонений радиуса профиля относительно радиуса опорной окружности.

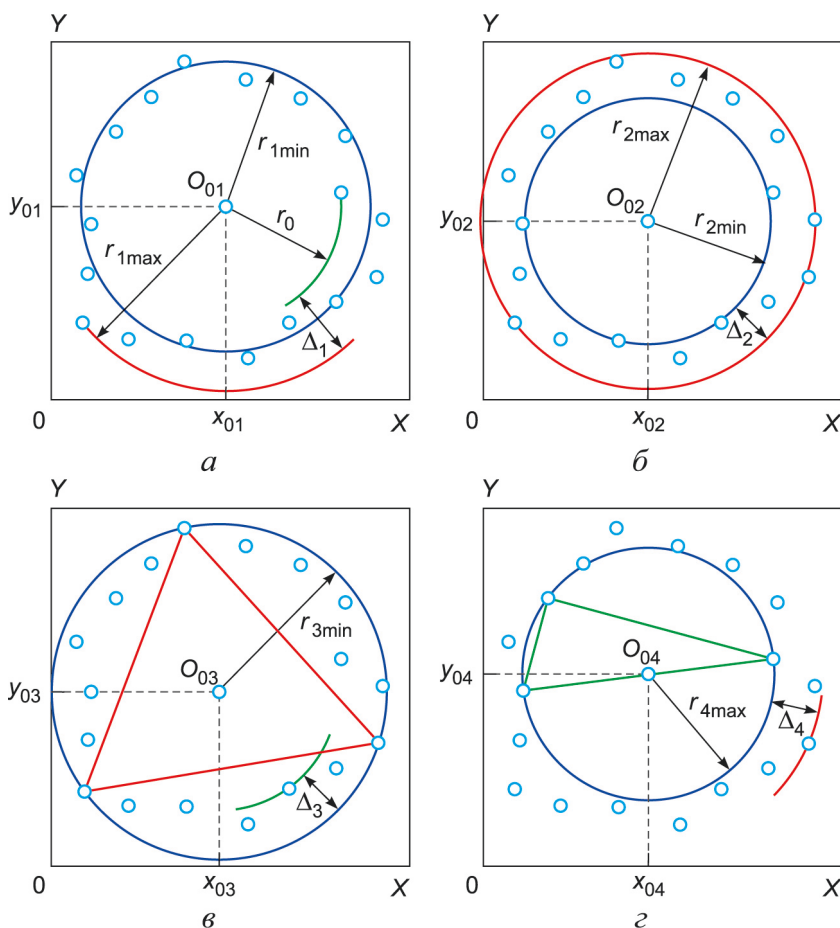
Для расчёта координат центров (x_{03}, y_{03}) и (x_{04}, y_{04}) окружностей соответственно МС и МІ используют вычислительные алгоритмы на основе выпуклых оболочек, диаграммы Вороного, линейного алгоритма Megiddo. Это связано с тем, что простейший алгоритм, рассматривающий каждую окружность, определяемую точками касания для МС и МІ, требует слишком большого числа вычислительных итераций – порядка n в четвёртой степени для числа n измеренных точек. Однако этот алгоритм неприменим на практике, если число точек составляет сотни или тысячи. Выпуклая оболочка используется для удаления избыточных точек с целью сокращения вычислительных затрат. Однако её применение не всегда эффективно. Если все точки являются вершинами выпуклой оболочки, то число итераций этого алгоритма составляет порядка n^2 . Алгоритмы с использованием диаграммы Вороного позволяют получить число итераций $n \log n$.

Линейный алгоритм был предложен N. Megiddo [27] и до сих пор может считаться наиболее производительным. Другим известным решением задачи построения окружностей МС, МІ являются эвристические алгоритмы, использующие определённые свойства расположения точек профиля [26, 28, 29]. Однако в настоящее время ни один из эвристических алгоритмов

не получил строгого математического обоснования и не может считаться общепризнанным.

Измерение круглости деталей подшипников. В настоящей работе изучали один из наиболее распространённых подшипников – однорядный шариковый радиальный подшипник 6-180206А. Измеряли его наружное и внутреннее кольца и шарик. Оценивали круглость наружного и внутреннего диаметров колец и сферичность шарика по трём сечениям. Традиционно на подшипниковых заводах используют кругломеры. Поэтому основным средством измерений выбран прецизионный кругломер Talyrond 130 (Taylor Hobson, Великобритания) и дополнительным – координатно-измерительная машина DEA GLOBAL Performance (Hexagon Metrology S.p.A., Италия). При анализе круглости для внутренних диаметров не применяли окружность МС, а для наружных поверхностей – окружность МІ.

Предел погрешности шпинделя кругломера Talyrond 130 при измерении круглости составляет $\pm 0,025$ мкм. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений круглости ± 3 %. Использовали щуп радиусом 1 мм. Настройку кругломера производили без фильтров. При измерении



Опорные окружности наименьших квадратов, минимальной зоны, минимальная описанная, максимальная вписанная – а–г соответственно

Reference circles least squares, minimum zone, minimum described, maximum inscribed (a–d)

Таблица 1

Результаты измерений круглости деталей подшипника

Опорная окружность	Кругломер					КИМ*			
	$\Delta_{НК}^H$, мкм	$\Delta_{НК}^B$, мкм	$\Delta_{ВК}^H$, мкм	$\Delta_{ВК}^B$, мкм	$\Delta_{ш}$, мкм	$\Delta_{НК}^H$, мкм	$\Delta_{НК}^B$, мкм	$\Delta_{ВК}^H$, мкм	$\Delta_{ВК}^B$, мкм
LS	7,89	7,94	7,10	6,00	0,20	7,95	7,45	6,47	5,88
MZ	6,38	7,14	6,34	5,10	0,18	6,51	7,01	6,22	4,97
MC	6,51	—	6,94	—	0,21	6,64	—	7,02	—
MI	—	8,35	—	5,44	—	—	7,93	—	5,35

*КИМ – координатно-измерительная машина

Таблица 2

Смоделированные значения круглости деталей подшипника

Опорная окружность	Наружная поверхность		Внутренняя поверхность	
	CA3, мкм	CO, мкм	CA3, мкм	CO, мкм
LS	6,25	0,32	7,31	0,36
MZ	5,72	0,25	6,60	0,28
MC	6,03	0,59	—	—
MI	—	—	7,40	0,75

круглости применяли фильтр с верхней границей полосы пропускания 15. Алгоритмическая фильтрация выполнена фильтром 2RC с фазовой коррекцией. Результаты измерения приведены в табл. 1. Здесь и далее введены следующие обозначения: $\Delta_{НК}^H$, $\Delta_{НК}^B$ – круглости соответственно наружного и внутреннего диаметров наружного кольца; $\Delta_{ВК}^H$, $\Delta_{ВК}^B$ – круглости соответственно наружного и внутреннего диаметров внутреннего кольца; $\Delta_{ш}$ – сферичность шарика.

Паспортная погрешность координатно-измерительной машины DEA GLOBAL Performance $E_{L,MPE}=1,7+L/333$ мкм и $MPE_P=1,9$ мкм (ГОСТ Р ИСО 10360-2-2017 «Характеристики изделий геометрические. Приёмочные и перепроверочные испытания координатно-измерительных машин. Координатно-измерительные машины, применяемые для измерения линейных размеров»). Разрешающая способность измерительной системы 0,039 мкм. Для механической фильтрации использовали измерительный щуп сферической формы TP200 Renishaw радиусом 2 мм. Дополнительную фильтрацию не применяли. Круглость определяли по 36 точкам профиля. Установку кольца на стол координатно-измерительной машины выполняли по базовому торцу. Круглость (сферичность) шариков не измеряли, так как погрешность средства измерений превышала допуск на соответствующий параметр детали. Результаты измерений также приведены в табл. 1.

Моделирование круглости деталей подшипников. Для получения статистически устойчивых результатов авторы настоящей статьи разработали методику статистического моделирования на основе метода Монте-Карло. Статистическое моделирование анализа круглости включает следующие этапы: определение параметров распределения

амплитуд и начальных фаз гармоник на основе гармонического анализа круглограмм; корреляционный анализ указанных распределений; генерирование случайных чисел и их преобразование в необходимые законы распределения амплитуд и начальных фаз гармоник в партии деталей. Для моделирования профилей деталей подшипника применяли методику [3], а также исходные данные, полученные в течение нескольких лет на АО «ЕПК Саратов» с помощью кругломера Talyrond 130. Для полученных профилей деталей подшипника определяли значения круглости и рассчитывали статистические параметры деталей подшипников в партии.

Анализ круглости по полученным профилям выполняли в разработанной программе в среде MATLAB. В качестве метода минимизации использовали многопараметрический метод Ньютона, в котором на каждой итерации численно рассчитывается вторая производная целевой функции. Поиск минимума завершали при выполнении одного из условий: число итераций более 100; уменьшение шага по координатам до 10^{-8} . Алгоритм оптимизации имеет хорошую сходимость. Достаточно 50–70 итераций; время расчётов 0,1–0,3 с.

При моделировании принимали, что партия составляет 200 деталей подшипников. Рассматривали внутреннюю и наружную поверхности кольца. Для каждого профиля по 360 точкам рассчитывали значения круглости при использовании четырёх опорных окружностей LS, MZ, MC, MI. Установили, что круглость в партии деталей можно описать нормальным законом распределения. Поэтому для статистической оценки можно использовать среднеарифметическое значение (CA3) и стандартное отклонение (CO). Результаты статистического моделирования круглости приведены в табл. 2.

Анализ результатов измерений и моделирования. Все измеренные параметры колец и шариков подшипника находились в пределах допуска. Значения круглости наружного и внутреннего диаметров наружного кольца были близки (при этом круглость наружного диаметра внутреннего кольца примерно на 1 мкм больше, чем круглость внутреннего диаметра). Это можно объяснить особенностями технологии финишной обработки кольца.

Если принять результаты измерений на кругломере за эталонные и сравнить с ними результаты измерений на координатно-измерительной машине, то можно сделать следующий вывод. Круглость наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, измеренная на координатно-измерительной

машине, в среднем на 5 % меньше, чем измеренная на кругломере. Это можно объяснить дискретизацией профиля и механической фильтрацией. При измерениях с помощью координатно-измерительной машины использовалось меньшее число точек профиля и щуп с большим радиусом (по сравнению с кругломером). Круглость наружных и внутренних поверхностей тора, измеренная на координатно-измерительной машине, в среднем на 3 % меньше, чем при измерениях на кругломере. Это можно объяснить погрешностью сечения тора и погрешностью компенсации радиуса щупа.

Объективным критерием выбора опорных окружностей является минимальное значение круглости. Для деталей подшипников установлены жёсткие допуски на круглость, поэтому завышенное значение при измерении может привести к увеличению процента брака. Установлено, что наименьшее значение круглости соответствует окружности MZ. При измерении на кругломере окружность LS даёт большее значение круглости 11,1–23,7 %. Значение 11,1 % характерно для шариков. Окружность MC даёт большее по сравнению с MZ значение круглости 9,5–20,4 %. Для окружности MI значение круглости лежит в интервале 6,7–16,9 %. При измерении на координатно-измерительной машине окружность LS даёт большее по сравнению с MZ значение круглости 4,0–22,1 %. Для окружностей MC и MI значения круглости составляют 2,0–12,9 % и 7,6–11,8 % соответственно. Таким образом, соотношение между значениями круглости для разных опорных окружностей слабо зависит от средства измерений.

Выявлено, что для внутренней поверхности характерно большее значение круглости по абсолютному значению и размаху. Окружность MZ даёт наименьшие CA3 и CO. Окружность LS имеет большее (по сравнению с окружностью MZ) CA3 на 9,3 и 10,8 % для наружной поверхности и внутренней поверхностей соответственно, при этом CO больше на 28 и 28,6 % для наружной и внутренней поверхностей соответственно. Окружность MC по сравнению с окружностью MZ имеет большие CA3 на 10,1 % и CO в 2,36 раза. Окружность MI по сравнению с окружностью MZ имеет большее CA3 на 12,1 % и CO в 2,68 раза. Таким образом, окружность MC по сравнению с окружностью LS даёт меньшее значение круглости по CA3 для наружной поверхности и большее значение для внутренней поверхности. CO во всех случаях больше для окружностей MC, MI. Поэтому можно сделать вывод, что опорные окружности MC, MI менее устойчивы к выбросам.

Опорные окружности следует интерпретировать с физической точки зрения. Описанную и вписанную окружности традиционно рассматривают как сопрягаемую деталь идеальной формы в посадках с зазором. Окружность минимальной зоны может рассматриваться как траектория движения или след пересечения двух поверхностей. Окружность наименьших квадратов лучше отражает прессовую посадку, так как в первом приближении описывает распределение материала. В работе [30] показано, что для точных деталей подшипников различия между центрами опорных окружностей и центром масс сечения невелики. Для подшипника важнейшим параметром является зазор. Наружное и внутреннее кольца подшипников обладают погрешностью формы, и окружность минимальной

зоны позволяет найти зону взаимодействия колец как сумму двух минимальных зазоров. Поэтому выбор окружности минимальной зоны в качестве опорной для деталей подшипника является предпочтительным.

Надёжность результатов вычисления погрешности окружности наименьших квадратов и минимальной зоны выше надёжности результатов вычисления погрешностей описанной и вписанной окружностей. Многочисленные расчёты по реальным данным и результатам моделирования показали, что при минимизации функционалов F_1 , F_2 целевая функция имеет один локальный минимум. Поэтому можно использовать метод безусловной оптимизации. В качестве такого метода выбран метод второго порядка Ньютона. По вычислительным затратам расчёт центров окружностей наименьших квадратов и минимальной зоны примерно равны. Линейные алгоритмы для поиска центра минимальной описанной и максимальной вписанной окружностей показали сравнимое время при числе точек на профиле не более 50. При большем числе точек затраты времени линейно увеличиваются и производительность уменьшается.

Заключение. Проведённые исследования позволяют рекомендовать для анализа круглости колец и шариков подшипников окружность минимальной зоны. Основным преимуществом является меньшее значение круглости: среднеарифметическое значение меньше на 9–10 %, стандартное отклонение меньше на 28–29 % по сравнению с окружностью наименьших квадратов. Это позволяет менее жёстко нормировать допуск на круглость и соответственно уменьшить процент брака на производстве. Несмотря на то, что центр окружности минимальной зоны определяется по впадинам и выступам, алгоритм расчёта слабо чувствителен к выбросам. Это подтверждается минимальным значением стандартного отклонения при статистическом моделировании. Использование окружностей минимальной зоны для анализа круглости наружных и внутренних поверхностей колец позволяет минимизировать зазор в подшипнике. При поиске центра окружности для минимизации функционала применялся безусловный метод оптимизации – метод второго порядка Ньютона. С вычислительной точки зрения алгоритм зарекомендовал себя как надёжный и производительный: достаточно 50–70 итераций; время расчётов не превышает 0,3 с.

Список источников

1. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. М.: ИД Интеллект, 2009. 472 с.
2. Захаров О. В., Кочетков А. В. Минимизация систематической погрешности при бесцентровом измерении круглости деталей // Метрология. 2015. № 4. С. 20–28.
3. Захаров О. В., Бржозовский Б. М. О точности центрирования при измерении на кругломерах // Измерительная техника. 2006. № 11. С. 20–22.
4. Гречников Ф. В., Резчиков А. Ф., Захаров О. В. Итерационный метод коррекции радиуса сферического щупа мобильных координатно-измерительных машин при контроле поверхностей вращения // Измерительная техника. 2018. № 4. С. 21–24. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-4-21-24>

5. Mekid S., Vacharanukul K., *Measurement*, 2011, vol. 44, iss. 4, pp. 762–766.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.01.011>
6. Zhou Y., Li Q., Chu L., Ma Y., Zhang J., *Meas. Sci. Technol.*, 2020, vol. 31, 065002.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab6ecd>
7. Заякин О. А., Манухин А. В., Ростов А. А. Экспериментальный лазерный кругломер, исследование основной погрешности измерений // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. № 6. С. 184–188.
8. Zakharov O. V., Bobrovskij I. N., Kochetkov A. V., *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 963–968.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.071>
9. Печенин В. А., Болотов М. А., Рузанов Н. В., Грачев И. А., Щербаков И. А. Модель сопряжения деталей с коническими поверхностями // СТИН. 2017. № 3. С. 28–33.
10. Stone J., Muralikrishnan B., Sahay C., *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2011, vol. 116, no. 2, pp. 573–587. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.116.006>
11. Chen Y.-L., Machida Y., Shimizu Y., Matsukuma H., Gao W., *CIRP Annals*, 2018, vol. 67, pp. 535–538.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.009>
12. Хуртасенко А. В., Шрубченко И. В., Тимофеев С. П. Методика определения формы наружной поверхности качения опор технологических барабанов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 3. С. 85–89.
13. Chybowski L., Nozdrzykowski K., Grządziel Z., Jakubowski A., Przetakiewicz W., *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, iss. 14, 4722. <https://doi.org/10.3390/app10144722>
14. Грачев И. А., Болотов М. А., Печенин В. А., Кудашов Е. В. Сравнительный анализ вариантов моделирования реальной геометрии поверхностей деталей ГТД / Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020). Самара, 26–29 мая 2020 года. Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы. В 4-х томах. Под ред. В. А. Соболева. Т. 3. Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, 2020. С. 627–637.
15. Cao Zhi-min, Wu Yun, Han Jian, *Meas. Sci. Technol.*, 2017, vol. 28, 105017. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa770f>
16. Yang Liu, Ziyue Wu, Tancheng Xie, Yanwei Xu, *Proceedings of the 7th International Conference on Education, Management, Computer and Society, Advances in Computer Science Research (EMCS 2017)*, ACSR, 2017, vol. 61, pp. 396–402.
<https://doi.org/10.2991/emcs-17.2017.78>
17. Viitala R., Gruber G., Hemming B., Widmaier T., Tammi K., Kuosmanen P., *Precision Engineering*, 2019, vol. 55, pp. 59–69.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.08.007>
18. Viitala R., Widmaier T., Hemming B., Tammi K., Kuosmanen P., *Precision Engineering*, 2018, vol. 54, pp. 118–130.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.05.008>
19. Марков Б. Н., Меликова О. Н., Педь С. Е. Разработка алгоритмов и программ построения опорных окружностей для анализа отклонений от круглости // Измерительная техника. 2019. № 2. С. 35–38.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-2-35-38>
20. Шевелева Г. И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. М.: Станкин, 1999. 494 с.
21. Никольский А. А., Королев В. В. Точный метод измерений на кругломерах формы поперечных сечений сложного профиля без предварительного центрирования // Измерительная техника. 2011. № 6. С. 24–29.
22. Shi S., Kuschmierz R., Zhang G., Lin J., Czarske J., Qu J., *Measurement*, 2020, vol. 155, 107530.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107530>
23. Adamczak S., Stepień K., Kmiecik-Softysiak U., *Procedia Engineering*, 2017, vol. 192, pp. 4–9.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.001>
24. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014612744. Расчёт отклонений от круглости деталей / П. Ю. Бочкарев, О. В. Захаров, В. В. Шалунов, Е. П. Решетникова. Опубл. 6.03.2014.
25. Rossi A., Lanzetta M., *Measurement*, 2013, vol. 46, pp. 2251–2258. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.03.025>
26. Calvo R., Gómez E., *Measurement*, 2015, vol. 73, pp. 211–225. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.009>
27. Megiddo N., *SIAM J. Comput.*, 1983, vol. 12, no. 4, pp. 759–776. <https://doi.org/10.1137/0212052>
28. Li X., Zhu H., Guo Z., Liu Y., *Review of Scientific Instruments*, 2020, vol. 91, 025105. <https://doi.org/10.1063/1.5141146>
29. Liu F., Xu G., Liang L., Zhang Q., Liu D., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, vol. 65, no. 12, pp. 2787–2796. <https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2601003>
30. Гебель И. Д. Выбор базовой окружности при измерении формы профиля тел вращения // Измерительная техника. 1971. № 10. С. 20–24.

References

1. Whitehouse David J., *Handbook of Surface and Nanometrology*, Second Edition, CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2010, 975 p.
2. Zakharov O. V., Kochetkov A. V., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 58, no. 6, pp. 1317–1321.
<https://doi.org/10.1007/s11018-016-0892-6>
3. Zakharov O. V., Brzhozovskii B. M., *Measurement Techniques*, 2006, vol. 49, no. 11, pp. 1094–1097.
<https://doi.org/10.1007/s11018-006-0242-1>
4. Grechnikov F. V., Rezhnikov A. F., Zakharov O. V., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 347–352.
<https://doi.org/10.1007/s11018-018-1432-3>
5. Mekid S., Vacharanukul K., *Measurement*, 2011, vol. 44, iss. 4, pp. 762–766. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.01.011>
6. Zhou Y., Li Q., Chu L., Ma Y., Zhang J., *Meas. Sci. Technol.*, 2020, vol. 31, 065002. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab6ecd>
7. Zayakin O. A., Manukhin A. V., Rostov A. A., Pilot laser roundness meter, research for the main measurement error, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2017, no. 6, pp. 184–188. (In Russ.)
8. Zakharov O. V., Bobrovskij I. N., Kochetkov A. V., *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 963–968.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.071>

9. Pechenin V. A., Bolotov M. A., Ruzanov N. V., Grachev I. A., Shcherbakov I. A., *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, pp. 739–743. <https://doi.org/10.3103/S1068798X17080135>
10. Stone J., Muralikrishnan B., Sahay C., *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2011, vol. 116, pp. 573–587. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.116.006>
11. Chen Y.-L., Machida Y., Shimizu Y., Matsukuma H., Gao W., *CIRP Annals*, 2018, vol. 67, pp. 535–538. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.009>
12. Khurtasenko A. V., Shrubchenko I. V., Timofeev S. P., Metodika opredeleniya formy naruzhnoi poverkhnosti kacheniya opor tekhnologicheskikh barabanov, *Vestnik V. G. Shukhova BGTU*, 2015, no. 3, pp. 85–89. (In Russ.)
13. Chybowski L., Nozdrzykowski K., Grządziel Z., Jakubowski A., Przetakiewicz W., *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, iss. 14, 4722. <https://doi.org/10.3390/app10144722>
14. Grachev I. A., Bolotov M. A., Pechenin V. A., Kudashov E. V., Kharin K. E., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1745, 012087. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1745/1/012087>
15. Cao Zhi-min, Wu Yun, Han Jian, *Meas. Sci. Technol.*, 2017, vol. 28, 105017. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa770f>
16. Yang Liu, Ziyue Wu, Tancheng Xie, Yanwei Xu, *Proceedings of the 7th International Conference on Education, Management, Computer and Society, Advances in Computer Science Research (EMCS 2017)*, ACSR, 2017, vol. 61, pp. 396–402. <https://doi.org/10.2991/emcs-17.2017.78>
17. Viitala R., Gruber G., Hemming B., Widmaier T., Tammi K., Kuosmanen P., *Precision Engineering*, 2019, vol. 55, pp. 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.08.007>
18. Viitala R., Widmaier T., Hemming B., Tammi K., Kuosmanen P., *Precision Engineering*, 2018, vol. 54, pp. 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.05.008>
19. Markov B. N., Melikova O. N., Ped' S. E., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 134–138. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01597-y>
20. Sheveleva G. I., *Teoriya formoobrazovaniya i kontakta dvizhushchikhsya tel*, Moscow, MGTU Stankin, 1999, 494 p. (In Russ.)
21. Nikolskii A. A., Korolev V. V., *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, no. 6, pp. 640–649. <https://doi.org/10.1007/s11018-011-9779-8>
22. Shi S., Kuschmierz R., Zhang G., Lin J., Czarske J., Qu J., *Measurement*, 2020, vol. 155, 107530. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107530>
23. Adamczak S., Stepień K., Kmiecik-Sołtysiak U., *Procedia Engineering*, 2017, vol. 192, pp. 4–9. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.001>
24. Svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlya EVM no. 2014612744, Raschet otklonenii ot kruglosti detalei, P. Yu. Bochkarev, O. V. Zakharov, V. V. Shalunov, E. P. Reshetnikova, 6.03.2014. (In Russ.)
25. Rossi A., Lanzetta M., *Measurement*, 2013, vol. 46, pp. 2251–2258. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.03.025>
26. Calvo R., Gómez E., *Measurement*, 2015, vol. 73, pp. 211–225. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.009>
27. Megiddo N., *SIAM J. Comput.*, 1983, vol. 12, no. 4, pp. 759–776. <https://doi.org/10.1137/0212052>
28. Li X., Zhu H., Guo Z., Liu Y., *Review of Scientific Instruments*, 2020, vol. 91, 025105. <https://doi.org/10.1063/1.5141146>
29. Liu F., Xu G., Liang L., Zhang Q., Liu D., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, vol. 65, no. 12, pp. 2787–2796. <https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2601003>
30. Gebel I. D., *Measurement Techniques*, 1971, vol. 14, no. 10, pp. 1485–1492. <https://doi.org/10.1007/BF00981832>

Статья поступила в редакцию 08.11.2021; одобрена после рецензирования 21.12.2021; принята к публикации 24.12.2021.
The article was submitted 08.11.2021; approved after reviewing 21.12.2021; accepted for publication 24.12.2021.

Измерение эффекта гравитационного замедления времени дуплексным наземным квантовым нивелиром

Вячеслав Филиппович Фатеев¹, Фёдор Радиевич Смирнов²✉, Сергей Сергеевич Донченко³

^{1, 2, 3} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия

¹generalfat@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7902-0212>

²frsmirnov@vniiftri.ru ✉, <http://orcid.org/0000-0003-1504-9192>

³donchenko_ss@vniiftri.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1867-4834>

Аннотация. Впервые исследован квантовый нивелир на эффекте замедления времени с использованием наземных линий связи. Квантовый нивелир предназначен для измерений разности гравитационных потенциалов и ортометрических высот. Теоретически описан дуплексный режим измерений при двух встречных радиоканалах. Экспериментально измерен эффект замедления с применением односторонней радиолинии, реализованной на волоконно-оптической линии связи. Для измерений использованы стационарные и мобильные (перемещаемые) квантовые водородные часы с относительными нестабильностями $(0,5-0,7) \cdot 10^{-15}$ и $1 \cdot 10^{-15}$ соответственно. Установлено, что в эксперименте гравитационное красное смещение частоты между используемыми часами имеет две составляющих: красное смещение частоты задающего генератора часов и классическое красное смещение в радиоканале. По результатам измерений вычислена высота перемещения перемещаемых квантовых водородных часов $(-34,0 \pm 0,8)$ м при действительной высоте -34 м.

Ключевые слова: квантовый нивелир, эффект замедления времени, гравитационное смещение частоты, квантовые водородные часы

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11023.

Для цитирования: Фатеев В. Ф., Смирнов Ф. Р., Донченко С. С. Измерение эффекта гравитационного замедления времени дуплексным наземным квантовым нивелиром // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 22–27. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-22-27>

Measuring the effect of gravitational time dilation in a duplex ground-based quantum level

Vyacheslav F. Fateev¹, Fedor R. Smirnov²✉, Sergey S. Donchenko³

^{1, 2, 3} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering Measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹generalfat@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7902-0212>

²frsmirnov@vniiftri.ru ✉, <http://orcid.org/0000-0003-1504-9192>

³donchenko_ss@vniiftri.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1867-4834>

Abstract. For the first time, the possibility of measuring the difference in gravitational potentials and orthometric heights using a quantum level based on the gravitational effect of time dilation using ground communication lines is considered. The duplex mode of measurements using two opposite radio channels is theoretically described. The deceleration effect was experimentally measured using a one-way radio link implemented on a fiber-optic link. For measurements, stationary and relocatable quantum hydrogen clocks with relative instability, respectively, $(0,5-0,7) \cdot 10^{-15}$ and $1 \cdot 10^{-15}$ were used. It was found that in the experiment the gravitational redshift of the frequency between the clocks used has two components: the redshift of the clock master oscillator frequency and the classical redshift in the radio channel. Based on the measurement results, the altitude of the relocated quantum hydrogen clock was calculated, which was (-34.0 ± 0.8) m at the actual altitude -34 m.

Keywords: quantum level, time dilation effect, gravitational frequency shift, quantum hydrogen clock

Введение. В основе геодезических измерений с помощью квантовых нивелиров лежит гравитационный эффект замедления времени Эйнштейна [1]. Известны эксперименты с квантовыми нивелирами, в которых для измерения разности гравитационных потенциалов и соответствующей разности

ортометрических высот используются высокостабильные переносимые водородные квантовые часы [2–4]. В этих экспериментах измерения расхождений шкал времени квантовых часов, разнесённых на большие расстояния, выполнялись с помощью сигналов глобальных навигационных спутниковых

систем (ГНСС). Это существенно упрощает конструкцию квантового нивелира, однако не обеспечивает необходимой точности: погрешность измерения расхождения шкал времени зависит от расстояния между квантовыми часами и составляет сотни пикосекунд. В этой связи представляет интерес оценка возможностей квантового нивелира при одностороннем и дуплексном режимах измерений с использованием наземных линий радиосвязи.

Цель настоящего исследования – измерение эффекта гравитационного замедления времени дуплексным наземным квантовым нивелиром.

Схема квантового нивелира. Будем считать, что оборудование квантового нивелира расположено на поверхности Земли на разных высотах (рис. 1). На нулевой высоте (этаж 6) располагаются стационарные квантовые водородные часы *КЧВ-С*, подключённые к входу *Вх1* первого (основного) измерителя интервалов времени *ИИБ-1*. На высоте $-H$ относительно *КЧВ-С* располагаются мобильные (перебазируемые) квантовые водородные часы *КЧВ-М*, подключённые к входу *Вх2* измерителя *ИИБ-2*. В режиме начальной калибровки двое квантовых часов устанавливаются рядом на нулевой высоте (рис. 1, а). Для измерения разности гравитационных потенциалов в режиме пространственного разнесения часов используются два радиоканала *РК-1*, *РК-2*, соединяющие соответственно *КЧВ-М* и *ИИБ-1*, *КЧВ-С* и *ИИБ-2* (рис. 1, б). Радиоканалы

могут быть реализованы на основе радиокабельных линий, а также на основе волоконно-оптических линий связи *ВОЛС-1*, *ВОЛС-2*.

Исходные релятивистские соотношения. Обозначим τ_0 , τ_M соответственно шкалы времени стационарных (базовых) и мобильных (стандартов времени) часов (*ШВ-0* и *ШВ-М* соответственно). Эти шкалы времени реализованы в виде последовательности импульсов частотой 1 Гц, найденной путём деления частот задающих генераторов используемых часов на необходимое число раз. Начальную взаимную относительную расстройку частот следования импульсных последовательностей *ШВ-0* и *ШВ-М* f_0 , $f_{M.T}$ представим в виде отношения

$$\Delta f_{M.T}/f_0 = (f_{M.T} - f)/f_0,$$

где индекс «м.т» обозначает начальную расстройку частот, вызванную техническим несовершенством задающих генераторов мобильных атомных часов или специально введённой начальной расстройкой. Приведённая формула справедлива как для используемых последовательностей импульсов частотой около 1 Гц, так и для частот задающих генераторов базовых и мобильных часов (около 10 МГц).

Для упрощения релятивистских соотношений примем, что используемые часы в достаточной степени термостабилизированы и влиянием изменений температуры на интервале

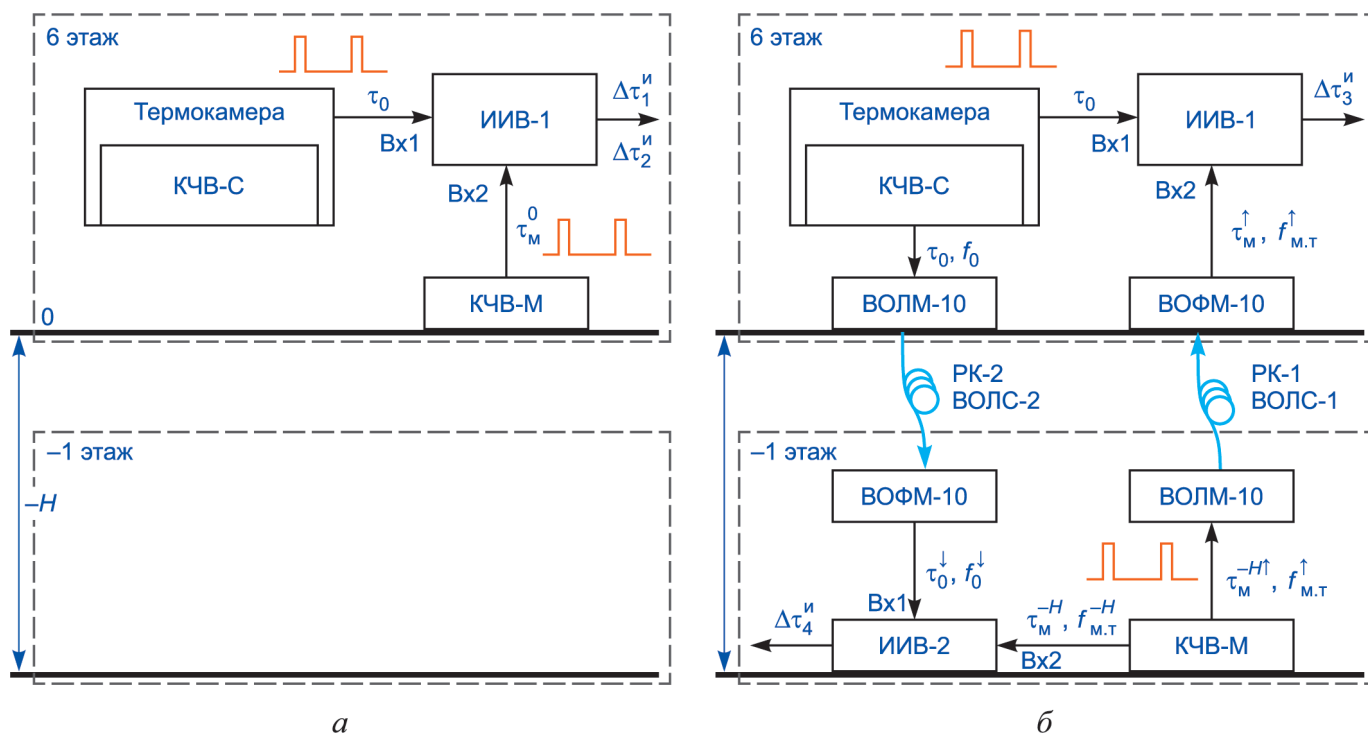


Рис. 1. Схема дуплексного нивелира:

ИИБ-1, *ИИБ-2* – измерители интервалов времени; *КЧВ-С*, *КЧВ-М* – соответственно стационарные и мобильные квантовые водородные часы; *ВОЛМ-10*, *ВОФМ-10* – волоконно-оптические лазерные и фотоприёмные модули соответственно; *РК-1*, *РК-2* – радиоканалы; *ВОЛС-1*, *ВОЛС-2* – волоконно-оптические линии связи

Fig. 1. Scheme of a duplex level:

TIM – time interval meters; *QHC-S*, *QHC-M* – stationary and mobile quantum hydrogen clocks; *FOLM-10*, *FOPM-10* – fiber optic laser and photodetector modules; *RC-1*, *RC-2* – radio channels; *FOCL-1*, *FOCL-2* – fiber optic communication lines

измерений можно пренебречь. Влиянием нестабильности частот задающих генераторов на интервале измерения также пренебрежём. В этих условиях шкалы времени мобильных и стационарных часов в виде последовательности импульсов частотой 1 Гц связаны следующим релятивистским соотношением [5]:

$$\tau_m = \tau_0 + \Delta\tau_k + C\Delta\tau_0 + \Delta\tau_0 \Delta f_{гр}/f_0, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_k = \tau_{м.к} - \tau_{0к}$ – начальное расхождение по времени одноимённых секундных меток шкал $\tau_{0к}$, $\tau_{м.к}$ на момент их взаимной калибровки; $\Delta\tau_0 = \tau_0 - \tau_{0к}$ – интервал текущего времени относительно начального момента времени $\tau_{0к}$; $C = (f_{м.т}^0 - f_0)/f_0 = \Delta f_{м.т}^0/f_0$ – коэффициент начальной (технической) относительной расстройки частот следования импульсов шкал времени мобильных и базовых часов, соответствующий нулевой разности их высот; $\Delta f_{гр}/f_0 = (f_{м.т} - f_0)_{гр}/f_0$ – относительная расстройка частот последовательностей импульсов обеих шкал времени, соответствующая относительной расстройке частот задающих генераторов обоих часов, вызванная гравитационным смещением частоты вследствие ненулевой разности высот размещения квантовых часов или распространением импульсов шкал времени по высоте вдоль радиоканала или ВОЛС.

Этапы измерений в квантовом нивелире.

Этап 1 – начальная калибровка. Два квантовых стандарта времени устанавливаются рядом на нулевой высоте (см. рис. 1, а), при этом гравитационное смещение начальной разности частот в силу нулевой разности высот часов отсутствует, т. е. $\Delta f_{гр} = 0$. На оба входа ИИБ-1, расположенного на этой же высоте, подаются импульсные последовательности шкал времени τ_0 , τ_m^0 частотой около 1 Гц. С учётом формулы (1) измеряемые разности шкал времени на выходе ИИБ-1 $\Delta\tau_1^H$, $\Delta\tau_2^H$, соответствующие начальному моменту при $\Delta\tau_0 = 0$ и моменту времени окончания интервала калибровки $\Delta\tau_0^K$, запишем как

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tau_1^H &= (\tau_m^0 - \tau_0)_1^H = \Delta\tau_k + \sigma_\tau^H; \\ \Delta\tau_2^H &= (\tau_m^0 - \tau_0)_2^H = \Delta\tau_k + C(\tau_0 - \tau_{0к}) + \sigma_\tau^H, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где σ_τ^H – случайная погрешность калибровки.

Из формулы (2) следует коэффициент относительной начальной технической расстройки

$$C = \frac{\Delta\tau_2^H - \Delta\tau_1^H}{\Delta\tau_0^K} + \sigma_\tau^K. \quad (3)$$

Этап 2 – перемещение КЧВ-М в точку измерений (на высоту $-H$) и соединение входов-выходов радиоканалов РК-1 и РК-2 с соответствующими выходами часов и входами ИИБ-1, ИИБ-2 (см. рис. 1, б). С учётом формулы (1) определим шкалу КЧВ-М в точке на высоте $-H$:

$$\tau_m^{-H} = \tau_0 + \Delta\tau_k + C\Delta\tau_0 + \Delta\tau_0 (f_{м.т}^{-H} - f_{м.т}^0)_{гр}/f_0, \quad (4)$$

где $f_{м.т}^0$, $f_{м.т}^{-H}$ – частоты задающего генератора КЧВ-М в точках на нулевой высоте и высоте $-H$ соответственно.

Согласно общей теории относительности соотношение между шкалами времени (интервалами собственного, или измеряемого, времени) неподвижных часов определяется разностью потенциалов гравитационного поля Земли φ_m^0 , φ_m^{-H} при размещении часов в точках с разными высотами. Для данного случая соотношение имеет вид [4]:

$$\frac{\tau_m^{-H}}{\tau_m^0} = 1 - \frac{\varphi_m^{-H} - \varphi_m^0}{c^2},$$

где c – скорость света; $\varphi_m^0 = \mu/R_3$; $\varphi_m^{-H} = \mu/(R_3 - H)$; μ – геоцентрическая гравитационная постоянная; R_3 – расстояние до центра Земли в точке установки опорных часов на нулевой высоте (радиус Земли); $-H$ – ортометрическая высота нижних часов относительно верхних (центробежными потенциалами в силу малой разности высот в планируемом эксперименте пока пренебрежём).

Эта формула определяет эффект замедления времени Эйнштейна: нижние часы, которые находятся в гравитационном поле Земли с большим по абсолютной величине потенциалом, замедляются (отстают), т. е. $\tau_m^{-H} - \tau_m^0 \leq 0$.

Кроме того, известно [6], что собственные (измеряемые) частоты задающих генераторов пары квантовых часов соотносятся прямо пропорционально интервалам собственного времени. Это означает, что уменьшение показаний шкалы собственного времени нижних часов сопровождается прямо пропорциональным уменьшением собственной частоты их задающего генератора:

$$\frac{\tau_m^{-H}}{\tau_m^0} = 1 - \frac{\varphi_m^{-H} - \varphi_m^0}{c^2} = 1 - \frac{\Delta\varphi}{c^2} = 1 - \frac{gH}{c^2} = \frac{f_{м.т}^{-H}}{f_{м.т}^0}, \quad (5)$$

где $\Delta\varphi = gH$; $g = \mu/R_3^2 \approx 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения в гравитационном поле Земли вблизи точки измерений на нулевой высоте.

Отсюда находим частоту импульсов ШВ-М в нижней точке:

$$f_{м.т}^{-H} = f_{м.т}^0 \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right) = (f_0 + \Delta f_{м.т}^0) \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right) \approx f_0 \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right), \quad (6)$$

где учтено, что $\Delta f_{м.т}^0 \ll f_0$. Как и ожидалось, частота следования импульсов шкалы КЧВ-М при замедлении времени уменьшилась на гравитационное красное смещение.

Гравитационный эффект смещения частоты задающих генераторов атомных часов применительно к спутниковым часам исследовал Н. Эшби [7]. В настоящее время для компенсации этого эффекта в значение частоты задающих генераторов бортовых спутниковых часов всех типов ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и др.) перед запуском заранее вносят корректирующее смещение с обратным знаком. В частности, для ГЛОНАСС относительная корректирующая поправка составляет $(-4,36 \cdot 10^{-10})$ [8], для GPS эта поправка равна $(-4,4647 \cdot 10^{-10})$ [7]. В настоящее время исследуется гравитационный эффект замедления в бортовых шкалах времени навигационных спутников GALILEO [9, 10] с точки зрения повышения точности его измерения.

Далее последовательность секундных импульсов шкалы КЧВ-М τ_m^{-H} с частотой задающего генератора $f_{м.т}^{-H}$ (6) подаётся на вход РК-1 и поступает на вход Вх2 ИИБ-1.

При передаче импульсной последовательности по радиоканалу «вверх» на вход Вх2 ИИБ-1 дополнительно возникает классический эффект гравитационного красного смещения частоты в радиоканале. Применительно к данному случаю, отношение интервалов собственного времени и собственных частот электромагнитной волны на концах трассы её распространения вверх (показано стрелками) определяется соотношением [4]:

$$\frac{\tau_M^{-H\uparrow}}{\tau_M^{0\uparrow}} = 1 - \frac{\varphi_M^{-H} - \varphi_M^0}{c^2} = 1 - \frac{gH}{c^2} = \frac{f_{M,T}^{0\uparrow}}{f_{M,T}^{-H\uparrow}}. \quad (7)$$

Соотношение (7) отличается от соотношения (5) тем, что собственные (измеряемые) частоты вдоль трассы волны связаны с интервалами собственного времени вверх и вниз обратно пропорциональной зависимостью. Однако в основе по-прежнему лежит эффект замедления времени Эйнштейна. Отсюда следует выражение для частоты импульсной последовательности на входе Вх2 ИИБ-1:

$$f_{M,T}^{0\uparrow} = f_{M,T}^{-H\uparrow} (1 - gH/c^2) \approx f_0 (1 - 2gH/c^2).$$

Здесь релятивистское красное смещение частоты имеет удвоенное значение, поскольку красное смещение частоты задающего генератора мобильных квантовых часов, возникающее при перемещении их вниз, складывается с классическим красным смещением частоты радиоизлучения при передаче его по радиоканалу вверх.

В результате выражение для шкалы времени КЧВ-М, составленной на вход Вх2 ИИБ-1, имеет вид

$$\tau_M^{0\uparrow} = \tau_0 + \Delta\tau_K - \tau_{TP}^{\uparrow} + (C - 2gH/c^2)\Delta\tau_0, \quad (8)$$

где $\tau_{TP}^{\uparrow}$ – задержка шкалы на трассе распространения в ВОЛС1.

С помощью ИИБ-1 измеряется рассогласование шкал времени $\tau_M^{0\uparrow}$ и τ_0 , которое в соответствии с (8) находят как

$$\Delta\tau_3^H = \tau_M^{0\uparrow} - \tau_0 = \Delta\tau_K - \tau_{TP}^{\uparrow} + (C - 2gH/c^2)\Delta\tau_0 + \sigma_{\tau}^H. \quad (9)$$

Одновременно на вход Вх2 ИИБ-2 подаётся последовательность импульсов ШВ $\tau_{M,T}^{-H}$, определяемая формулой (4), а на вход Вх1 ИИБ-2 – импульсная последовательность ШВ τ_0 , прошедшая через РК-2 и обозначенная $\tau_0^{\downarrow}$.

С учётом формулы (7) выражение (4) для шкалы τ_M^{-H} запишем в виде

$$\tau_M^{-H} = \tau_0 + \Delta\tau_K + (C - gH/c^2)\Delta\tau_0, \quad (10)$$

где произведением $\Delta f_{M,T}^0 gH/c^2$ пренебрежём, поскольку $\Delta f_{M,T}^0 \ll f_0$.

Шкалу времени $\tau_0^{\downarrow}$ на выходе РК-2 определим на основе формулы (1):

$$\tau_0^{\downarrow} = \tau_0 - \tau_{TP}^{\downarrow} + \Delta\tau_0 (f_0^{\downarrow} - f_0)/f_0, \quad (11)$$

где $f_0^{\downarrow}$ – частота импульсной последовательности ШВ КЧВ-С, снимаемой с выхода РК-2 (вниз).

Частоту $f_0^{\downarrow}$ найдём из соотношения (7) путём формальной замены обозначений частот импульсной последовательности в нижней и верхней точках РК-1: $f_{M,T}^{-H\uparrow} \rightarrow f_0^{\downarrow}$, $f_{M,T}^{0\uparrow} \rightarrow f_0$. На основе этого получим равенство $f_0^{\downarrow} = f_0 (1 + gH/c^2)$, откуда следует окончательный вид выражения (11):

$$\tau_0^{\downarrow} = \tau_0 - \tau_{TP}^{\downarrow} + \Delta\tau_0 gH/c^2. \quad (12)$$

На основе соотношений (10), (12) разность шкал времени, измеряемую с помощью ИИБ-2, определим как

$$\Delta\tau_4^H = \tau_M^{-H} - \tau_0^{\downarrow} = \Delta\tau_K + \tau_{TP}^{\downarrow} + (C - 2gH/c^2)\Delta\tau_0 + \sigma_{\tau}^H, \quad (13)$$

где член $-2gH/c^2$ означает относительное гравитационное красное смещение частоты, которое включает красное смещение частоты задающего генератора мобильных квантовых часов, возникающее при перемещении их вниз, а также классическое фиолетовое смещение частоты радиоизлучения при передаче его по ВОЛС-2 сверху вниз.

Далее суммируем результаты измерений (9), (13) и получим формулу, где эффекты гравитационного красного смещения в двух каналах измерения складываются:

$$\Delta\tau_{\Sigma}^H = \Delta\tau_3^H + \Delta\tau_4^H = 2\Delta\tau_K + (\tau_{TP}^{\downarrow} - \tau_{TP}^{\uparrow}) + (2C - 4gH/c^2)\Delta\tau_0 + \sqrt{2}\sigma_{\tau}^H.$$

С учётом результата измерения интервала калибровки (2), а также условия $\tau_{TP}^{\uparrow} = \tau_{TP}^{\downarrow}$ что вполне достижимо при встречной передаче импульсных последовательностей ШВ-0 и ШВ-М по одной и той же ВОЛС, окончательно получим

$$\Delta\tau_{\Sigma}^H = \Delta\tau_3^H + \Delta\tau_4^H - 2\Delta\tau_1^H = (2C - 4gH/c^2)(\tau_0 - \tau_0^K) + \sqrt{3}\sigma_{\tau}^H.$$

Из приведённой выше формулы находят искомую ортометрическую высоту H и соответствующую разность потенциалов $\Delta\varphi = gH$ между точками размещения атомных часов. При этом все измерения, выполняемые ИИБ-1 и ИИБ-2, принимают равноточными, а коэффициент технической расстройки C определяется формулой (3).

При соблюдении условия $\Delta\tau_K + (\tau_{TP}^{\downarrow} - \tau_{TP}^{\uparrow}) \approx \text{const}$ наиболее простое решение заключается в вычислении производной $\Delta\tau_{\Sigma}^H$ по текущему времени τ_0 :

$$d(\Delta\tau_{\Sigma}^H)/d\tau_0 = 2C - 4gH/c^2 + \sigma_{\text{пр}},$$

где второй член в правой части определяет относительное значение гравитационного красного смещения частоты; $\sigma_{\text{пр}}$ – погрешность вычисления производной.

Отсюда найдём высоту и разность потенциалов

$$H = \frac{c^2}{4g} \left(2C - \frac{d}{d\tau_0} \Delta\tau_{\Sigma}^H + \sigma_{\text{пр}} \right); \quad \Delta\varphi = gH.$$

Состав оборудования и результаты эксперимента. Эксперимент проходил в одном здании, где на 6 этаже (нулевой уровень) установлены базовые квантовые часы КЧВ-С, а на

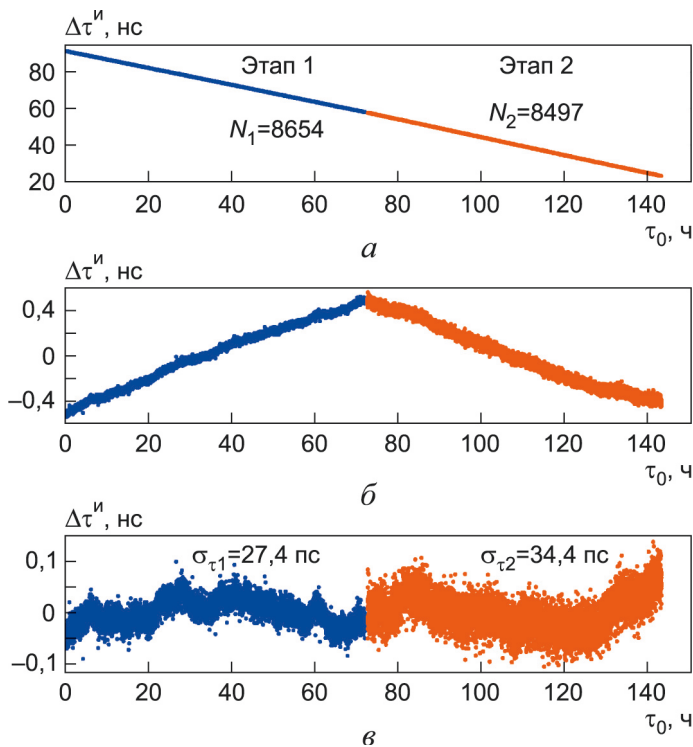


Рис. 2. Результаты измерений:
а – общий график рассогласования шкал времени; б – расхождение шкал без линейной составляющей; в – случайные погрешности оценки расхождения шкал часов для двух этапов эксперимента

Fig. 2. Results of measurements:
а – a general graph of the time scale mismatch; б – divergence of scales without a linear component; в – random errors in estimating the clock's timescale difference for two stages of the experiment

–1 этаже (на высоте –34 м) – перебазируемые часы КЧВ-М. Схема измерений соответствует рис. 1, однако используется лишь одно плечо с ИИБ-1 и радиоканал на основе ВОЛС-1. В качестве стационарных (базовых) квантовых часов КЧВ-С использовали активный водородный стандарт частоты и времени Ч1-1003М, расположенный в термокамере с суточными вариациями температуры не более 0,1 °С. Относительная суточная нестабильность частоты задающего генератора Ч1-1003М в таких условиях составляет (0,5–0,7)·10^{–15}. В качестве мобильных (возимых) квантовых часов применяли перевозимый активный водородный стандарт частоты и времени ПКЧ-Н (ЗАО «Время-Ч», Россия) с суточной нестабильностью около 1·10^{–15}. В качестве ИИБ-1,2 служили измерители интервалов времени Keysight 53230A (Keysight, США), причём ИИБ-1 устанавливали на нулевом уровне (нулевой высоте) вблизи КСЧ-С, а ИИБ-2 – на этаже –1 на высоте –34 м. Шкалы времени обоих квантовых часов имеют вид последовательности секундных меток, следующих с частотой 1 Гц. Для передачи секундных меток использовали одномодовое оптическое волокно типа SMF-28 с рабочей длиной волны 1310 нм. Для модуляции и демодуляции оптической несущей импульсными последовательностями частотой 1 Гц, снимаемых с КЧВ-С и КЧВ-М, применяли лазерные и фотоприёмные модули ВОЛМ-10 и ВОФМ-10. Импульсы шкал времени от КЧВ-С и КЧВ-М подавали на входы

Вх1 и Вх2 соответственно ИИБ-1. Разность шкал времени измеряли с периодом 1 раз в 30 секунд.

Эксперимент проводили в два этапа. На этапе 1 начальной калибровки в точке на нулевой высоте рядом устанавливали стационарный и мобильный квантовые стандарты времени и ИИБ-1, на оба входа которого подавали импульсные последовательности частотой около 1 Гц, реализующие шкалы времени τ_0 и τ_m^0 . Согласно формуле (2) измеряемая текущая калибровочная разность шкал времени $\Delta\tau_k^и$ составила

$$\Delta\tau_k^и = \Delta\tau_k + C\Delta\tau_0 + \sigma_{\tau}^к. \quad (14)$$

Количество накопленных 30-секундных измерений за трое суток (72 ч) на этапе 1 составило $N_1=8645$. Графики изменения рассогласования шкал подвижных и стационарных квантовых часов в текущем времени для двух этапов приведены на рис. 2: общая картина (рис. 2, а); графики, в которых для наглядности устранена единая для всего цикла измерений линейная составляющая (рис. 2, б); случайные отклонения расхождений шкал времени для двух этапов эксперимента, а также оценки средне-квадратичных погрешностей измерений $\sigma_{\tau 1}$, $\sigma_{\tau 2}$ (рис. 2, в).

Поделив обе части уравнения (14) на интервал измерений $\Delta\tau_0$ при условии $\Delta\tau_k = \text{const}$, получим скорость изменения измеряемого интервала:

$$\Delta\dot{\tau}_k^и \approx \Delta\tau_k^и / \Delta\tau_0 = C + \sigma_{\tau 1} / \Delta\tau_0, \quad (15)$$

где $\sigma_{\tau 1}=0,027$ нс – случайная погрешность измерения разности времени на этапе 1 – этапе калибровки.

По результатам статистической обработки текущих измерений на этапе 1 средняя скорость изменения взаимного смещения шкал времени КЧВ-С и КЧВ-М составила $\Delta\dot{\tau}_k^и = (-11,096 \pm 0,027)$ нс/сут.

На этапе перемещения вниз на высоту –34 м часов КЧВ-М и подключения ВОЛС к выходу КЧВ-М и входу ИИБ-1 измеряли текущее рассогласование ШВ на входах ИИБ-1 с учётом формулы (9):

$$\Delta\tau_{\text{ВОЛС}}^и = \tau_m^0 - \tau_0 = \Delta\tau_k - \tau_{\text{тр}}^{\uparrow} + (C - 2gH/c^2)\Delta\tau_0 + \sigma_{\tau 2}. \quad (16)$$

Поделив обе части уравнения (16) на интервал измерений $\Delta\tau_0$ при условии $\Delta\tau_k - \tau_{\text{тр}}^{\uparrow} = \text{const}$, получим скорость изменения интервала

$$\Delta\dot{\tau}_{\text{ВОЛС}}^и = C - 2gH/c^2 + \sigma_{\tau 2} / \Delta\tau_0, \quad (17)$$

где $\sigma_{\tau 2}=0,034$ нс согласно рис 2, в.

По результатам статистической обработки текущих измерений в количестве $N_2=8497$ на интервале трое суток на этапе 2 эксперимента (см. рис. 2, б) средняя скорость изменения взаимного смещения двух шкал времени, определяемая формулой (17), составила $\Delta\dot{\tau}_{\text{ВОЛС}}^и = (-11,743 \pm 0,034)$ нс/сут. С учётом равнозначности измерений на этапах 1 и 2 ($\sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2} \approx 0,031$ нс = σ_{τ}) из уравнений (17) и (15) получим искомую разность производных (16) и (15):

$$\Delta\dot{\tau}_{\text{ВОЛС}}^и - \Delta\dot{\tau}_k^и = -2gH/c^2 + \sqrt{2}\sigma_{\tau} / \Delta\tau_0. \quad (18)$$

Примем во внимание скорости изменения рассогласований и получим

$$\Delta \dot{\tau}_{\text{ВОЛС}}^{\text{И}} - \Delta \dot{\tau}_{\text{К}}^{\text{И}} = (-7,5 \pm 0,17) \cdot 10^{-15}.$$

Из формулы (18) при тех же исходных данных найдём измеряемое значение высоты мобильных часов: $H_{\text{и}} = (-34,0 \pm 0,8)$ м.

Заключение. Впервые проведена оценка возможностей квантового нивелира, основанного на эффекте замедления времени и использующего наземные линии связи при одностороннем и дуплексном режимах измерений. Аналитически определён и экспериментально измерен суммарный эффект замедления времени в дуплексной измерительной линии с использованием односторонней радиолнии, реализованной на основе ВОЛС, а также стационарных и перебазированных квантовых водородных часов с относительными нестабильностями соответственно $(0,5-0,7) \cdot 10^{-15}$ и $1 \cdot 10^{-15}$. Экспериментально установлено, что на входе измерителя временных интервалов удваивается гравитационное красное смещение частоты. Вычисленная по результатам измерений высота перемещения квантовых водородных часов составила $H_{\text{и}} = (-34,0 \pm 0,8)$ м при действительной высоте -34 м.

Список источников

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1967. 460 с.
2. Фатеев В. Ф., Сысоев В. П., Рыбаков Е. А. Экспериментальное измерение гравитационного эффекта замедления времени с помощью перевозимых квантовых часов // Измерительная техника. 2016. № 4. С. 41–43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2016-4-41-43>
3. Фатеев В. Ф., Жариков А. И., Сысоев В. П., Рыбаков Е. А., Смирнов Ф. Р. Об измерении разности гравитационных потенциалов Земли с помощью перевозимых квантовых часов // ДАН. 2017. Т. 472. № 2. С. 206–209.
4. Фатеев В. Ф., Рыбаков Е. А. Экспериментальная проверка квантового нивелира на мобильных квантовых часах // ДАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 496. № 1. С. 41–44.
5. Фатеев В. Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени. Монография. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2017. 439 с.
6. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. / Пер. с англ. Ю. С. Домнина под ред. В. М. Татаренкова с дополнением (глава 10) М. Б. Кауфмана. М.: Техносфера, 2002. 400 с.

7. Ashby N., Relativity in the Global Positioning System, *Living Reviews in Relativity*, 2003, vol. 6, pp. 1–42.

8. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1). 2008. URL: https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (дата обращения: 28.12.2021).

9. Herrmann S., Finke F., Lulf M., et. al., Test of the Gravitational Redshift with Galileo Satellites in an Eccentric Orbit, December 24, 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1812.09161.pdf> (дата обращения: 28.12.2021).

10. Delva P., Puchades N., Schönemann E., et. al, *Physical Review Letters*, 2018, vol. 121, 231101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.231101>

References

1. Landau L. D., Lifshic E. M., *Teoriya polya*, Moscow, Nauka Publ., 1967, 460 p. (In Russ.)
2. Fateev V. F., Sysoev V. P., Rubakov E. A., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 4, pp. 402–404. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0979-0>
3. Fateev V. F., Zharikov A. I., Sysoev V. P., Rubakov E. A., Smirnov F. R., *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 472, pt. 1, pp. 91–94. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17010147>
4. Fateev V. F., Rybakov E. A., *Doklady Physics*, 2021, vol. 66, pt. 1, pp. 17–19. <https://doi.org/10.1134/S1028335820110038>
5. Fateev V. F., *Relyativistskaya metrologiya okolozemnogo prostanstva-vremeni: monografiya*, Mendeleev, VNIIFTRI Publ., 2017, 439 p. (In Russ.)
6. Oduan K., Gino B., *Izmerenie vremeni. Osnovy GPS*, Translated from Eng. Yu. S. Domnin, ed. V. M. Tatarenkov, with an addendum (Pt. 10) M. B. Kaufman, Moscow, Tekhnosfera Publ., 2002, 400 p. (In Russ.)
7. Ashby N., Relativity in the Global Positioning System, *Living Reviews in Relativity*, 2003, vol. 6, pp. 1–42.
8. GLONASS Interface control document, Edition 5.1, 2008, available at: https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (accessed: 28.12.2021).
9. Herrmann S., Finke F., Lulf M., et. al., Test of the Gravitational Redshift with Galileo Satellites in an Eccentric Orbit, December 24, 2018, available at: <https://arxiv.org/pdf/1812.09161.pdf> (accessed: 28.12.2021).
10. Delva P., Puchades N., Schönemann E., et. al., *Physical Review Letters*, 2018, vol. 121, 231101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.231101>

Статья поступила в редакцию 20.12.2021; одобрена после рецензирования 28.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.
The article was submitted 20.12.2021; approved after reviewing 28.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

Исследование макета ватт-весов с верхним пределом измерений 10 грамм

Сергей Викторович Медведевских¹, Константин Владимирович Чекирда²✉

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

¹s.v.medvedevskih@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3084-1612>

²k.v.chekirda@vniim.ru✉

Аннотация. Описаны основные системы и узлы макета ватт-весов, созданного во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева в рамках научно-исследовательской работы «Баланс». Показаны результаты исследований характеристик систем и узлов макета ватт-весов при работе в различных режимах. Исследования проведены с использованием современной высокоточной аппаратуры и методов обработки результатов измерений. Определены основные направления работ по совершенствованию методов измерения массы с помощью ватт-весов.

Ключевые слова: макет ватт-весов, килограмм, воспроизведение единицы, магнитное поле, эффект Холла, эффект Джозефсона, статический режим ватт-весов, динамический режим ватт-весов

Финансирование: работа выполнена в рамках НИР «Исследование путей создания эталона килограмма на основе ватт-весов», шифр «Баланс» (государственный контракт № 120-85/2020 от 15.09.2020 г.).

Для цитирования: Медведевских С. В., Чекирда К. В. Исследование макета ватт-весов с верхним пределом измерений 10 грамм // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 28–33. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-28-33>

Research on a watt-weights layout with an upper measurement limit of 10 grams

Sergej V. Medvedevskih¹, Konstantin V. Chekirda²✉

^{1, 2} D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), Russia, St. Petersburg

¹s.v.medvedevskih@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3084-1612>

²k.v.chekirda@vniim.ru✉

Abstract. The main systems and elements of the watt balance layout created in D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM) as part of the research work “Balans” are described. The research results of the characteristics of the systems and elements of the watt-weights layout when working in different modes are shown. The researches were realized using modern high-precision equipment and methods of measurement results processing. The main work directions for upgrading the methods of mass measurement using watt-weights are defined.

Keywords: watt-weights layout, kilogram, reproduction (of a unit), magnetic field, Hall effect, Josephson effect, watt-weights static mode, watt-weights dynamic mode

Financial Support: the work was supported by research work “Studying the ways to create a primary standard of kilogram based on watt-weights”, codename “Balance” (state contract No. 120-85/2020 dated September 15, 2020).

Введение. В настоящее время одна из самых актуальных задач, стоящая перед отечественными метрологическими институтами, – создание ватт-весов как основного оборудования для воспроизведения единицы массы в соответствии с новым определением, принятым на 26-й Генеральной конференции по мерам и весам в 2018 г. Ватт-весы представляют собой весоизмерительный комплекс оборудования с помощью которого сравнивается электрическая мощность с механической. Название ватт-весы, или весы Киббла, получили по фамилии английского физика Брайана Киббла, предложившего в 1975 г. данный метод. Существенные достижения в квантовой

физике помогли превратить ватт-весы в инструмент, способный реализовать единицу массы через фундаментальную физическую константу – постоянную Планка [1, 2].

Разрабатываемые мировым научным сообществом ватт-весы имеют разные принципы реализации, несмотря на единую идеологию измерения массы через измерение электрической мощности. На сегодняшний день не существует двух одинаковых ватт-весов, все они уникальны по конструкции и принципу действия. Поиск всевозможных технических решений свидетельствует о том, что оптимальная конфигурация ватт-весов пока не сформирована [3–5].



Рис. 1. Макет ватт-весов на основе равноплечной рычажной системы и аэростатической опоры

Fig. 1. Layout view of the watt balance based on the equal-arm lever system and aerostatic support

С целью формирования научно-технического и технико-экономического задела для создания электроизмерительной, механической и вакуумной систем ватт-весов во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в 2021 г. проведены работы в рамках НИР «Баланс» по макетированию и исследованию отдельных составных частей ватт-весов с верхним пределом взвешивания до 10 г. Объектами разработки и исследования стали электромагнитная, электроизмерительная, механическая и вакуумная составные части ватт-весов. На основе разработки указанных составных частей изготовлен и исследован макет ватт-весов, позволивший более полно понять процессы и алгоритмы реализации единицы массы в соответствии с новым определением. Внешний вид макета ватт-весов (далее – макет) представлен на рис. 1. Детализированный внешний вид или схемы составных частей, кроме вакуумной (поскольку исследование вакуумной системы проводилось для перспективного построения основного эталона килограмма), представлены далее.

Электромагнитная система макета. Одним из ответственных элементов макета является электромагнитная система. Электромагнитной системой обычно называют создающее магнитное поле устройство и расположенную в этом поле катушку, осуществляющую силовое воздействие на груз. В общемировой практике при реализации ватт-весов к магнитному полю предъявляется ряд требований. Магнитное поле должно быть сильным, с высокой степенью однородности, стабильным и нечувствительным к электрическому току, протекающему в катушке [6, 7]. Как правило, в магнитных системах реализуется радиальное магнитное поле, значение магнитной индукции которого обычно изменяется как r^{-1} , где r – радиус цилиндрической магнитной системы. При таком типе поля величина BL (B – индукция

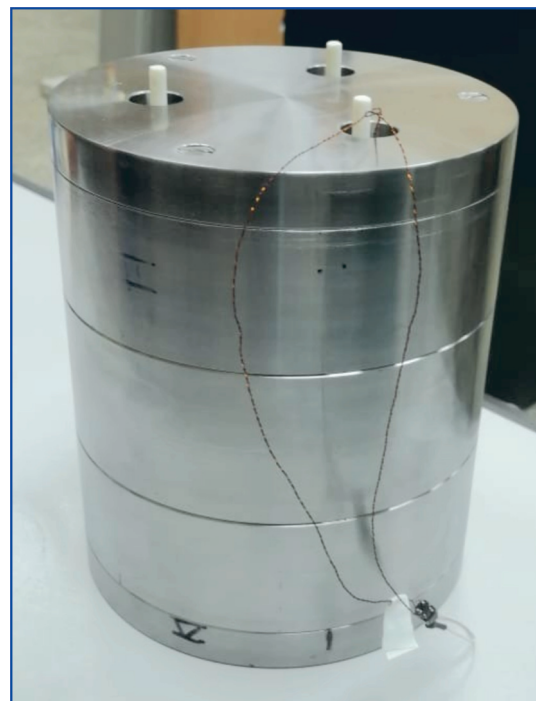


Рис. 2. Внешний вид электромагнитной системы макета

Fig. 2. The outer view of the electromagnetic system of the layout

магнитного поля, L – длина провода катушки) должна оставаться постоянной, например, при изменении геометрических размеров катушки в случае изменения температуры. Геометрический фактор BL электромагнитной системы – важный параметр ватт-весов. Стабильность BL определяет точность измерений в динамической фазе, когда токоизмерительная катушка перемещается с постоянной скоростью в зазоре магнита.

Разработанная совместно с Уралским федеральным университетом имени первого Президента России Б. Н. Ельцина электромагнитная система макета состоит из магнитной системы и токоизмерительной катушки [8]. Внешний вид электромагнитной системы макета приведён на рис. 2.

Конструкция магнитной системы макета: два постоянных магнита системы Nd-Fe-B намагничены навстречу друг другу, и их магнитный поток направляется через магнитопровод из низкоуглеродистой стали через тороидальный воздушный зазор шириной 7 мм и высотой 30 мм. Сверху и снизу система закрыта крышками из низкоуглеродистой стали, из которой сделан магнитопровод. В каждой крышке три отверстия, через которые выходят крепления катушки, расположенной внутри системы.

Токоизмерительная катушка представляет собой каркас из полилактида с нанесёнными на него двумя обмотками из

Таблица 1

Результаты измерений постоянной BL

Дата	BL , В·с/м
05.10.2021	21,22041
06.10.2021	21,22014
07.10.2021	21,22045
08.10.2021	21,22049
09.10.2021	21,22014
10.10.2021	21,22009
11.10.2021	21,22002
12.10.2021	21,21923
13.10.2021	21,21973
14.10.2021	21,22042

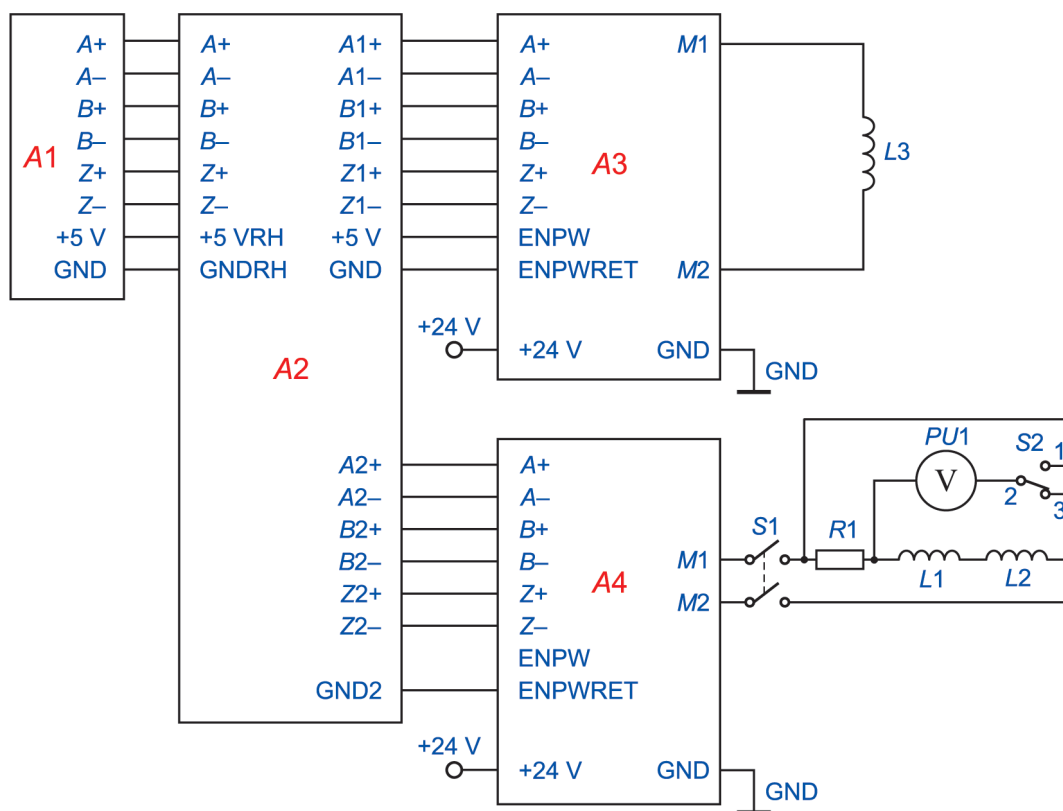


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема макета электроизмерительной аппаратуры для измерения электрического напряжения, электрического сопротивления с прослеживаемостью результатов измерений к эталонам на квантовых эффектах Джозефсона и Холла:

PU1 – прецизионный мультиметр Keysight 3458A или Fluke 8858A; R1 – эталонная мера сопротивления (100 или 10 Ом); L1, L2 – измерительные катушки электромагнитного узла, для которых определяется BL и сила тока; L3 – актуатор динамического режима; A1, A2, A3, A4 – линейный энкодер, сплиттер, контроллеры динамического и статического режимов соответственно

Fig. 3. Circuit diagram of the layout of electrical measuring equipment used to measure the electrical voltage, electrical resistance with traceability of measurement results to standards based on Josephson and Hall quantum effects:

PU1 – precision multimeter Keysight 3458A or Fluke 8858A; R1 – a standard measure of resistance (100 Ω or 10 Ω); L1, L2 – measuring coils for the electromagnetic block, for which BL and current are determined; L3 – dynamic mode actuator; A1 – linear encoder; A2 – splitter; A3 – dynamic mode controller; A4 – static mode controller

медного лакированного провода диаметром 0,2 мм. Каждая обмотка нанесена в два слоя виток к витку. Выводы зафиксированы на каркасе катушки. Катушка имеет по три тяги в каждом направлении для обеспечения подвеса в макете ватт-весов и расположения чашек весов. Две обмотки в катушке сделаны для экспериментального уточнения влияния магнитного поля тока в процессе взвешивания на изменение постоянной BL . В табл. 1 приведены результаты измерений BL электромагнитной системы макета ватт-весов. Максимальное отклонение от среднего составляет 0,000882 В·с/м или 0,004 %. Параметр BL стабилен, флуктуации носят случайный характер.

Электроизмерительная система макета. При реализации метода измерений с применением ватт-весов для расчёта массы необходимы две физические постоянные – Джозефсона и фон Клитцинга. Поэтому макет электроизмерительной аппаратуры для измерений электрического напряжения и электрического сопротивления должен обеспечивать прослеживаемость результатов измерений к эталонам на квантовых эффектах Джозефсона (Государственный первичный эталон

единицы электрического напряжения ГЭТ 13-01) и Холла (Государственный первичный эталон единицы электрического сопротивления ГЭТ 14-2014).

Для исследования характеристик электроизмерительной системы макета разработана принципиальная электрическая схема (рис. 3). Мультиметр предназначен для измерений электрического напряжения в катушке в динамическом режиме и падения напряжения на мере сопротивления в статическом режиме. Мера сопротивления предназначена для измерений силы тока в обмотке при взвешивании массы в статическом режиме измерений. Для обеспечения минимального пассивного термостатирования мера установлена в ёмкость с трансформаторным маслом.

Использование мер различного номинала (10 или 100 Ом) позволило оценить работу макета в разных диапазонах измеряемых постоянных напряжений, что, в свою очередь, дало возможность выбора оптимальных режимов работы прецизионного мультиметра и минимизацию погрешности передачи единиц электрических величин от эталонов на

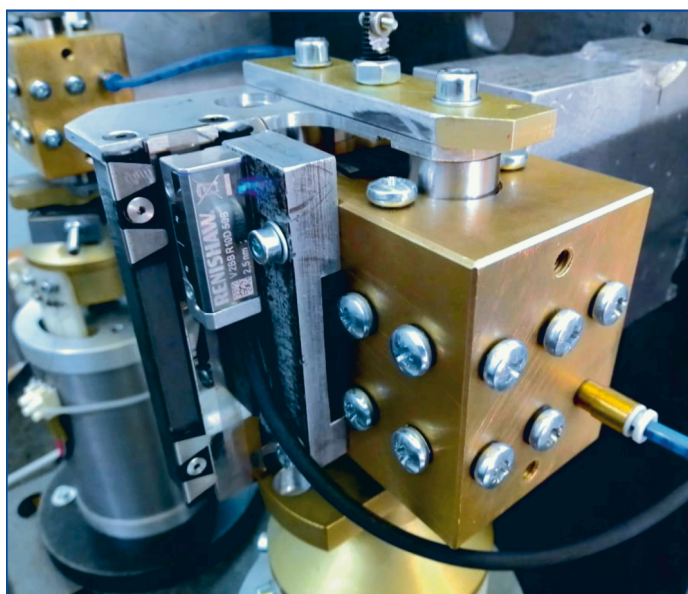


Рис. 4. Внешний вид механической системы макета с аэроэстатической направляющей и линейным преобразователем перемещения

Fig. 4. The outer view of the mechanical system of the layout with an aerostatic motion guide and a linear transducer

основе квантовых эффектов Джозефсона (ГЭТ 13-01) и Холла (ГЭТ 14-2014) [9, 10].

Калибровку мультиметра Fluke 8588A производили в соответствии с документом СК 03-2201-05-Т «Методика калибровки вольтметров постоянного напряжения», что обеспечило прослеживаемость результатов измерений напряжения к эталону на эффекте Джозефсона (ГЭТ 13-01). Результаты калибровки приведены в табл. 2, где U – действительное значение напряжения, $U_{\text{изм}}$ – измеренное напряжение, u_p – расширенная неопределённость, ΔU – предел допускаемой абсолютной погрешности.

Калибровка меры сопротивления МС3003 с номинальным сопротивлением 10 Ом из состава макета произведена в соответствии с документом СК 03-2202-003-Т-15 «Методика калибровки мер электрического сопротивления». Результаты калибровки меры сопротивления МС3003 (№ 006): номинальное значение сопротивления $R_{\text{ном}} = 10$ Ом, измерительный ток $I = 10$ мА, действительное значение меры сопротивления $R = 9,9999877$ Ом, относительная расширенная неопределённость (при коэффициенте охвата $k = 2$) $1,0 \cdot 10^{-7}$.

В результате калибровки обеспечена прослеживаемость к государственному первичному эталону на эффекте Холла (ГЭТ 14-2014).

Исследования макета. Созданный макет на основе равноплечной рычажной системы предназначен для реализации и исследований перспективных технических решений в упрощённых условиях – при взвешивании массы номиналом менее 10 г влияние сил Архимеда мало, что позволяет производить измерения при естественном атмосферном давлении воздуха.

Макет на основе равноплечной рычажной системы и аэроэстатической опоры обеспечивает работу в двух режимах:

Таблица 2

Результаты калибровки мультиметра

U , мВ	$U_{\text{изм}}$, мВ	u_p , мкВ	ΔU , мкВ
Поддиапазон измерений 100 мВ			
10	9,99992	0,1	$\pm 0,36$
–10	–9,99975	0,1	$\pm 0,36$
–100	99,99996	0,3	$\pm 1,22$
–100	–99,99969	0,3	$\pm 1,22$
200	199,99959	0,5	$\pm 2,18$
–200	–199,99917	0,5	$\pm 2,18$
Поддиапазон измерений 1000 мВ			
$0,1 \cdot 10^3$	$0,09999993 \cdot 10^3$	0,3	$\pm 0,91$
$-0,1 \cdot 10^3$	$-0,10000036 \cdot 10^3$	0,3	$\pm 0,91$
$1 \cdot 10^3$	$0,9999990 \cdot 10^3$	2	$\pm 5,59$
$-1 \cdot 10^3$	$-1,0000013 \cdot 10^3$	2	$\pm 5,59$
$2 \cdot 10^3$	$1,9999984 \cdot 10^3$	4	$\pm 10,79$
$2 \cdot 10^3$	$2,0000003 \cdot 10^3$	4	$\pm 10,79$
Поддиапазон измерений 10000 мВ			
$1 \cdot 10^3$	$0,9999990 \cdot 10^3$	3	$\pm 5,8$
$-1 \cdot 10^3$	$-0,9999990 \cdot 10^3$	3	$\pm 5,8$
$10 \cdot 10^3$	$9,999985 \cdot 10^3$	10	$\pm 52,6$
$-10 \cdot 10^3$	$9,999981 \cdot 10^3$	10	$\pm 52,6$

Таблица 3

Исследования воспроизводимости ЭДС индукции

v , мкм/с	$E_{\text{ср}}$, мВ	$E_{\text{ш}}$, мВ	E_{max} , мВ	f , Гц	$E_{\text{ш}}/E_{\text{ср}}$	$E_{\text{max}}/E_{\text{ср}}$
50	1,060	0,096	0,060	1,58	0,090	0,056
100	2,130	0,107	0,097	1,58	0,050	0,046
500	10,600	0,089	0,074	2,11	0,008	0,007
1000	21,300	0,131	0,083	2,11	0,006	0,004
3000	63,800	0,099	0,062	1,58	0,002	0,001

динамическом и статическом. Динамический режим измерений обеспечивает точные измерения параметров электромагнитного поля, используемые в качестве входящих параметров в режиме взвешивания (статический режим измерений).

Важные измерительные параметры, влияющие на точность измерений массы, – точность воспроизведения электродвижущей силы (ЭДС) и выбор оптимальной скорости перемещения катушки в динамическом режиме [11]. В качестве преобразователя линейного перемещения в системе управления макета использовали линейный энкодер Renishaw V2BBR10D50B. Внешний вид механической системы макета с аэроэстатической направляющей и линейным преобразователем перемещения представлен на рис. 4. Данное устройство выполняет одновременно функцию датчика линейного перемещения. В дальнейшем в качестве датчика перемещения предполагается использовать линейный интерферометр, что значительно улучшит точность измерений скорости перемещения катушки.

Воспроизводимость ЭДС индукции исследовали на различных скоростях перемещений катушки. ЭДС индукции измеряли с частотой 20 Гц в течение всего процесса перемещения. Получены следующие значения: среднее значение

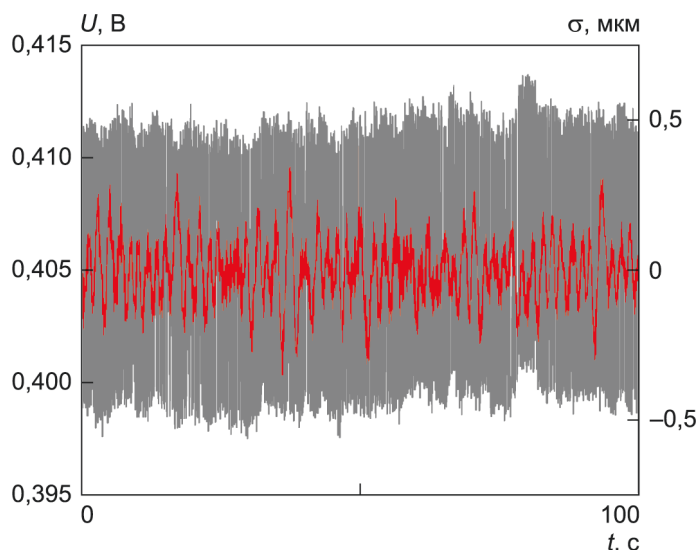


Рис. 5. Зависимость падения напряжения U (серый цвет) на мере сопротивления и отклонения σ (красная кривая) от заданного положения при вывешивании гири массой 10 г

Fig. 5. Dependence of the voltage drop on the resistance measure and the deviation from the set position when hanging a weight of 10 g

ЭДС $E_{\text{ср}}$, амплитуда шума $E_{\text{ш}}$, максимальная амплитуда E_{max} . По результатам измерений оценены соотношения $E_{\text{ш}}/E_{\text{ср}}$, $E_{\text{max}}/E_{\text{ср}}$ для всех скоростей. Результаты исследований приведены в табл. 3, где v – скорость, f – частота максимальной гармоники.

Отклонение значения ЭДС от постоянного значения носит случайный характер. В связи с этим возможно повышение точности измерений методами статистического анализа. Можно заметить, что для скоростей более 500 мкм/с уровень шума резко падает.

Для исследования статического режима (режима взвешивания) проверен диапазон компенсации силы тяжести при взвешивании массы 10 г. Получены результаты стабильного поддержания в поле тяжести в режиме взвешивания катушки с установленной гирей 10 г и падения напряжения на мере сопротивления. Зависимость падения напряжения на мере сопротивления и отклонения от заданного положения при вывешивании гири массой 10 г представлены на рис. 5.

Амплитуда отклонения от заданного положения не превышает 0,35 мкм. Характер перемещений соответствует случайному шуму. Для улучшения результата измерений необходимо улучшать условия измерений в части уменьшения влияния вибрации Земли на движение катушки относительно магнита, так как это вызывает шумовые напряжения в катушке. Если измерения скорости и напряжения производятся с полосой пропускания большей, чем у помех со стороны колебаний грунта, их соотношение может не зависеть от шума, создаваемого вибрацией. Это условие устанавливает нижний предел полосы пропускания входного каскада системы измерения напряжения от нескольких сотен герц до 1 кГц. Обычно сигналы скорости и напряжения интегрируются за один и тот же период, а отношение среднего напряжения к средней скорости определяется подбором данных методом наименьших

квадратов. Кроме того, применение лазерной интерференционной системы измерений перемещений элементов watt-весов позволит измерять это движение и учитывать его при согласовании напряжения и скорости. Точность таких измерений перемещений может быть достигнута на уровне менее 0,3 нм и иметь прослеживаемость к Государственному первичному эталону единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 [12].

Выводы. Достижение высокой точности воспроизведения единицы массы на основе watt-весов при проведении двух независимых стадий измерения входных величин в уравнении измерения массы как в статическом, так и в динамическом режимах измерений требует применения в watt-весах самосогласованной системы управления магнитным полем и перемещениями движущихся частей watt-весов с учётом случайного во времени и пространстве характера физических процессов, происходящих при измерениях.

Результаты применения в макете watt-весов с верхним пределом измерений до 10 г разработанной в рамках НИР «Баланс» системы управления показали её высокую эффективность и возможность применения при разработке и проектировании составной части государственного первичного эталона единицы массы на основе watt-весов.

Список источников

1. Kibble B. P., Robinson I. A., *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 2, pp. S132–S139. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/51/2/S132>
2. Thomas M., Ziane D., Pinot P., Karcher R., Imanaliev A., Pereira Dos Santos F., Merlet S., Piquemal F., Espel P., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 4, p. 468–480. <http://dx.doi.org/10.1088/1681-7575/aa7882>
3. Schlamminger S., Pratt J., Newell D., Seifert F., Haddad D., Liu M., Chao L., Peña-Pérez L. M., Li S., Design of a table-top watt balance, *NCLSI Workshop and Symposium*, St. Paul, MN, [online], available at https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=920800 (accessed: November 24, 2021).
4. Fang H., Kiss A., E. de Mirandés, Lan J., Robertsson L., Solve S., Picard A., Stock M., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, vol. 62, no. 6, pp. 1491–1498. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2012.2225930>
5. Baumann H., Eichenberger A., Cosandier F., Jeckelmann B., Clavel R., Reber D., Tommasini D., *Metrologia*, 2013, vol. 50, no. 3, p. 235–242. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/3/235>
6. Wood B. M., Sanchez C. A., Green R. G., Liard J. O., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 3, p. 399–409. <http://dx.doi.org/10.1088/1681-7575/aa70bf>
7. Sutton C. M., Clarkson M. T., *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 2, pp. 101–106. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/51/2/S101>
8. Волегова Е. А., Андреев С. В., Кудреватых Н. В., Мальцева В. Е., Маслова Т. И., Незнахин Д. С., Сердюков С. В., Уржумцев А. Н., Волегов А. С. Электромагнитная система для реализации единицы массы // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 48–55. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-48-55>
9. Катков А. С., Ловцюс В. Э. Компактный эталон сравнения на эффекте Джозефсона с выходным напряжением 10 В // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 41–45.

10. Катков А., Солве С. Ключевые сличения эталонов вольт ВНИИМ и МБМВ // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 70–73.

11. Марков А. Ф., Хвостов В. А. Алгоритм синхронизации результатов измерений положения электромеханической системы и электродвижущей силы индукции при реализации динамического режима весов Киббла // Измерительная техника. 2022. № 1. С. 41–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-41-45>

12. Акимова Т. П., Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Федорин В. Л., Фомкина З. В., Чекирда К. В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-3-7>

References

1. Kibble B. P., Robinson I. A., *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 2, pp. S132–S139. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/51/2/S132>

2. Thomas M., Ziane D., Pinot P., Karcher R., Imanaliev A., Pereira Dos Santos F., Merlet S., Piquemal F., Espel P., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 4, p. 468–480. <http://dx.doi.org/10.1088/1681-7575/aa7882>

3. Schlamminger S., Pratt J., Newell D., Seifert F., Haddad D., Liu M., Chao L., Peña-Pérez L. M., Li S., Design of a table-top watt balance, *NCLSI Workshop and Symposium*, St. Paul, MN, [online], available at https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=920800 (accessed: November 24, 2021).

4. Fang H., Kiss A., E. de Mirandés, Lan J., Robertsson L., Solve S., Picard A., Stock M., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, vol. 62, no. 6, pp. 1491–1498. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2012.222593>

5. Baumann H., Eichenberger A., Cosandier F., Jeckelmann B., Clavel R., Reber D., Tommasini D., *Metrologia*, 2013, vol. 50, no. 3, p. 235–242. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/3/235>

6. Wood B. M., Sanchez C. A., Green R. G., Liard J. O., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 3, p. 399–409. <http://dx.doi.org/10.1088/1681-7575/aa70bf>

7. Sutton C. M., Clarkson M. T., *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 2, pp. 101–106. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/51/2/S101>

8. Volegova E. A., Andreev S. V., Kudrevatykh N. V., Maltseva V. E., Maslova T. I., Neznakhin D. S., Serdiukov S. V., Urzhumtsev A. N., Volegov A. S., *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2021, no. 12, pp. 48–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-48-55>

9. Katkov A. S., Lovtsyus V. E., *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, no. 7, pp. 801–807. <https://doi.org/10.1007/s11018-011-9807-8>

10. Katkov A. S., Solve S., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 54, no. 11, pp. 1313–1318. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9873-6>

11. Markov A. F., Khvostov V. A., *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2022, no. 1, pp. 41–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-41-45>

12. Akimova T. P., Zakharenko Y. G., Kononova N. A., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., Chekirda K. V., *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2021, no. 10, pp. 3–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-3-7>

Статья поступила в редакцию 12.11.2021; одобрена после рецензирования 15.12.2021; принята к публикации 16.12.2021.
The article was submitted 15.11.2021; approved after reviewing 15.12.2021; accepted for publication 16.12.2021.

Научная статья

УДК 531.7.08

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-34-43>

Первичная референтная методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки

Лидия Александровна Трибушевская¹✉, Юрий Романович Шимолин²

^{1, 2} Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Екатеринбург, Россия, ¹form233@uniim.ru✉, ²<https://orcid.org/0000-0001-5319-4636>

Аннотация. Изучена проблема прослеживаемости механической относительной деформации. Показана актуальность разработки методики измерения механической деформации для получения результатов измерений без сравнения с эталоном единицы величины того же рода. Разработана государственная первичная референтная методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба, а также оборудование для реализации методики. Изложена процедура установления методических параметров (изменения температуры окружающего воздуха при измерении, первоначальной неплоскостности балки, непараллельности граней балки и др.) в ходе разработки государственной первичной референтной методики измерений. Описан порядок оценки неопределённостей измерений деформации с указанием выявленных источников неопределённости и их вклада в суммарную неопределённость результатов измерений. Рассчитаны метрологические характеристики методики измерений. Данная методика будет полезна при определении характеристик референтных и рабочих методик измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба.

Ключевые слова: деформация, чистый изгиб, первичная референтная методика измерений

Благодарности: авторы выражают благодарность Пономаревой Ольге Борисовне, ведущему научному сотруднику УНИИМ-филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», эксперту-метрологу, за ценные замечания и рекомендации при аттестации государственной первичной референтной методики измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба.

Для цитирования: Трибушевская Л. А., Шимолин Ю. Р. Первичная референтная методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 34–43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-34-43>

Primary reference methodology (method) of measurements the surface deformation of an elastically deformed beam

Lidiya A. Tribushevskaya¹✉, Yuriy R. Shimolin²

^{1, 2} UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Ekaterinburg, Russia, ¹form233@uniim.ru✉, ²<https://orcid.org/0000-0001-5319-4636>

Abstract. The problem of non-traceability of the measurement results of relative strain to the state measurement standards of units of magnitudes is considered. The peculiarities of strain measurements are revealed: the dependence of measurement results on measurement conditions. The measurement method and equipment for the implementation of the state primary reference methodology (method) of measurements the surface deformation of an elastically deformed rectangular constant section beam loaded according to the pure bending scheme are described. The procedure for establishing methodological parameters (changes in ambient temperature during measurement, initial flatness of the beam, non-parallelism of the beam faces, etc.) during the development of the state primary reference methodology (method) of measurements is outlined. An algorithm for estimation of measurement uncertainty of strain with indication of the identified sources of uncertainty and their contribution to the total uncertainty of the measurement results is described. The metrological characteristics of the measurement methodology (method) are calculated. This technique will be useful in determining the characteristics of reference and working measurement techniques for the surface strain of an elastically deformed beam of constant rectangular cross-section loaded according to the pure bending scheme.

Keywords: strain, pure bending, primary reference methodology (method) of measurements

Acknowledgments: the authors express their sincere gratitude to Olga B. Ponomareva, Leading Researcher, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, the expert metrologist for the valuable comments and recommendations in the certification of the state primary reference methodology (method) of measuring the surface deformation of an elastically deformed rectangular constant section beam loaded according to the pure bending scheme.

Введение. Обеспечение надёжности и долговечности работы деталей и узлов машин, конструкций и сооружений – необходимое условие создания высококачественной и современной техники. Существенное значение при этом играют

расчётные методы определения деформированного состояния и оценки прочностных возможностей выпускаемых изделий, возводимых сооружений. Однако расчётные методы не всегда позволяют учитывать специфические условия работы

и отражать истинное напряжённое состояние исследуемых (особенно сложных по конструкции) объектов. Приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899) являются рациональное природопользование, безопасность и энергоэффективность. В настоящее время на смену методу эксплуатации сложных технических объектов по ресурсу приходит метод технической эксплуатации по состоянию, что обусловливается сложностью накопления и учёта индивидуальных параметров эксплуатации объектов и неэффективным использованием технических объектов, например, летательных аппаратов [1]. Решение задачи эксплуатации деталей, узлов машин, конструкций и сооружений по состоянию лежит в области применения систем встроенного мониторинга, позволяющих отслеживать состояние объекта в течение всего срока службы. Также путём непрерывного мониторинга можно обеспечивать безопасность при строительстве и эксплуатации высотных сооружений. К основным критериям применимости методов и средств измерений деформации относятся следующие: диапазон и точность измерений деформации; размер и форма исследуемых объектов; локальность исследования деформационного поля; материал исследуемых объектов; длительность и непрерывность измерений; условия окружающей среды (температура, агрессивные химические среды, возмущающие воздействия магнитных и электрических полей); возможность контактного механического взаимодействия с исследуемым объектом; удалённость и доступность исследуемого объекта и др.

Цель настоящего исследования – предложить первичную референтную методику измерения механической деформации для получения результатов измерений без сравнения с эталоном единицы величины того же рода.

Краткий обзор методов измерения деформации. Измерение деформации объектов производится либо в процессе испытания образцов материалов с целью определения их механических свойств, либо при исследовании технического объекта (в натуре или на моделях) для суждения о значениях напряжений. Экспериментальные методы определения внутренних напряжений условно разделяются на *разрушающие* (методы постепенного возрастающего высвобождения путем механической разрезки или сверления и одновременного контроля изменения внутренних напряжений) и *неразрушающие* методы определения остаточных напряжений.

Среди различных неразрушающих методов наиболее распространёнными являются *механические методы*, основывающиеся на измерении деформаций и перемещений. Для определения больших деформаций применяются струнные тензометры и метод делительных сеток [2]. Механические тензометры, тензорезисторы и оптические активные покрытия используются для измерений относительно малых деформаций.

Электрохимические исследования позволяют установить смещение электродного потенциала в отрицательную сторону при деформации технически чистого железа и стали марки 20, их применяют для определения механических напряжений в микрообъёмах металла. Чувствительность электродного потенциала к изменению состояния поверхности металла, в том числе вызванного появлением

первых признаков его пластической деформации в микрообъёмах, очень высокая.

Рентгеновский метод целесообразно применять для оценки значения и знака напряжений в деталях малых размеров и сложной формы, для которых механические методы применять трудно, а также для исследования тонких слоёв. Этот метод основывается на измерении межатомных расстояний в напряжённом и ненапряжённом металле. Деформация кристаллической решётки измеряется по дифракционным линиям, которые характеризуются смещением их относительно аналогичных линий у ненапряжённого материала, а также их шириной и интенсивностью [3].

Голография – двухступенчатый метод записи и восстановления волнового фронта, несущего информацию о предмете. Линии интерферограммы показывают как перемещения целого объекта, так и деформацию его поверхности [4]. Голография позволяет исследовать объекты с любым рельефом. Голографический метод удобен, надёжен, но процесс записи и обработки голограмм сложен и трудоёмок.

Компьютерный метод (электронная спекл-интерферометрия), использует электронную фотографию поля спеклов – особо тонкой, «зернистой» структуры света, отражённого диффузным объектом при лазерном освещении. Запись и сопоставление двух спекл-структур, проводимые на компьютере в цифровой форме, выявляют изменения в положении или геометрии тела в виде интерферограммы – такой же системы линий, как и в голографии, причём с той же чувствительностью. Важной особенностью электронной спекл-интерферометрии является возможность записать практически неограниченное количество экспозиций и затем брать их произвольные комбинации. Соответственно последовательность сочетаний экспозиций покажет перемещение объекта с субмикронной точностью [5].

Волоконные брэгговские решётки являются чувствительными элементами точечных волоконно-оптических датчиков. При механическом и температурном воздействии изменяются период и показатель преломления решётки, вследствие чего мы наблюдаем смещение длины волны отражённого света. Измеряя значение этого смещения, можно определить относительную деформацию и изменение температуры.

Проблемы метрологического обеспечения измерений деформации. Качество продукции любого производства должно быть строго регламентировано совокупностью количественных показателей, измерение которых возможно с необходимой точностью при существующем на данном этапе развитии качества метрологического обеспечения [6]. Создание средств измерений (СИ) с соответствующими метрологическими характеристиками не решает проблемы обеспечения достоверности измерений деформаций/напряжений, что, в свою очередь, не позволяет гарантировать надёжность и качество производимых изделий и объектов. Необходимо создать единую систему метрологического обеспечения измерений деформации, включающую решение теоретических и практических вопросов измерений и оценки их погрешностей, создание СИ метрологических характеристик измерительной аппаратуры и комплекса

нормативной документации. Существующая нормативная база в области измерений деформации не в состоянии обеспечить метрологическую прослеживаемость результатов измерений при использовании абсолютного большинства существующих на сегодняшний день методов измерений деформации и новейших СИ деформации. Исключение составляют экстензометры, принцип действия которых основан на измерении линейного перемещения одного ножа относительно другого.

Требования к точности измерения деформации регламентированы в стандартах на машины для испытания материалов (ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования», ГОСТ 28841-90 «Машины для испытания материалов на усталость. Общие технические требования», ГОСТ 28845-90 «Машины для испытания материалов на ползучесть, длительную прочность и релаксацию. Общие технические требования»). В ГОСТ 28840-90 машины классифицируются по допускаемой погрешности измерения деформации (удлинения) на четыре группы – 1; 2; 3; 5 % измеряемой величины (с 01.01.1995 г.), а в ГОСТ 28845-90 машины для испытания на ползучесть подразделяются на три группы – 0,5; 1,0; 2,0 и 1; 2; 3 % предельного значения диапазона для металлов и полимерных материалов соответственно.

Методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба. В основу методики измерений положена теория изгиба балки Эйлера-Бернулли [7] для случая чистого изгиба. Принцип измерений основан на изменении геометрических параметров балки, изогнутой в условиях чистого изгиба. Нормальные напряжения и, соответственно, относительная деформация, являются следствием воздействия только изгибающих моментов силы. Зависимость геометрических параметров деформированной балки – относительной деформации ε , толщины h и радиуса кривизны ρ нейтрального слоя в соответствии с законом Гука имеет вид

$$\varepsilon = \frac{6M}{bh^2E} \cdot 10^{-6} = \frac{h}{2\rho} \cdot 10^6, \quad (1)$$

где M – изгибающий момент силы; b – ширина балки; E – модуль упругости.

Постоянная относительная деформация поверхностных волокон позволяет осуществлять монтаж преобразователей по всей длине рабочего участка балки.

Стенд чистого изгиба. При разработке методики измерений рассмотрены классические кинематические схемы градуировочных установок, основанных на принципах чистого изгиба балки постоянного сечения. Указанные схемы приведены в следующих стандартах: ASTM E251-92 (2009) “Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages”, AIA/NAS 942 1964 “Aerospace Industries Association of America Inc. Strain gages, bonded resistance”, BS 6888:1988 “Methods for calibration of bonded electrical resistance strain gauges”, отчет “Standardization Project for Optical Techniques of Strain

measurement (SPOTS) standard” (CORDIS EU research results [сайт] URL: <https://cordis.europa.eu/article/id/83262-optical-met-rlogy-for-strain-measurement>). При разработке методики измерений также учтен отечественный опыт использования установки высшей точности для воспроизведения единицы деформации УВТ 32-А (Россия). Балка в УВТ 32-А устанавливается между двумя парами опор, неподвижно закреплённых на основании, и нагружается посредством перемещения пары роликов, установленной на подвижной относительно другой пары траверсе, такая схема нагружения носит также название four-point bending test (четырёхточечный изгиб). При перемещении подвижной траверсы с установленными на ней двумя парами роликовых опор балка изгибается в направлении перемещения траверсы. Данная схема воспроизведения деформации широко распространена в мире и считается, что она обеспечивает прослеживаемость к исходным эталонам длины [8]. Однако при реализации этой схемы возникают погрешности, связанные с конструкцией узлов передачи нагрузки на балку и не позволяющие соблюсти все условия чистого изгиба и, как следствие, достичь высокой точности воспроизведения относительной деформации на рабочих поверхностях балки по всей протяжённости рабочей зоны балки. Можно выделить три основных источника погрешности: несимметричность приложения изгибающих усилий от подвижных роликовых опор относительно неподвижных; непараллельность осей роликовых опор, вызывающая скручивающие эффекты в балке при её изгибе; отклонения образующих роликов от прямолинейности, вызывающие неодновременное соприкосновение опор с балкой, приводящее к появлению крутящего момента и, как следствие, неоднородности деформации на рабочей поверхности балки.

При выборе схемы и компоновки нагружающего устройства использованы способ получения чистого изгиба балки постоянного сечения и устройство для его осуществления [9]. В верхней части каждого рычага попарно сверху и снизу балки установлены четыре опорных ролика. Между роликами и балкой размещены подушки в виде плоских пластин с полуцилиндрическими выступами на противоположных краях, контактирующих с балкой непосредственно по образующим цилиндрических поверхностей этих выступов, а точки контакта опорных роликов с плоскими сторонами пластин-подушек попарно находятся на соответствующих нормалях к плоской поверхности пластин-подушек. При разработке установки использовано устройство для получения чистого изгиба балки [10]. Рычаги установлены горизонтально и шарнирно связаны с основанием посредством двух симметрично расположенных шатунов, а также с ползуном вертикальной направляющей через коромысло. Расположение симметричных рычагов в горизонтальной плоскости обеспечивает возможность получения заданной кривизны балки.

В методике измерений учитывается влияние следующих факторов, обусловленных применением стенда чистого изгиба: стабильности поддержания нагрузки; разности приложенных изгибающих моментов.

При определении размеров балки и, соответственно, установки, учитывали следующие условия:

возможность изготовления балок из различных материалов с целью дальнейших исследований применимости разработанной методики и выявления особенностей деформирования (композитные материалы, цветные сплавы, полимерные материалы и др.);

возможность изготовления дополнительных балок с целью исследования средств измерений относительной деформации, прикрепляемых к материалу балки с частичным разрушением (сварка) или формируемых непосредственно на материале в заводских условиях (с учётом невысокой стоимости изготовления);

возможность установки станда на стол видеоизмерительного микроскопа с щупом для наиболее точного построения упругой линии балки, деформационного поля, экспериментального определения поперечного изгиба для балок разной толщины.

Необходимо отметить особенности использования балок небольших размеров, учитываемые в методике измерений: высокие требования к геометрическим параметрам при изготовлении и, соответственно использование при их определении прецизионных средств измерений (оптиметр, микроскоп); выбор оптимальных размеров поперечного сечения балки; малый вес навесного оборудования и необходимость устройств его компенсации.

В методике измерений для балок из различных материалов учитывались следующие факторы: изменение температуры окружающего воздуха при измерении относительной деформации; влияние поперечного изгиба на результат измерений относительной деформации, расчёт поправок для материалов, имеющих различный коэффициент Пуассона.

Установление оптимальных параметров методики измерений. Статистическая модель измерений деформации поверхности балки описывается выражением

$$\varepsilon = \frac{4h(F + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi'_2)}{L^2 + 4(F + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi'_2)^2 \pm 4h(F + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi'_2)} \cdot 10^6 + B + e, \quad (2)$$

где F – значение прогиба (показания прогибомера); Π_1 – поправка к показаниям прогибомера, обусловленная поперечным изгибом балки, для учёта положения парных опор относительно преобразователя прогибомера; Π_2, Π'_2 – поправки к показаниям прогибомера, обусловленные смещением точки касания балки и опоры прогибомера при растяжении и сжатии балки соответственно; L – длина базы прогибомера; B – лабораторная составляющая систематической погрешности в условиях повторяемости; e – случайная погрешность измерений.

На выбор метода измерений деформации и на результат измерений влияют такие факторы как неоднородность деформационного поля и диапазон измеряемых деформаций. Указанные факторы обуславливаются деформируемым материалом (химическим составом, однородностью и структурой), формой тела (концентраторы напряжений, осевые моменты сопротивления), типом деформирования (виды внутренних напряжений и их распределение), скоростью деформирования и др. Таким образом, при оценке неопре-

делённости измерений необходимо учитывать источники неопределённости (методические погрешности), которые не входят в уравнение измерения, но оказывают влияние на результат измерений относительной деформации. К таким источникам относятся геометрические параметры тела (далее балки) и их изменение с изменением температуры; изменение модуля упругости балки с изменением температуры в цикле измерений; смещение нейтрального слоя; механический гистерезис.

При разработке методики использовались общие правила оценивания и представления неопределённости измерений в соответствии с ГОСТ 34100.3-2017 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости».

Допускаемый диапазон температуры окружающего воздуха. При измерении относительной деформации выделяются два источника неопределённости, обусловленные изменением температуры окружающего воздуха и, как следствие, температуры балки: неопределённость измерений геометрических размеров балки; неопределённость измерений относительной деформации, возникающая из-за изменения модуля упругости балки.

Неопределённость измерений геометрических параметров балки обуславливается относительным изменением линейных размеров балки с изменением температуры, что характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения. Таким образом, в зависимости от материала балки определяются погрешности (неопределённости) измерения относительной деформации.

Стандартную неопределённость u_B^h по типу В, обусловленную изменением геометрических размеров балки при изменении температуры, рассчитывали по формуле

$$u_B^h = |C_2| u^h = \left| \frac{h + (2R \pm h)}{(2R \pm h)^2} \right| \alpha \Delta T h,$$

где C_2 – коэффициент чувствительности толщины балки; u^h – стандартная неопределённость измерений геометрических размеров балки при изменении температуры; R – радиус кривизны рабочей поверхности балки нагружения; α – температурный коэффициент линейного расширения материала балки; ΔT – изменение температуры за время измерений.

Рассчитанная на основании ПНАЭ Г-7-002-86 «Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» стандартная неопределённость по типу В, обусловленная изменением модуля упругости балки при изменении температуры, составила $u_B^E = 0,0003 \cdot 10^{-6}$.

Оценки стандартной неопределённости для балок одинаковой толщины 9 мм при разных (в зависимости от материала балки) значениях деформации, обусловленной изменением температуры окружающего воздуха Δt , приведены на рис. 1.

Ограничение изменения температуры окружающего воздуха 1,0 °С и непосредственно во время измерений относительной деформации не более 0,5 °С можно считать приемлемым для металлических балок и балок из материалов

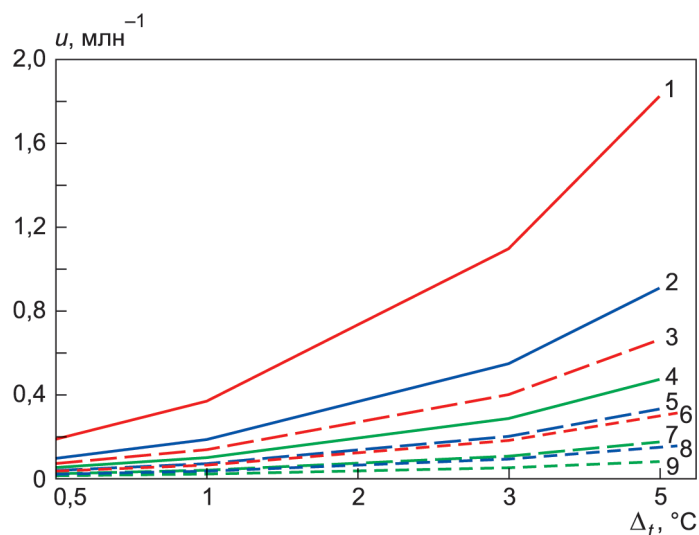


Рис. 1. Погрешность измерения относительной деформации в зависимости от материала балки и диапазона изменения рабочих температур:

1, 3, 6 – балка из поликарбоната, деформация соответственно 5000; 3000; 2000 млн⁻¹; 2, 5, 8 – балка из сплава алюминия В95, деформация соответственно 5000; 3000; 2000 млн⁻¹; 4, 7, 9 – балка из стали Х40, деформация соответственно 5000; 3000; 2000 млн⁻¹

Fig. 1. Measurement error of relative strain as a function of beam material and operating temperature range:

1, 3, 6 – polycarbonate beam, deformation, respectively, 5000; 3000; 2000 μstrain ; 2, 5, 8 – beam made of aluminum alloy В95, deformation, respectively, 5000; 3000; 2000 μstrain ; 4, 7, 9 – beam made of Х40 steel, deformation, respectively, 5000; 3000; 2000 μstrain

с температурным коэффициентом линейного расширения не более $70 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (поликарбонат). При этом погрешность измерений относительной деформации не превышает 0,0072 %.

Допускаемая первоначальная неплоскостность балки. Ось балки – линия, соединяющая центры тяжести поперечных сечений, представляет собой плоскую кривую, ось симметрии каждого поперечного сечения лежит в плоскости этой кривой. На балку действуют силы, лежащие в указанной плоскости симметрии, в том числе и изгиб балки [11].

Распределение напряжений в балке с первоначальной неплоскостностью происходит не по линейному закону, а по гиперболическому. Так как сумма нормальных усилий, распределённых по поперечному сечению, равняется нулю, то в случае чистого изгиба нейтральная ось перемещается от центра тяжести по направлению к центру кривизны оси балки. Для определения неизвестной составляющей погрешности измерений деформации применён вывод из уравнений статики [11] для прямоугольного сечения. Коэффициент приведённой площади зависит от геометрических размеров поперечного сечения, поэтому рассмотрели влияние первоначальной кривизны балки на результат измерений относительной деформации для балок различной толщины. Погрешность (неопределённость) измерений деформации для балки с исходной неплоскостностью линейно зависит от измеряемой деформации,

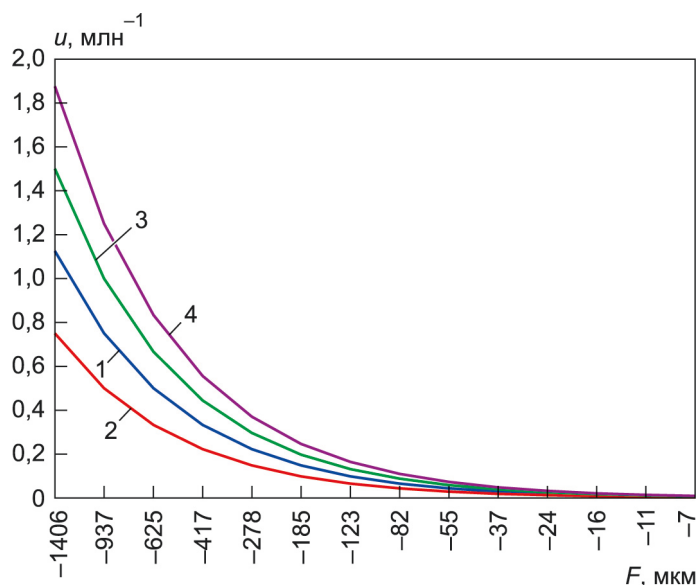


Рис. 2. Неопределённость измерений деформации 3000 млн⁻¹, обусловленная исходной неплоскостностью балок различной толщины: 1–4 – толщина балки 6; 4; 8; 10 мм соответственно

Fig. 2. Uncertainty of strain measurements due to the initial non-uniformity of beams of different thicknesses:

1–4 – beam thickness 6; 4; 8; 10 mm respectively

поэтому на рис. 2 приведены результаты расчёта для относительной деформации 3000 млн⁻¹.

На основании проведённых расчётов первоначальная неплоскостность балки ограничена прогибом 16 мкм и соответствующая составляющая неопределённости измерений деформации не превышает 0,036 млн⁻¹ для балок толщиной до 10 мм при относительной деформации до 5000 млн⁻¹.

Дополнительной причиной ограничения первоначального прогиба балки является использование дифференциального метода измерений прогиба балки, при котором диапазон измерений преобразователя прогибомера составляет 20 мкм.

Геометрические размеры балки. Максимальные размеры поперечного сечения и длина балки ограничены конструкцией стенда. Длина балки не превышает 500 мм, ширина 30 мм, толщина 10 мм. Помимо размеров балки установлена допускаемая непараллельность граней.

Относительная деформация в соответствии с уравнением измерений есть функция от толщины балки и радиуса кривизны. Точность определения радиуса кривизны определяется преимущественно неопределённостью измерений с помощью датчика прогибомера, но, в свою очередь, толщина балки определяет диапазон измерений прогиба и, соответственно, выбор высокоточного СИ. Кроме того, уменьшение толщины балки приводит к увеличению составляющих погрешности, обусловленных непараллельностью граней балки и паразитными скручивающими моментами силы.

При малых значениях прогиба балки требуется высокая точность линейных измерений, присущая дифференциальному методу измерений. Такой метод позволяет наряду с использованием плоскопараллельных концевых мер длины

применять датчик прогибомера в диапазоне измерений 0–20 мкм. Пределы допускаемой погрешности измерений датчика прогибомера «Микрон-04» (Россия) составляют $\pm 0,06$; ± 6 мкм в диапазонах измерений 0–20; 0–2000 мкм соответственно.

Применение дифференциального метода измерений вводит дополнительные требования к неоднородности модуля упругости по длине балки, первоначальной неплоскостности балки и непараллельности рабочих и боковых граней балки. Так как неоднородность модуля упругости балки является одним из основных источников неравномерности деформации в рабочей зоне балки, не поддается предварительной оценке и по сути является результатом определения относительной деформации, то несоответствие балки по данному признаку устанавливается по факту невозможности провести измерение деформации с установленными в методике показателями точности, поскольку результат определения прогиба балки будет находиться вне диапазона измерений датчика прогибомера.

Первоначальная неплоскостность балки определяет диапазон прогибов в ненагруженном состоянии балки, который затем исключается только математически. Первоначальная неплоскостность балки нормирована, составляет 1/3 диапазона измерений датчика прогибомера (6 мкм) и является технически реализуемым параметром при изготовлении балки.

В соответствии с уравнением измерений (2), которое распространяется на балки постоянного сечения, деформация балки – следствие возникающих напряжений, которые в свою очередь определяются изгибающими моментами, моментом инерции площади сечения относительно нейтральной оси и толщиной балки (1). Непараллельность граней балки обуславливает неравенство моментов инерции площади сечения относительно нейтральной оси, является также одним из основных источников неравномерности деформации в рабочей зоне балки и, как следствие, определяет диапазон прогибов в нагруженном состоянии балки в различных её сечениях. Влияние непараллельности рабочих и боковых граней балки на значение прогиба рассчитано и нормировано, изменение прогиба по длине балки не превышает 1/3 диапазона датчика прогибомера и технически реализуемо при изготовлении балки. Непараллельность рабочих и боковых граней балки не должна превышать 6 мкм.

Допускаемые стабильность поддержания нагрузки стендом чистого изгиба и время измерения. Процессы измерений и воспроизведения относительной деформации по определению невозможны без силового воздействия на балку. При изгибе внутри тела балки возникают напряжения, которые обуславливают реакцию опор в узлах приложения изгибающих моментов. Чем большая деформация воспроизводится, тем большую нагрузку испытывают конструктивные элементы стенда, в том числе элементы привода. Недостаточная жёсткость стенда может быть причиной ошибочных выводов об испытываемой балке, а именно о ползучести балки, обусловленной механическими свойствами её материала. Конструкция стенда должна обеспечивать стабильное приложение изгибающих моментов за всё время измерений.

Типовые испытания на ползучесть СИ ограничиваются одним часом (ГОСТ 21616-91 «Тензорезисторы. Общие технические условия»), поэтому стенд должен стабильно поддерживать нагрузки не менее 5 ч. Для испытаний выбрана стальная закалённая балка, так как закалённая сталь имеет наибольший модуль упругости по сравнению с материалами других имеющихся балок.

Измерения воспроизведённой деформации во времени подтвердили достаточную краткосрочную стабильность поддержания нагрузки не менее 5 ч. Таким образом, для компенсации тренда не требуются стабилизирующие механизмы или дополнительные математические преобразования, а также расчёт составляющей неопределённости, обусловленной жёсткостью конструкции.

Допускаемая неоднородность деформационного поля.

Составляющая погрешности, обусловленная неравномерностью деформационного поля, в свою очередь связана с неоднородностью модуля упругости и внутренних напряжений, обусловленных преимущественно разностью изгибающих моментов.

Результат измерений относительной деформации для конкретного сечения по методике измерений распространяли на участок чистого изгиба протяжённостью не менее 12,5 мм по обе стороны от выбранного сечения вдоль продольной оси балки. Протяжённость участка установили исходя из наиболее востребованных для натурных испытаний и пригодных для создания компараторов тензорезисторов, наиболее часто используемых для точных измерений относительной деформации тензорезисторы с базами до 20 мм.

Малые размеры балки предъявляют жёсткие требования к геометрическим параметрам балки, чистоте поверхности и «чистоте» изгиба. Разность изгибающих моментов на концах балки является причиной закономерного изменения деформации поверхности балки в сторону большего изгибающего момента, см. (1), таким образом, по длине локального участка протяжённостью, например, 25 мм значение относительной деформации изменяется по линейному закону:

$$M_j = M_n + k_M y;$$

$$\Delta \varepsilon_{\Delta l} = 6 \cdot 10^{-6} k_M \Delta l / (b h^2 E), \quad (3)$$

где M_j – изгибающий момент силы в сечении j ; M_n – изгибающий момент силы в сечении, принятом за нулевое (левая опора балки); k_M – коэффициент, характеризующий изменение изгибающего момента силы по длине балки; y – длина балки от нулевого сечения; $\Delta \varepsilon_{\Delta l}$ – погрешность измерений относительной деформации, связанная с разностью изгибающих моментов на локальном участке; Δl – протяжённость локального участка, на который распространяется результат измерений относительной деформации в сечении.

Изменение относительной деформации прямо пропорционально изменению прогиба балки, поэтому неопределённость, обусловленная разностью изгибающих моментов, оценивается через зависимость прогиба балки от координаты сечения. Из формулы (3) следует, что погрешность измерений относительной деформации, определяемая разностью изгибающих

моментов, линейна. Наиболее точно стандартное отклонение $s_{\Delta f}$ результатов измерений прогиба оценивается как

$$s_{\Delta f} = (f_n - f_k) / (m \cdot \sqrt{3}),$$

где f_n, f_k – прогибы балки в начальном и конечном сечениях рабочего участка балки соответственно; m – количество локальных участков, на которые разделена балка и на которые распространяется результат измерений относительной деформации.

Регулировка опор перед началом измерений позволяет установить разность прогиба при нагружении до 1 мкм^{-1} без смены диапазона измерений датчика прогибомера. На рис. 3 приведена зависимость отсутствия или недостаточно точной регулировки опор на распределение прогиба по длине балки. Без ручной настройки разность прогиба балки на краях её рабочего участка может быть более 10 мкм и, следовательно, составляющая погрешности относительной деформации, обусловленная разностью значений изгибающих моментов, может достигать, в зависимости от толщины балки, $2,2 \text{ млн}^{-1}$, что составляет $0,04\text{--}2,20 \%$ в зависимости от диапазона измерений относительной деформации. Наибольшая погрешность наблюдается для толстых балок. Методикой измерений предусмотрена регулировка положения балки в кулаках станда до установленного допускаемого отклонения разностей прогиба по краям рабочего участка балки $\pm 0,5 \text{ мкм}$.

Так как неравномерность деформационного поля обусловлена не только разностью значений изгибающих моментов, но и локальными напряжениями, неоднородностью модуля упругости, чистотой поверхности балки и влиянием оператора, то для оценки неопределённости, обусловленной неравномерностью деформационного поля использовали методику, изложенную ГОСТ ISO Guide 35-2015 «Стандартные образцы. Общие и статистические принципы сертификации (аттестации)».

Геометрические параметры прогибомера для измерения прогиба балки. Прогиб балки измеряли с помощью прогибомера, геометрические параметры которого входят в уравнение измерений. На определение действительного прогиба балки влияют: расстояние между опорами вдоль основной оси и точность его оценки; расстояние между двойными

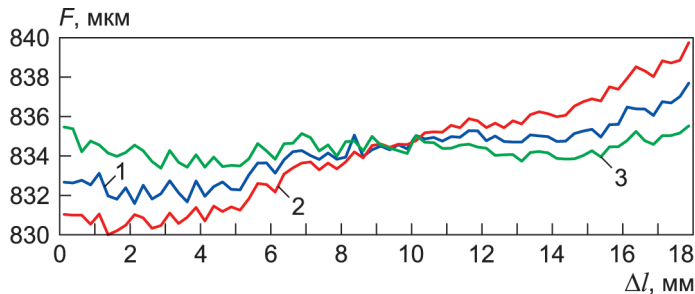


Рис. 3. Изменение прогиба балки по длине в зависимости от смещения подошв станда относительно кулаков: 1, 2, 3 – балка нагружена со смещением 3; 5 мм и симметрично соответственно

Fig. 3. Change of beam deflection along its length depending on displacement of the stands soles relative to the cams: 1, 2, 3 – the beam is loaded with an offset of 3; 5 mm and symmetrically, respectively

опорами в поперечном направлении относительно основной оси, которое определяет поправку, связанную с поперечным изгибом балки; вид и размер опор прогибомера, определяющий вторую поправку, обусловленную смещением точки касания балки и опоры прогибомера при изгибе балки, с учётом предположения, что форма упругой линии балки – дуга окружности; положение щупа датчика относительно опор прогибомера.

Базу прогибомера оценивали с помощью инструментального цифрового микроскопа с пределом допускаемой погрешности измерений длины 3 мкм .

Расстояние между парными опорами прогибомера в поперечном направлении относительно основной оси обуславливает следующую поправку, связанную с поперечным изгибом балки:

$$\Pi_1 = \mu l_n^2 \varepsilon / (8h),$$

где μ – коэффициент Пуассона; l_n – расстояние между центрами отпечатков парных опор.

Расстояние между парными опорами в поперечном направлении относительно основной оси определяли с помощью микроскопа инструментального. Неопределённость поправки, обусловленная использованием микроскопа инструментального, не превышала $0,02 \%$.

Поправки, обусловленные смещением точки касания балки и опоры прогибомера при изгибе балки, в зависимости от расположения прогибомера на сжатых или растянутых волокнах определяли по формулам

$$\Pi_2 = [\sqrt{(R_{\text{ном}} + r)^2 - (L/2)^2} - \sqrt{R_{\text{ном}}^2 - (L/2)^2} - r];$$

$$\Pi'_2 = -[\sqrt{R_{\text{ном}}^2 - (L/2)^2} - \sqrt{(R_{\text{ном}} - r)^2 - (L/2)^2} - r];$$

$$R_{\text{ном}} = (L^2 + 4F_{\text{ном}}^2) / (8F_{\text{ном}}),$$

где $R_{\text{ном}}$ – радиус кривизны рабочей поверхности балки нагружения; r – радиус опор прогибомера; $F_{\text{ном}}$ – расчётный прогиб балки на базе прогибомера.

Неопределённость поправок Π_2, Π'_2 обусловлена неопределённостью измерений радиуса опор прогибомера с помощью микроскопа инструментального, положением преобразователя по центру относительно опор прогибомера и оценкой радиуса кривизны рабочей поверхности балки. При измерении относительной деформации с помощью прогибомера с опорами в виде кернов поправки Π_2, Π'_2 не рассчитывают.

Расчёт неопределённости измерений относительной деформации. Стандартную неопределённость типа A измерений деформации, u_A , коэффициенты влияния составляющих стандартной неопределённости определяли по формулам

$$u_A = [C_1^2 (2(u_A^F)^2 + (u^{Hf})^2) + C_2^2 (u_A^h)^2 + C_3^2 (u_A^L)^2 + c_{1h}^2 \Delta h^2 + c_{1b}^2 \Delta b^2 + c_2^2 \Delta T^2 + \Delta_E^2 + \Delta_{\text{н.с}}^2]^{1/2};$$

$$C_1 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial F} = \frac{4hF(-4h-8F)}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)^2} + \frac{4h}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)};$$

Составляющие погрешности и неопределённости измерений

h , мм	ε , млн ⁻¹	σ_r , млн ⁻¹	σ_{Rn} , млн ⁻¹	$\pm\Delta_c$, млн ⁻¹	$\pm\Delta$, млн ⁻¹	u_r , млн ⁻¹	u_{Rn} , млн ⁻¹	u_Σ , млн ⁻¹	$U_{0,95}$, млн ⁻¹
4–10	–500...500	0,3	0,5	$3 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	3,6	0,3	0,5	$1,6 + 3 \cdot 10^{-5}\varepsilon$	3,6
4–10	–3000...–500; 500...3000	$6 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$0,2 + 6 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$3 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$2,8 + 9 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$6 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$0,2 + 6 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$1,6 + 3 \cdot 10^{-5}\varepsilon$	$2,8 + 9 \cdot 10^{-4}\varepsilon$
6–10	–5000...–3000; 3000...5000	$6 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$0,2 + 6 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$3 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$2,8 + 9 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$6 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$0,2 + 6 \cdot 10^{-4}\varepsilon$	$1,6 + 3 \cdot 10^{-5}\varepsilon$	$2,8 + 9 \cdot 10^{-4}\varepsilon$

$$C_2 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial h} = - \frac{16hF^2}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)^2} + \frac{4h}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)};$$

$$C_3 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial L} = - \frac{8hFL}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)^2};$$

$$c_{1h} = \varepsilon / (h2\sqrt{3}); c_{1b} = \varepsilon / (b\sqrt{3}); c_2 = C_2 \alpha h,$$

где C_1 – коэффициент чувствительности прогиба; u_A^F – стандартная неопределённость измерений прогиба по типу А; u^{Hf} – стандартная неопределённость измерений прогиба обусловленная неоднородностью деформационного поля; C_2 – коэффициент чувствительности толщины балки; u_A^h – стандартная неопределённость измерений толщины балки по типу А; C_3 – коэффициент чувствительности длины базы прогибомера; u_A^L – стандартная неопределённость измерений длины базы прогибомера, оцениваемая по типу А; c_{1h} – коэффициент чувствительности непараллельности рабочих граней балки на результат измерений относительной деформации; c_{1b} – коэффициент чувствительности непараллельности боковых граней балки на результат измерений относительной деформации; c_2 – коэффициент чувствительности изменения температуры на результат измерений относительной деформации, обусловленную изменением геометрических размеров балки; Δ_E – значение неискл. систематической погрешности результатов измерений относительной деформации балки, обусловленное изменением модуля упругости балки при изменении температуры ($\Delta_E = 0,0003 \cdot 10^{-6}$); $\Delta_{н.с}$ – значение неискл. систематической погрешности результатов измерений относительной деформации балки, обусловленное смещением нейтрального слоя балки относительно её центральной оси ($\Delta_{н.с} = 0,0003 \cdot 10^{-6}$); Δh – отклонение от параллельности рабочих граней балки на участке трёх сечений; Δb – отклонение от параллельности боковых граней балки на участке трёх сечений, $+\Delta b$ или $-\Delta b$ – при установке прогибомера на балку для случая растяжения или сжатия верхних волокон.

Стандартные неопределённости измерений прогиба, толщины балки, прогиба балки на базе прогибомера по типу А определяли по формуле

$$u_A = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / [N(N-1)]}.$$

где N – количество определений параметра x при многократных измерениях.

Источниками неопределённости, которые не входили в уравнение измерения, но оказывали влияние на результат измерений относительной деформации, являлись непараллельность граней балки, изменение геометрических размеров балки при изменении температуры, изменение модуля упругости балки из-за изменения температуры в процессе цикла измерений.

Поскольку в ходе эксперимента одновременно измеряли независимые друг от друга величины, то их оценки приняли некоррелированными.

Стандартную неопределённость измерений относительной деформации по типу В рассчитывали как

$$u_B = \sqrt{(u_B^F)^2 + (u_B^h)^2 + (u_B^L)^2 + (u_B^E)^2 + u_{н.с}^2},$$

где указаны стандартные неопределённости по типу В, обусловленные прогибом (средствами и методом измерений) (u_B^F), неопределённостью измерений толщины балки горизонтальным оптиметром (u_B^h), неопределённостью измерений микроскопом длины базы прогибомера (u_B^L) и изменением положения нейтрального слоя ($u_{н.с}$).

Суммарную стандартную неопределённость результата измерений относительной деформации u_c , эффективное число степеней свободы $v_{эфф}$ и расширенную неопределённость результата измерений относительной деформации U_p рассчитывали по формулам

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2};$$

$$v_{эфф} = u_c^4 \left[(c_1 u_A^F)^4 / 4 + (c_2 u_A^h)^4 / 5 + (c_3 u_A^L)^2 / 4 \right]^{-1};$$

$$U_p = k_{0,95} u_c \cdot 10^{-6}.$$

Коэффициент охвата $k_{0,95}$ определяли по распределению Стьюдента с учётом нормального закона распределения возможных значений измеряемой величины для уровня доверия $P=0,95$ и рассчитанного значения эффективного числа степеней свободы.

Результаты работы. Исследованы составляющие неопределённости измерений относительной деформации балки, обусловленные непараллельностью рабочих и боковых граней балки, изменением геометрических размеров балки при изменении температуры и неоднородностью механических

Таблица 2

Составляющие стандартной неопределённости результатов измерений, обусловленные влиянием методических параметров

Источник неопределённости u_i	Тип	u_i , мкм	Δ	$C_i(c_j)$	$v_{эфф}$
Измерение прогиба балки	B	0,18	—	$C_1, м^{-1}$	—
Измерение геометрических параметров балки	B	0,30	—	$C_2, м^{-1}$	—
Измерение длины базы прогибомера	B	3,00	—	$C_3, м^{-1}$	—
Неоднородность деформационного поля	A	0,24	—	$C_1, м^{-1}$	9
Непараллельность рабочих граней балки	A	—	0,002 мм	$c_{1h}, млн^{-1} \cdot м^{-1}$	9
Непараллельность боковых граней балки	A	—	0,002 мм	$c_{1b}, млн^{-1} \cdot м^{-1}$	9
Изменение температуры во время измерений	A	—	0,5 °C	$c_2, млн^{-1} \cdot м^{-1}$	9

свойств балки. В результате применения предложенной методики измерены относительные деформации в диапазонах измерений и с характеристиками погрешности и неопределённости измерений, приведёнными в табл. 1–2.

В таблицах введены следующие обозначения: σ_r – показатель повторяемости (среднее квадратическое отклонение повторяемости); $\sigma_{Rл}$ – показатель внутрилабораторной прецизионности (среднее квадратическое отклонение внутрилабораторной прецизионности); $\pm \Delta_c$ – показатель правильности (границы абсолютной неисклѳченной систематической погрешности при доверительной вероятности); $\pm \Delta$ – показатель точности (границы абсолютной погрешности при доверительной вероятности); u_r – стандартная неопределѳнность результатов измерений в условиях повторяемости; $u_{Rл}$ – стандартная неопределѳнность результатов измерений в условиях внутрилабораторной прецизионности; u_Σ – стандартная неопределѳнность результатов измерений, обусловленная влиянием методических параметров; $U_{0,95}$ – расширенная неопределѳнность при коэффициенте охвата 2, соответствующем уровню доверия 0,95.

Оценки вкладов в неопределѳнность, обусловленные влиянием методических параметров (см. табл. 2), рассчитывали по формулам: $u_{\varepsilon i} = |C_i| u_i$; $u_{\varepsilon j} = |c_j| \Delta_j$, где i – номер составляющей неопределѳнности, определяемой из уравнения измерений, j – номер влияющего фактора. Оценку суммарной стандартной неопределѳнности, удовлетворявшую условию $\tilde{u}_\Sigma \leq u_\Sigma$, рассчитывали по формуле

$$\tilde{u}_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 u_i^2 + \sum_{j=1}^m c_j^2 \Delta_j^2}.$$

Заключение. Разработанная методика измерения механической деформации, обеспечивающая наивысшую на данный момент в Российской Федерации точность результатов измерений, реализована на одном комплекте оборудования. Результаты измерений по данной методике могут быть использованы при оценке правильности результатов измерений, полученных с использованием других методов измерений, а также применяться для калибровки средств измерений. Указанная методика содержит

документированную процедуру контроля точности результатов измерений. Государственная первичная референтная методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба, утверждена приказом Росстандарта № 3402 от 27.12.2019 и зарегистрирована в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений под номером ФР.ПР1.28.2019.00010.

Список источников

1. Серьѳзов А. Н., Кузнецов А. Б., Лукьянов А. В., Брагин А. А. Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций // Системы анализа и обработки данных. 2016. № 3 (64). С. 95–105. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2016-3-95-105>
2. Ярославцев В. М., Ярославцева Н. А. Способ исследования больших пластических деформаций // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 4 (109). С. 71–80. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-4-71-80>
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т. 1 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1986. 656 с.
4. Волков И. В., Вышинский В. В., Кисловский А. О. Теоретические основы метода спекл-голографии в экспериментальной механике // Труды МФТИ. 2017. № 2 (34). С. 13–22.
5. Чернышев Г. Н., Попов А. Л., Козинцев В. М. Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. 2002. № 10. С. 17–24.
6. Буркин С. П., Шимов Г. В., Андрѳкова Е. А. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 248 с.
7. Композиционные материалы: В 8-ми т. пер. с англ. / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. Т. 7. Анализ и проектирование конструкций. Часть 1 / Под ред. К. Чамиса. М.: Машиностроение, 1978. 300 с.
8. Whelan M. P., Albrecht D., Hack E., Patterson E. A., *Strain*, 2008, vol. 44, iss. 2, pp. 180–190. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2007.00364.x>
9. Пат. № RU 2526787C2 / В. В. Митрофанов // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 24.
10. Пат. № RU 2621462C1 / В. В. Митрофанов, Ю. Р. Шимолин // Изобретения. Полезные модели. 2017. № 16.
11. Тимошенко С. П. Соппротивление материалов. Т. 1. М.: Наука, 1965. 364 стр.

References

1. Seryoznov A. N., Kuznetsov A. B., Luk'yanov A. V., Bragin A. A., *Analysis And Data Processing Systems*, vol. 64, no. 3, 2016, pp. 95–105. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2016-3-95-105> (In Russ.)

2. Yaroslavtsev V. M., Yaroslavtseva N. A. *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.*, 2016, no. 4, pp. 71–80. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-4-71-80> (In Russ.)
3. *Handbook of the mechanical engineer technologist*, in 2 vol., vol. 1, ed. A. G. Kosilova, R. K. Meshcheryakov, 4-th edition, revised, and expanded, Moscow, Machine Engineering Publ., 1985, 656 p. (In Russ.)
4. Volkov I. V., Vyshinsky V. V., Kislovskiy A. O., Theoretical bases of the speckle-holography method in experimental mechanics, *Proceedings of MIPT*, 2017, no. 2 (34), pp. 13–22. (In Russ.)
5. Chernyshev G. N., Popov A. L., Kozintsev V. M., Poleznye i opasnye ostatochnye napryazheniya, *Priroda*, 2002, no. 10, pp. 17–24. (In Russ.)
6. Burkin S. P., Shimov G. V., Andryukova E. A., *Residual Stresses in Metal Products*, Tutorial, Ekaterinburg, Ural. Un. Publ., 2015, 248 p. (In Russ.)
7. *Composite Materials, vol. 7, Analysis and Design of Structures, part 1*, ed. by C. C. Chamis, New York, Acad. press, 1975, 345 p.
8. Whelan M. P., Albrecht D., Hack E., Patterson E. A., *Strain*, 2008, vol. 44, iss. 2, pp. 180–190. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2007.00364.x>
9. Mitrofanov V. V., RF Patent no. RU2526787C2, *Byull. Izobret.*, no. 24 (2014).
10. Mitrofanov V. V., Shimolin Y. R., RF Patent no. RU2621462C1, *Byull. Izobret.*, no. 16 (2017).
11. Timoshenko S. P., *Resistance of Materials, vol. 1*, Moscow, Nauka Publ., 1965, 364 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 27.07.2021; одобрена после рецензирования 03.12.2021; принята к публикации 10.12.2021.
 The article was submitted 27.07.2021; approved after reviewing 03.12.2021; accepted for publication 10.12.2021.

Научная статья

УДК 533.088.22

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-44-50>

Верификация метода оценки систематических погрешностей стенда для калибровки шестикомпонентных тензометрических весов

Валерий Семёнович Волобуев¹, Антон Роальдович Горбушин²✉, Владимир Алексеевич Завьялов³

^{1, 2, 3} Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

¹vs170439@gmail.com

²gorbushin@tsagi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4186-588X>

³vladimir.zavyalov@tsagi.ru

Аннотация. Исследованы систематические погрешности калибровочного стенда 6ГС-40М. Стенд разработан в Центральном аэрогидродинамическом институте и предназначен для калибровки шестикомпонентных внутри- и внемоделных тензометрических весов с максимальной нормальной силой 40 кН. С учётом требований к погрешности определения аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов при испытаниях в аэродинамических трубах установлено, что погрешность калибровочных стендов, отнесённая к половине диапазона каждой из шести компонент весов на стенде, не должна превышать 0,05 %. Разработан метод экспериментальной оценки систематических погрешностей калибровочного стенда и определены систематические погрешности стенда 6ГС-40М. С использованием полученных значений погрешностей верифицированы выведенные ранее аналитические выражения для систематических погрешностей. Оценены поправки к задаваемым стендом 6ГС-40М нагрузкам внутри- и внемоделных тензометрических весов, для различных компонент весов поправки составили 0,09–0,90 %. Разработанный метод экспериментального определения систематических погрешностей может быть использован и для других калибровочных стендов.

Ключевые слова: тензометрические весы, калибровочный стенд, систематическая погрешность, верификация

Для цитирования: Волобуев В. С., Горбушин А. Р., Завьялов В. А. Верификация метода оценки систематических погрешностей стенда для калибровки шестикомпонентных тензометрических весов // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 44–50. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-44-50>

Verification of the method for assessing systematic errors of the balance calibration machine

Valery S. Volobuev¹, Anton R. Gorbushin²✉, Vladimir A. Zavyalov³

^{1, 2, 3} Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Moscow region, Russia

¹vs170439@gmail.com

²gorbushin@tsagi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4186-588X>

³vladimir.zavyalov@tsagi.ru

Abstract. The systematic errors of the 6GS-40M calibration machine of the Central Aerohydrodynamic Institute are investigated. The machine is designed for calibration of external and internal six-component strain-gauge balances with a maximum normal force of 40 kN. Proceeding from requirements to the aerodynamic characteristic errors of aircraft models during their tests in wind tunnels, the requirements to the calibration errors of strain-gauge balances were obtained: the calibration error related to half of range of the calibration machine components must not exceed 0.05 %. A method is developed for experimental evaluation of systematic errors of calibration machine. Experimental studies were carried out with the help of the developed method to determine the systematic errors of the 6GS-40M calibration machine. Previously obtained analytical expressions for the systematic errors were verified by the results of the experiment. We estimated the corrections to the loads set by the 6GS-40M calibration machine to external and internal six-component strain-gauge balances. The range of corrections was from 0.09 to 0.90 % for the different components of the balances. The developed method of experimental determination of systematic errors may be used for other calibration machines.

Keywords: strain-gauge balance, calibration machine, systematic error, verification

Введение. Производители коммерческих самолётов в последние годы существенно повысили требования к точности результатов экспериментальных исследований в аэродинамических трубах. Например, необходимая погрешность

коэффициента сопротивления $\Delta C_{xa} \leq 5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$ [1, 2]. Таким требованиям удовлетворяют тензометрические весы с приведённой погрешностью 0,1–0,2 % при условии, что их предел измерения соответствует диапазону измеряемых

аэродинамических нагрузок [1]. Тензометрические весы используются в России с конца 1940-х гг. Калибровка тензометрических весов осуществляется на калибровочных стендах. В настоящее время в мире существует множество калибровочных стендов различных конструкций [3–14]. В России первый автоматизированный стенд для калибровки тензометрических весов создан в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) в 1959–1960 гг. [10]. Деформация тензометрических весов в процессе калибровки приводит к изменению величины и направления прилагаемой к весам нагрузки, т. е. к возникновению систематических погрешностей [3–14]. Калибровочные стенды обладают уникальной конструкцией и, соответственно, только им присущими систематическими погрешностями. Погрешность тензометрических весов обусловлена, в основном, погрешностью калибровочных стендов, на которых к весам прикладывают известные нагрузки по всем компонентам в заданном диапазоне. В работе [15] получена случайная погрешность коэффициента сопротивления $\Delta C_{xa} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ при испытаниях модели гражданского самолета [16] на внутримодельных тензометрических весах. Диапазон весов по продольной компоненте силы ± 1 кН, скоростной напор 32 кПа, площадь модели 0,3282 м². Для этих параметров приведённая случайная погрешность тензометрических весов составила 0,05 %. Для достижения такой погрешности весов при калибровке на стенде необходимо, чтобы погрешность калибровочного стенда также не превышала 0,05 %. Обеспечить погрешность стенда не более 0,05 % можно двумя путями: проектированием специальной конструкции стенда; выявлением систематических погрешностей стенда и введением соответствующих поправок к приложенным на стенде нагрузкам.

Большой проблемой при оценке систематических погрешностей стендов является отсутствие эталона для задания трёх компонент вектора силы и трёх компонент вектора момента одновременно. Поэтому приходится искать иные способы для оценки погрешностей. В настоящее время существуют следующие способы:

вывод аналитических выражений для систематических погрешностей [3, 4, 11] на основе кинематической схемы стенда;

использование откалиброванных на стенде весов в одном угловом положении при их другом угловом положении на том же стенде [10]. При этом уравнения измерения весов, откалиброванных в стандартном положении на стенде, рассматривают как эталонные и применяют при развёрнутом положении весов для оценки систематических погрешностей стенда;

мастер-калибровка [6];

калибровка одних и тех же весов на разных калибровочных стендах [4, 12].

Цель настоящей работы – верификация аналитических выражений для систематических погрешностей калибровочного стенда ЦАГИ 6ГС-40М [11]. Для этого разработан оригинальный метод верификации и проведены специальные экспериментальные исследования системы задания нагрузок стенда, на котором отсутствуют тензометрические весы. В процессе исследований калибровочное приспособление стенда перемещается вдоль трёх взаимно перпендикулярных осей

при различном натяжении лент, с помощью которых задаются нагрузки.

Автоматизированный калибровочный стенд 6ГС-40М.

Автоматизированный шестикомпонентный калибровочный стенд 6ГС-40М, разработанный в ЦАГИ, предназначен для воспроизведения сил и моментов при исследованиях, калибровках и поверках внутри- и внемоделльных тензометрических весов. Данный стенд является развитием первого автоматизированного стенда МСЭ-000 для аэродинамической трубы Т-109, созданного в ЦАГИ в 1959–1960 гг. под руководством профессора Г. М. Мусинянца, ученика и соратника профессора Н. Е. Жуковского.

На стенде 6ГС-40М воспроизводятся следующие диапазоны трёх компонент вектора силы (продольной X , нормальной Y и поперечной Z) и трёх соответствующих компонент вектора момента шестикомпонентных тензометрических весов:

$$X = \pm 5 \text{ кН}; Y = -26 \dots + 40 \text{ кН}; Z = -3 \dots + 6 \text{ кН};$$

$$M_x = \pm 1,5 \text{ кН} \cdot \text{м}; M_y = \pm 2 \text{ кН} \cdot \text{м}; M_z = \pm 8 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Принципиальная схема стенда 6ГС-40М представлена на рис. 1. В основании 1 стенда закреплена хвостовая часть тензометрических весов 2, а в калибровочном приспособлении 3 – передняя часть. Калибровочное приспособление с узлами крепления тяг и системой суммирующих рычагов спроектировано так, что силы задаются относительно начала координат стенда – точки O , которая жёстко связана с калибровочным приспособлением. Приложенные к весам нагрузки задаются в системе координат основания стенда (нормальная система координат), поэтому измерительная система координат весов совпадает с нормальной. При задании нагрузок тензометрические весы деформируются, что приводит к изменению линейного и углового положений калибровочного приспособления в пространстве и, соответственно, к возникновению систематических погрешностей. Силу X задают системой трёх металлических упругих лент и электромеханизмов H_x , HM_{y1} , HM_{y2} , а момент рыскания M_y – электромеханизмами HM_{y1} , HM_{y2} . По показаниям датчиков перемещений находят перемещение калибровочного приспособления вдоль оси OX и его перемещение по углу рыскания. Силу Y задают с помощью одной ленты и электромеханизма H_y , по показаниям датчика перемещений которого определяют перемещение калибровочного приспособления вдоль оси OY . Силу Z задают системой двух металлических лент и электромеханизмов H_{z1} и H_{z2} . По показаниям датчиков перемещений электромеханизмов находят перемещение калибровочного приспособления вдоль оси OZ . Моменты крена M_x и тангажа M_z задают электромеханизмами HM_x и HM_z соответственно. Ленты, посредством которых к калибровочному приспособлению прикладываются нагрузки, предварительно натягиваются. Средние квадратические отклонения (СКО) результатов измерений (по показаниям установленных в электромеханизмах датчиков) перемещений калибровочного приспособления составляют 0,8 мм для датчика H_y и 0,2 мм – для остальных датчиков.

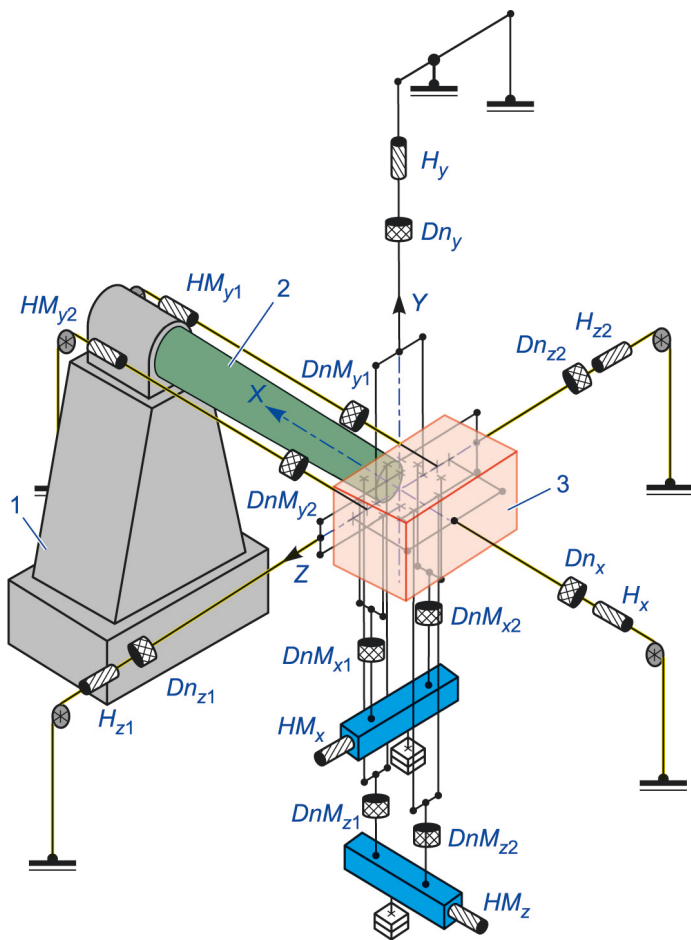


Рис. 1. Принципиальная схема стенда 6ГС-40М:
1 – основание стенда; 2 – тензометрические весы; 3 – калибровочное приспособление; Dn – датчики измерения сил и моментов; H – электромеханизмы задания сил и моментов и измерения перемещений по осям

Fig. 1. Principal scheme of the 6GS-40M calibration machine:
1 – base of the calibration machine; 2 – strain gauge balance; 3 – calibration body; Dn – dynamometers; H – force generators and displacement measurement units

Силы и моменты, приложенные к калибровочному приспособлению, измеряются динамометрами. Для измерений силы и момента X и M_x используются динамометры Dn_x , DnM_{y1} , DnM_{y2} и DnM_{x1} , DnM_{x2} соответственно; Y и M_y – Dn_y и DnM_{y1} , DnM_{y2} соответственно; Z и M_z – Dn_{z1} , Dn_{z2} и DnM_{z1} , DnM_{z2} соответственно. Диапазоны измерений динамометров DnM_{y1} , DnM_{y2} , Dn_{z1} , Dn_{z2} , DnM_{x1} , DnM_{x2} составляют ± 5 кН, динамометров Dn_x , Dn_{z1} – ± 10 кН, динамометров DnM_{z1} , DnM_{z2} – ± 20 кН, динамометра Dn_y – ± 70 кН.

Погрешность динамометров, отнесённая к половине их диапазона измерений, составляет 0,02 %. Она является одной из составляющих погрешности измерения сил и моментов, задаваемых калибровочным стендом. Инструментальная погрешность измерения продольной силы X определяется погрешностями динамометров Dn_x , DnM_{y1} , DnM_{y2} и составляет $\Delta X_i = \pm 2,45$ Н или 0,049 % диапазона продольной

силы. Инструментальная погрешность $\Delta Y_i = \pm 14$ Н измерения нормальной силы Y (или 0,04 % диапазона) обусловлена погрешностью динамометра Dn_y . Инструментальная погрешность $\Delta Z_i = \pm 1,7$ Н измерения поперечной силы Z зависит от погрешностей динамометров Dn_{z1} , Dn_{z2} и составляет 0,028 % диапазона поперечной силы. Инструментальная погрешность $(\Delta M_y)_i = \pm 1,41$ Н·м измерения момента рыскания M_y , определяемая погрешностями динамометров DnM_{y1} , DnM_{y2} , составляет 0,07 % диапазона момента.

Углы тангажа и крена калибровочного приспособления измеряются с помощью маятниковых акселерометров [17–19], метод измерения приведён в [18]. Погрешность акселерометров А-17, которые используются на стенде, составляет 0,001° при малых значениях измеряемых углов [18].

Систематические погрешности калибровочного стенда 6ГС-40М. В статье [11] получены аналитические выражения для поправок (систематических погрешностей, взятых с обратным знаком) к задаваемым компонентам векторов силы и момента на калибровочном стенде 6ГС-40М. Обобщим систематические погрешности, обусловленные приложением различных компонент векторов силы и момента [11] и запишем выражения для поправок к продольной X , нормальной Y и поперечной Z силам:

$$\Delta X = -R_y \frac{H_x}{L_y} - (R_{z1} + R_{z2}) \frac{H_x}{L_z}; \quad (1)$$

$$\Delta Y = -(R_{M_{y1}} + R_{M_{y2}}) \frac{H_y}{L_{M_y}} - R_x \frac{H_y}{L_x} - (R_{z1} + R_{z2}) \frac{H_y}{L_z} + (R_{M_{y1}} - R_{M_{y2}}) \frac{L_{M_y}^z \sin \gamma}{2L_{M_y}}; \quad (2)$$

$$\Delta Z = -M_y (R_{M_{y1}} + R_{M_{y2}}) \frac{H_z}{L_{M_y}} - R_x \frac{H_z}{L_x} - R_y \frac{H_z}{L_z}, \quad (3)$$

где R – показания датчиков силы динамометров; L_y , L_z – расстояния от оси OX соответственно до точки закрепления подвеса двигателя H_y и до оси блоков, расположенных за двигателями H_{z1} , H_{z2} ; L_{M_y} , L_x – расстояния от оси OY соответственно до оси блоков, расположенных за двигателями $H_{M_{y1}}$, $H_{M_{y2}}$, и до оси блока, находящегося за двигателем H_x ; γ – угол крена калибровочного приспособления; $L_{M_y}^z$ – расстояние между лентами, к которым прикладываются силы M_{y1} и M_{y2} , т. е. плечо для задания момента M_y .

Максимальное значение последнего члена в выражении (2) не превышает 1,254 Н, что составляет 0,006 % диапазона компоненты Y .

Выражения для поправок ΔM_x , ΔM_y , ΔM_z к моментам соответственно крена M_x , рыскания M_y и тангажа M_z запишем в следующем виде:

$$\Delta M_x = M_x (\cos \gamma - 1) - (R_{M_{y1}} + R_{M_{y2}}) \frac{(L_{M_y}^z)^2 \sin \gamma}{4L_{M_y}} + (R_{M_{y2}} - R_{M_{y1}}) \frac{H_y L_{M_y}^z}{2L_{M_y}}; \quad (4)$$

$$\Delta M_y = M_y(\cos \gamma \cos \psi - 1); \quad (5)$$

$$\Delta M_z = M_z(\cos \theta - 1); \quad (6)$$

где ψ , θ – углы соответственно рыскания и тангажа калибровочного приспособления.

Поправки к моментам рыскания (5) и тангажа (6) не превышают 0,03 % измеряемой величины, поскольку при калибровке весов на стенде 6ГС-40М ψ , $\theta \leq 1,5^\circ$ [11].

Приведём значения геометрических параметров для калибровочного стенда 6ГС-40М: $L_x = 3,8$ м; $L_y = 3,83$ м; $L_z = 4,1$ м; $L_{My} = 9$ м; $L_{Mz}^z = 1$ м.

В соответствии с [11] линейные перемещения калибровочного приспособления H_x , H_y , H_z и угловое перемещение в горизонтальной плоскости ψ вычислим как

$$\left. \begin{aligned} H_x &= -(\Delta r_{My1} + \Delta r_{My2} - 2\Delta r_x) / 4; \\ H_y &= -\Delta r_y; \\ H_z &= (\Delta r_{z2} - \Delta r_{z1}) / 2; \\ \psi &= (\Delta r_{My2} - \Delta r_{My1}) / L_{My}^z, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где Δr_{My1} , Δr_{My2} , Δr_x , Δr_y , Δr_{z1} , Δr_{z2} – изменения длины лент, соединяющих калибровочное приспособление и динамометры Dn_{My1} , Dn_{My2} , Dn_x , Dn_y , Dn_{z1} , Dn_{z2} соответственно.

Согласно [11] изменения длины лент в выражениях (7) найдём по формуле

$$\Delta r_i = rH_{Ni} - rH_{N0} + K_N(rDn_{Ni} - rDn_{N0}), \quad (8)$$

где rH_{Ni} , rH_{N0} показания датчика перемещения, прикреплённого к динамометру Dn_{Ni} , и начальное показание датчика соответственно; K_N – коэффициент жёсткости ленты, соединяющей калибровочное приспособление и динамометр Dn_{Ni} ; rDn_{Ni} , rDn_{N0} – сила натяжения ленты, измеренная динамометром Dn_{Ni} , и начальная сила натяжения ленты соответственно.

Из формулы (8) следует, что для корректной работы стенда необходимо задать первоначальное натяжение лент. Последний член выражения (8) представляет собой растяжение ленты под воздействием силы натяжения. Значения коэффициентов жёсткости лент калибровочного стенда 6ГС-40М получены в [11]: $K_y = 7,41 \cdot 10^{-7}$ м/Н; $K_x = 6,40 \cdot 10^{-6}$ м/Н; $K_{z1} = 7,86 \cdot 10^{-6}$ м/Н; $K_{z2} = 9,94 \cdot 10^{-6}$ м/Н; $K_{My1} = 1,95 \cdot 10^{-5}$ м/Н; $K_{My2} = 1,70 \cdot 10^{-5}$ м/Н.

Метод экспериментального определения систематических погрешностей. С целью верификации аналитических выражений (1)–(3) для систематических погрешностей калибровочного стенда 6ГС-40М разработан оригинальный метод и проведены специальные экспериментальные исследования без использования тензометрических весов. Из уравнения (1) следует, что при изменении натяжения лент R_y , R_{z1} , R_{z2} и положения калибровочного приспособления H_x вдоль оси ОХ возникает продольная сила ΔX , которая является искомым поправкой к продольной силе X , и которую следует сравнивать с аналитическим выражением (1) для его

верификации. Этим же методом исследуем систематические погрешности, описанные выражениями (2), (3).

Экспериментальные исследования для верификации систематических погрешностей. В отсутствие тензометрических весов на калибровочном стенде 6ГС-40М задавали несколько значений натяжения лент, соединяющих калибровочное приспособление с электромеханизмами. Натяжения лент измеряли динамометрами (см. рис. 1). Калибровочное приспособление перемещалось вдоль осей ОХ, ОУ, ОZ посредством электромеханизмов, перемещения измеряли с помощью датчиков в электромеханизмах. Диапазон перемещения калибровочного приспособления будет максимальным при калибровке внемоделных тензометрических весов, линейные и угловые деформации которых значительно больше, чем деформации внутримодельных весов. В [11] приведены следующие максимальные перемещения калибровочного приспособления при калибровке внемоделных весов: $H_x = 1,8$ мм; $H_y = 70,7$ мм; $H_z = 11,7$ мм; $\gamma = 2,6^\circ$; $\psi = 1,4^\circ$; $\theta = 0,5^\circ$. Диапазон перемещения калибровочного приспособления вдоль осей по возможности выбирали соответствующим диапазону, получаемому при калибровке внемоделных весов. Программа экспериментальных исследований приведена в табл. 1.

В опыте 1 изменяли натяжение лент вдоль оси ОZ, а калибровочное приспособление перемещалось вдоль оси ОХ в диапазоне ± 10 мм с шагом 2,5 мм. Результаты этого опыта позволили верифицировать поправку к продольной силе, описанную формулой (1). В опыте 2 изменяли натяжение лент вдоль осей ОХ, ОZ, калибровочное приспособление перемещалось вдоль оси ОУ в диапазоне ± 10 мм с шагом 5 мм. Угол крена калибровочного приспособления $\gamma = 0$. Результаты этого опыта позволили верифицировать поправку к нормальной силе, описанную формулой (2). В опыте 3 изменяли натяжение лент вдоль оси ОZ, калибровочное приспособление перемещалось вдоль оси ОZ в диапазоне ± 5 мм с шагом 2,5 мм. Результаты этого опыта позволили верифицировать поправку к поперечной силе, описанную формулой (3).

Результаты опыта 1 представлены на рис. 2 в сравнении с аналитическим выражением (1) в виде зависимости поправки к продольной силе X от перемещения калибровочного приспособления вдоль оси ОХ. Экспериментальные данные указаны с погрешностью измерения продольной

Таблица 1

Программа экспериментальных исследований по верификации стенда 6ГС-40М

Номер опыта	Перемещение вдоль оси	Натяжение ленты, кН					
		X	M_{y1}	M_{y2}	z1	z2	Y
1	ОХ	4,40	2,20	2,20	3,54	3,57	26,0
		4,40	2,20	2,20	4,43	4,46	26,1
2	ОУ	3,92	1,95	1,93	3,87	3,90	26,0
		1,96	0,96	0,95	1,92	1,95	26,6
3	ОZ	1,97	0,97	0,96	3,70	3,80	26,0
		3,95	1,96	1,95	3,80	3,90	26,1

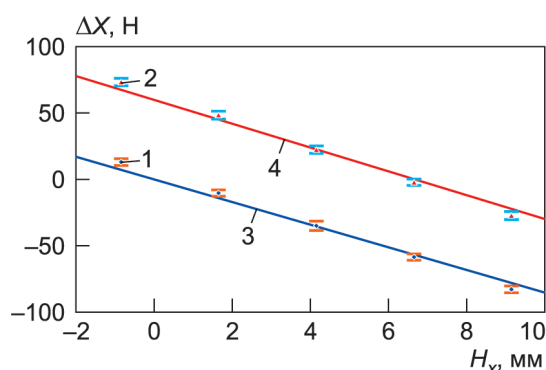


Рис. 2. Поправки к продольной силе в зависимости от перемещения, полученные при различных показаниях динамометров $R_{z1}=3,54$ кН, $R_{z2}=3,57$ кН (кривые 1, 3); $R_{z1}=4,43$ кН, $R_{z2}=4,46$ кН (кривые 2, 4): 1, 2 – экспериментальные значения; 3, 4 – значения, рассчитанные по уравнению (1)

Fig. 2. Correction to the axial force as a function of displacement: 1, 3 – $R_{z1}=3,54$ кН, $R_{z2}=3,57$ кН; 2, 4 – $R_{z1}=4,43$ кН, $R_{z2}=4,46$ кН; 1, 2 – experimental data; 3, 4 – equation (1)

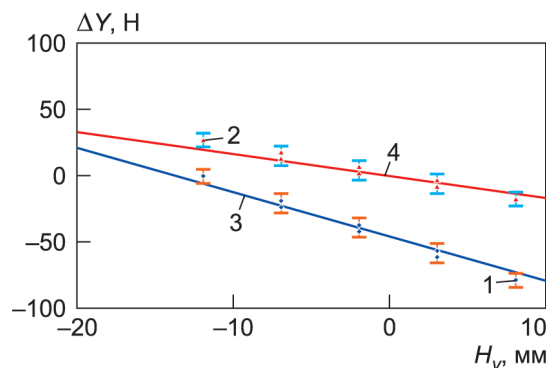


Рис. 3. Экспериментальные (1, 2) и рассчитанные по уравнению (2) (3, 4) значения поправки к нормальной силе в зависимости от перемещения при различных показаниях динамометров: 1, 3 – $R_x=3,92$ кН, $R_{My1}=1,95$ кН, $R_{My2}=1,93$ кН, $R_{z1}=3,87$ кН, $R_{z2}=3,90$ кН; 2, 4 – $R_x=1,96$ кН, $R_{My1}=0,96$ кН, $R_{My2}=0,95$ кН, $R_{z1}=1,92$ кН, $R_{z2}=1,95$ кН

Fig. 3. Correction to the normal force as a function of displacement: 1, 3 – $R_x=3,92$ кН, $R_{My1}=1,95$ кН, $R_{My2}=1,93$ кН, $R_{z1}=3,87$ кН, $R_{z2}=3,90$ кН; 2, 4 – $R_x=1,96$ кН, $R_{My1}=0,96$ кН, $R_{My2}=0,95$ кН, $R_{z1}=1,92$ кН, $R_{z2}=1,95$ кН; 1, 2 – experimental data; 3, 4 – equation (2)

силы, приведенной в разделе «Автоматизированный калибровочный стенд 6ГС-40М». Экспериментальные данные 2 и соответствующая им аналитическая поправка 4 сдвинуты вдоль оси ординат на 60 Н для лучшего различия точек и кривых.

Расчётная поправка к компоненте X, описанная выражением (1), согласуется с результатами опыта. При увеличении силы натяжения лент вдоль оси OZ поправка к продольной силе увеличивается. Максимальная разность экспериментальных и расчётных поправок в диапазоне перемещения калибровочного приспособления $H_x=-2...+10$ мм не превышает 5,53 Н, что составляет 0,11 % диапазона измерения компоненты X и лишь незначительно превышает её инструментальную погрешность. Максимальная поправка

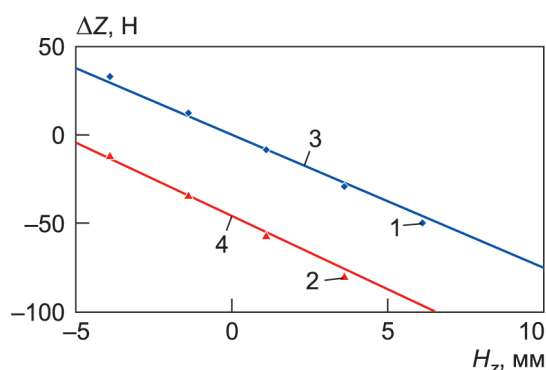


Рис. 4. Экспериментальные (1, 2) и рассчитанные по уравнению (3) (3, 4) значения поправки к нормальной силе в зависимости от перемещения при различных показаниях динамометров: 1, 3 – $R_x=1,97$ кН, $R_{My1}=0,97$ кН, $R_{My2}=0,96$ кН; 2, 4 – $R_x=3,96$ кН, $R_{My1}=1,96$ кН, $R_{My2}=1,95$ кН

Fig. 4. Correction to the side force as a function of displacement: 1, 3 – $R_x=1,97$ кН, $R_{My1}=0,97$ кН, $R_{My2}=0,96$ кН; 2, 4 – $R_x=3,96$ кН, $R_{My1}=1,96$ кН, $R_{My2}=1,95$ кН; 1, 2 – experimental data; 3, 4 – equation (3)

в исследуемом диапазоне перемещения калибровочного приспособления составляет 90 Н или 1,8 % половины диапазона компоненты X, что существенно превышает инструментальную погрешность компоненты. Таким образом, расчётная поправка (1) верифицирована результатами эксперимента с погрешностью 0,11 %, отнесённой к половине диапазона компоненты X стенда. Наклон экспериментальных кривых больше наклона расчётных кривых приблизительно на 4,3 %.

Результаты опыта 2 представлены на рис. 3 в сравнении с аналитической зависимостью (2) в виде зависимости поправки к нормальной силе Y от перемещения калибровочного приспособления вдоль оси OY. Экспериментальные данные приведены с указанной выше погрешностью измерения нормальной силы динамометром Dn_y . Экспериментальные данные 1 и соответствующая им аналитическая поправка 3 сдвинуты на 46 Н по оси ординат.

Расчётная поправка к компоненте Y, описанная выражением (2), согласуется с результатами опыта. При увеличении силы натяжения лент вдоль осей OX, OZ поправка к нормальной силе увеличивается. Максимальная разность экспериментальных и расчётных поправок в диапазоне перемещения калибровочного приспособления $H_y=-11,9...+8,1$ мм не превышает 5,71 Н, что составляет 0,009 % диапазона компоненты Y и почти в три раза меньше инструментальной погрешности динамометра Dn_y . Максимальная поправка в исследуемом диапазоне перемещения калибровочного приспособления составляет 50 Н или 0,07 % половины диапазона компоненты Y, что более чем в три раза превышает инструментальную погрешность компоненты. Таким образом, расчётная поправка (1) верифицирована результатами эксперимента с погрешностью 0,01 %, отнесённой к половине диапазона компоненты Y. Наклон экспериментальных кривых больше наклона расчётных кривых приблизительно на 11 %.

Результаты опыта 3 с погрешностью измерения поперечной силы, рассчитанной по инструментальным погрешностям динамометров Dn_{z1} , Dn_{z2} , а также аналитическая

зависимость (3) – зависимость поправки к поперечной силе Z от перемещения калибровочного приспособления вдоль оси OZ , представлены на рис. 4. Экспериментальные данные 1 и соответствующая им аналитическая поправка 3 сдвинуты на 46 Н по оси ординат.

Расчётная поправка к компоненте Z , описанная выражением (3), согласуется с результатами опыта. При увеличении силы натяжения лент вдоль оси OX поправка к поперечной силе увеличивается. Максимальная разность экспериментальных и расчётных поправок в диапазоне перемещения калибровочного приспособления $H_z = 3,9...+6,1$ мм не превышает 3,7 Н, что составляет 0,04 % от половины диапазона компоненты Z и примерно в два раза превышает её инструментальную погрешность. Максимальная поправка в исследуемом диапазоне перемещения калибровочного приспособления составляет 50 Н или 0,8 % половины диапазона компоненты Z , что существенно превышает инструментальную погрешность компоненты. Расчётная поправка (3) верифицирована результатами эксперимента с погрешностью 0,04 %, отнесённой к половине диапазона компоненты Z . Наклон экспериментальных кривых больше наклона расчётных кривых приблизительно на 7 %.

Оценим поправки, которые получаются при калибровке на калибровочном стенде 6ГС-40М тензометрических весов двух типов: внемодельных 6ЭВ128-3(1) и внутримодельных В6-710(1) с одинаковыми диапазонами нормальной силы. Диапазоны d компонент обоих весов, максимальные угловые и линейные деформации весов, а также поправки к заданным на стенде нагрузкам Δ и поправки $\Delta/(2d)$, отнесённые к половине диапазона компоненты, приведены в табл. 2.

Значения поправок ко всем компонентам векторов сил и моментов вне- и внутримодельных тензометрических весов превышают погрешности определения поправок. Значения поправок больше погрешностей (0,05 %) калибровочного стенда. Следовательно, эти поправки значимы и их следует добавлять к нагрузкам, задаваемым калибровочным стендом 6ГС-40М.

Заключение. Разработанный экспериментальный метод определения систематических погрешностей стенда 6ГС-40М позволил верифицировать ранее предложенные аналитические поправки. Проведённые исследования показали, что систематические погрешности калибровочного стенда 6ГС-40М обусловлены линейными и угловыми деформациями тензометрических весов и линейными деформациями металлических лент. Производные экспериментальных поправок к компонентам силы по перемещению калибровочного приспособления получились на 4,3–11,0 % больше, чем для расчётных поправок. Одной из возможных причин является то, что датчики электромеханизмов задания силы и измерения перемещения не измеряют растяжение части ленты между электромеханизмом и точкой закрепления ленты. Это приводит к заниженной оценке перемещения калибровочного приспособления и, соответственно, к занижению расчётной поправки. Для подтверждения этой гипотезы можно измерить перемещения калибровочного приспособления другим методом, например методом видеограмметрии.

Таблица 2

Деформации тензометрических весов и поправки к нагрузкам, задаваемым стендом 6ГС-40М

Компонента	d, кН	Максимальная деформация		Δ, Н	Δ/(2d), %
		линейная, мм	угловая, °		
Тензометрические весы 6ЭВ128-3(1)					
X	±5	0,5	0	23	0,46
Y	±20	71,5	2,69	180,5	0,90
Z	±3	10,9	0,40	83,8	2,80
Тензометрические весы В6-710(1)					
X	±2	0,5	0	3,5	0,18
Y	±20	7,3	0,94	18,5	0,09
Z	±4	2,2	0,23	17,3	0,43

Полученные систематические погрешности сил, задаваемых при калибровке тензометрических весов на стенде 6ГС-40М, превышают значения, указанные в качестве требований к точности стендов. Следовательно, учёт определённых в данной работе систематических погрешностей повышает точность стенда.

Разработанную методику верификации систематических погрешностей можно применять для калибровочных стендов аналогичных конструкций.

Список источников

1. Frank L., Experience relative to the interaction between balance engineer and the project engineer with regard to measurement uncertainty, *Proceedings of a First International Symposium on Strain Gauge Balances First International Symposium on Strain Gauge Balances*, USA, October 22–25, 1996, pp. 243–277. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990072764/downloads/19990072764.pdf> (дата обращения: 07.02.2022).
2. Бухаров К. Д., Горбушин А. Р., Карташев Ю. В., Петровневич В. В., Судакова И. А., Чернышев С. Л. Апробация весового непрерывного эксперимента в трансзвуковой аэродинамической трубе Т-128 на дозвуковых режимах // Учёные записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII. № 7. С. 27–45.
3. Гусев В. П., Тухомиров В. И. Основные систематические погрешности калибровочного стенда МСЭ-000 // Труды ЦАГИ. 1983. Вып. 2207. С. 107–114.
4. *First International Symposium on Strain Gauge Balances*, USA, October 22–25, 1996. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990072764/downloads/19990072764.pdf> (дата обращения: 07.02.2022).
5. Ewald B. F. R., *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 6, pp. 81–94. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/6/201>
6. Hufnagel K., Quade M., *Proceedings 45th AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit.*, 08–11 January 2007, Reno, Nevada, AIAA, 2007. <https://doi.org/10.2514/6.2007-148>
7. Zhu Ben-hua, Liang Lei, Crucial technology analysis on restoration measurement of automatic balance calibration system, *Ordinance industry automation*, 2009, vol. 28 (12), pp. 79–88.

8. Xiong Lin, Wang Jinyin, Liu Jiahua, Wen Shuai, Liu Chunfeng, Jiang Ping, *J. Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, vol. 29 (6), pp. 84–88. <https://doi.org/10.11729/sytlx20140144>
9. Landman D., Toro K. G., Commo S. A., Lynn K. C., *Journal of Aircraft*, 2015, vol. 52, no. 3. <https://doi.org/10.2514/1.C032930>
10. Волобуев В. С., Горбушин А. Р., Судакова И. А., Тихомиров В. И. Два способа калибровки тензометрических весов на калибровочных стендах ЦАГИ // Учёные записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII. № 2. С. 62–70.
11. Большакова А. А., Волобуев В. С., Горбушин А. Р., Петровневич В. В. Исследование систематических погрешностей калибровочного стенда 6ГС-40М // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 10–14.
12. Toro K., Burns D., Parker P. A., *Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, June 25–29, 2018, Atlanta, Georgia, AIAA, 2018, 4108. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4108>
13. Danilov M. N., Bardaev P. P., *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2125, 030091. <https://doi.org/10.1063/1.5117473>
14. Simpson J., Landman D., Giroux R., Zeisset M., Hall B., Rhew R., *U.S. Air Force T&E Days*, 06–08 December 2005, Nashville, Tennessee, AIAA, 2005, 7601. <https://doi.org/10.2514/6.2005-7601>
15. Буров В. В., Волобуев В. С., Глазков С. А., Горбушин А. Р., Чумаченко Е. К. Измерительно-вычислительный комплекс трансзвуковой аэродинамической трубы Т-128 // Датчики и системы. 2010. № 5 (132). С. 20–24.
16. Glazkov S. A., Gorbushin A. R., Ivanov A. I., Semenov A. V., *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 263–298. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(01\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(01)00007-0)
17. Quest J., Schimanski D., *Proceedings 41th AIAA: Aerospace Sci. Meeting and Exhibit.*, 06–09 January 2003, Reno, Nevada, AIAA, 2003, 755. <https://doi.org/10.2514/6.2003-755>
18. Горбушин А. Р., Колесников А. И. Трёхкомпонентная математическая модель одноосевого акселерометра для измерения углов тангажа и крена // Измерительная техника. 2019. № 2. С. 23–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1052it.2019-2-23-28>
19. Toro K. G., Parker P. A., *AIAA Aviation 2019 Forum*, 17–21 June 2019, Dallas, Texas, AIAA, 2019, 2807. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2807>
3. Gusev V. P., Tikhomirov V. I., Osnovnye sistematische pogreshnosti kalibrovochnogo stenda MSEH-000, *Trudy TSAGI*, 1983, vol. 2207, pp. 107–114. (In Russ.)
4. *First International Symposium on Strain Gauge Balances*, USA, October 22–25, 1996, available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990072764/downloads/19990072764.pdf> (accessed: 07.02.2022).
5. Ewald B. F. R., *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 6, pp. 81–94. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/6/201>
6. Hufnagel K., Quade M., *Proceedings 45th AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit.*, 08–11 January 2007, Reno, Nevada, AIAA, 2007. <https://doi.org/10.2514/6.2007-148>
7. Zhu Ben-hua, Liang Lei, Crucial technology analysis on restoration measurement of automatic balance calibration system, *Ordnance industry automation*, 2009, vol. 28 (12), pp. 79–88.
8. Xiong Lin, Wang Jinyin, Liu Jiahua, Wen Shuai, Liu Chunfeng, Jiang Ping, *J. Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, vol. 29 (6), pp. 84–88. <https://doi.org/10.11729/sytlx20140144>
9. Landman D., Toro K. G., Commo S. A., Lynn K. C., *Journal of Aircraft*, 2015, vol. 52, no. 3. <https://doi.org/10.2514/1.C032930>
10. Volobuyev V. S., Gorbushin A. R., Sudakova I. A., Tikhomirov V. I., *TsAGI Science Journal*, 2017, vol. 48, no. 2, pp. 187–197. <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2017021104>
11. Bol'shakova A. A., Volobuev V. S., Gorbushin A. R., Petrovnevich V. V., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 763–770. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1268-2>
12. Toro K., Burns D., Parker P. A., *Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, June 25–29, 2018, Atlanta, Georgia, AIAA, 2018, 4108. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4108>
13. Danilov M. N., Bardaev P. P., *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2125, 030091. <https://doi.org/10.1063/1.5117473>
14. Simpson J., Landman D., Giroux R., Zeisset M., Hall B., Rhew R., *U.S. Air Force T&E Days*, 06–08 December 2005, Nashville, Tennessee, AIAA, 2005, 7601. <https://doi.org/10.2514/6.2005-7601>
15. Burov V. V., Volobuev V. S., Glazkov S. A., Gorbushin A. R., Chumachenko E. K., *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, pp. 634–641. <https://doi.org/10.1134/S0005117911030143>
16. Glazkov S. A., Gorbushin A. R., Ivanov A. I., Semenov A. V., *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 263–298. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(01\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(01)00007-0)
17. Quest J., Schimanski D., *Proceedings 41th AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit.*, 06–09 January 2003, Reno, Nevada, AIAA, 2003, 755. <https://doi.org/10.2514/6.2003-755>
18. Gorbushin, A.R., Kolesnikov, A.I., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 2, 118–125. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01595-0>
19. Toro K. G., Parker P. A., *AIAA Aviation 2019 Forum*, 17–21 June 2019, Dallas, Texas, AIAA, 2019, 2807. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2807>

References

1. Frank L., Experience relative to the interaction between balance engineer and the project engineer with regard to measurement uncertainty, *First International Symposium on Strain Gauge Balances*, USA, October 22–25, 1996, pp. 243–277, available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990072764/downloads/19990072764.pdf> (accessed: 07.02.2022).
2. Bukharov K. D., Gorbushin A. R., Kartashev Yu. V., Petrovnevich V. V., Sudakova I. A., Chernyshev S. L., *TsAGI Science Journal*, 2017, vol. 48, no. 7, pp. 627–647. <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2018026242>

Статья поступила в редакцию 29.11.2021; одобрена после рецензирования 18.01.2022; принята к публикации 20.01.2022.
The article was submitted 29.11.2021; approved after reviewing 18.01.2022; accepted for publication 20.01.2022.

Метрология денег 2.0

Крутиков Владимир Николаевич^{1✉}, Окрепилов Владимир Валентинович²

¹ Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия, krutikov@vniiofi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7257-8667>

² Метрологическая академия, Санкт-Петербург, Россия, okrepilov@test-spb.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0830-2081>

Аннотация. Исследована взаимосвязь метрологии и денег. Показано, что государственные системы измерений и государственные денежные системы построены на общих метрологических принципах. Для измерения количества материальных объектов и количества денег необходимо устанавливать соответствующие единицы измерений. Для стабильности указанных выше систем и обеспечения доверия к ним необходимо эталонировать их единицы измерений – принимать определённое количество конкретных материальных объектов (материальных мер) за единицу измерений. При этом руководители государств обязаны поддерживать постоянство принятых страной материальных мер (национальных эталонов).

Эталонирование национальных денежных единиц путём присвоения им конкретной массы золота возникло в XVIII в. Такая денежная система получила название *золотой стандарт*. Однако в 1970-х гг. был нарушен основной метрологический принцип – постоянство (неизменность) единичной материальной меры. От золотой материальной меры денежных единиц отказались. Ценность денег вместо твёрдой материальной меры стали измерять несколькими назначенными резервными валютами, главной из которых стал доллар США. Затем эти резервные валюты стали товаром, который свободно продаётся и покупается на рынке. Система стала нестабильной. Отрицательные последствия произошедших изменений рассмотрены в настоящей статье. Главное из них – возникновение глобальной свертоталитарной, сверхмонопольной денежной системы, в которой мерой ценности денег является национальная валюта (более 85 % объёмов торгов на валютных биржах), регулируемая национальными законами с учётом интересов США.

Рассмотрен выход из создавшейся ситуации – возврат к метрологическому принципу – эталонированию денежных единиц. Поскольку сегодня государственных запасов золота в мире для восстановления *золотого стандарта* недостаточно, то предложен вариант *ресурсного эталонирования*, при котором эталонирование денежных единиц обеспечивается конкретным количеством природных и промышленных государственных ресурсов. Выполнены расчёты для денежной единицы Российской Федерации – российского рубля. Показано, что *ресурсное эталонирование* доступно для всех стран на международном рынке и является реальным направлением преодоления проблем, накопившихся к настоящему времени в международной денежной системе. Отмечена возможность использования цифровых денег при переходе к функционированию государственных денежных систем, организованных по принципу *ресурсного эталонирования*.

Ключевые слова: метрология, система измерений, денежная система, единица измерений, эталон, национальный эталон, материальная мера, «золотой стандарт», товар, рынок, резервная валюта, валютная биржа, государственный ресурс, электронные деньги

Для цитирования: Крутиков В. Н., Окрепилов В. В. Метрология денег 2.0 // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 51–60. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-51-60>

Money metrology 2.0

Vladimir N. Krutikov^{1✉}, Vladimir V. Okrepilov²

¹ Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia, krutikov@vniiofi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7257-8667>

² Metrological Academy, St. Petersburg, Russia, okrepilov@test-spb.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0830-2081>

Abstract. The interrelation of metrology and money is investigated. It is shown that the construction of state measuring systems and state monetary systems is based on general metrological principles. To measure the amount of material objects and the amount of money, it is necessary to establish the appropriate units of measurement. To ensure confidence in these systems and their stability, it is necessary to standardize these units by assigning them a certain number of specific material objects (material measures). At the same time, governments are obliged to maintain the constancy of the material measures adopted by the country (national standards). The standardization of national currency units, by assigning them a specific mass of gold, began to be used in the 18th century and received the name gold standard. In the 70s of the last century the situation changed dramatically: the basic metrological principle – the constancy (invariability) of a single material measure was violated. The gold material measure of monetary units was abandoned. The value of money, instead of a solid material measure, began to be measured by several designated, reserve currencies, the main of which was the dollar. Then these reserve currencies became a commodity that is freely bought and sold in the market.

The system has become unstable. The negative consequences were immediate and some of them are summarized in this article. The most crucial consequence was the emergence of a global over-totalitarian, over-monopoly monetary system. In that system the measure of the value of money is the national currency (more than 85 % of trading volumes on currency stock markets), which is regulated by national laws and the national interests of the United States, that are taken into account.

The article examines the return to the metrological principle – reference standardization of monetary units – as the only way out of the scenario in which the international monetary system was trapped. Since the state reserves of gold available today are not enough to restore the gold standard, this article considers the option of resource standardization, in which the standardization of monetary units is provided by a specific amount of natural and industrial state resources. As an example, the calculations are made for the Russian ruble. It is shown that resource standardization is available for all countries present on the international market, and is a real way to overcome the problems that have accumulated to date in the international monetary system. The article also notes the possibility of using digital money in the transition and further functioning of state monetary systems organized according to the principle of resource standardization.

Keywords: metrology, measuring system, monetary system, unit of measurement, reference standard, national standard, material measure, "gold standard", commodity, market, reserve currency, currency stock market, state resource, electronic money

Введение. Исследование метрологических аспектов денег выявило глубокую связь между государственными системами измерений и государственными денежными системами. В [1] показано, что в классической государственной денежной системе количество денег измеряется в денежных единицах (рубль, доллар, юань и т. д.), и в классической государственной системе измерений количество физических величин также измеряется в единицах величин (метр, килограмм, секунда, ампер и т.д.). Иными словами, в обеих системах для определения количественных характеристик объектов используют *единицы измерения величин*. Чтобы обеспечить стабильность этих национальных систем и доверие к ним, государства эталонируют принятые единицы измерений, т. е. создают государственные эталоны единиц [2, 3]. При этом государства, создающие национальные эталоны единиц [2, 3] должны поддерживать их сохранность и неизменность.

При эталонировании единицы физической величины выбирается конкретное количество физической величины, которому присваивается статус единицы измерения данной физической величины (ЕФВ). В конкретных государствах ЕФВ эталонируются в форме национальных метрологических эталонов. Так был создан, например, в виде гири из сплава металлов эталон килограмма, который постепенно был признан во всём мире в качестве эталонной единицы массы вещества (материала). Сегодня он хранится в Международном бюро мер и весов под Парижем как Международный эталон килограмма.

Если раньше в основном характеристиками товара были масса, длина и объём, то сейчас для выражения характеристик товара с так называемым высоким уровнем переработки требуется использовать гораздо больше ЕФВ. Государствам требуется создавать всё новые и новые эталоны. В настоящее время в мире применяется несколько сотен различных эталонов ЕФВ. Например, для описания характеристик современного самолёта потребуется не менее 40 эталонов ЕФВ.

Эталонирование ЕФВ имеет исключительную важность для товарного рынка: оно позволяет измерять характеристики товара и выражать их в единицах величин, которые признаны всеми участниками рынка, а количественные значения этих единиц величин в результате эталонирования поддерживаются неизменными в течение длительного времени. Это,

в свою очередь, обеспечивает единообразие и стабильность методов и средств оценки характеристик товара, а также вызывает доверие к количественным характеристикам.

Эталонирование денег. При эталонировании денежных единиц выбирается конкретное количество физического материала (вещества), ценность которого признается торгующими сторонами, и это конкретное количество определяет ценность данной денежной единицы. Ранее при эталонировании денег выбирали конкретное количество вещества (материала), имеющего высокий спрос на рынке, в том числе на международном, и высокую ценность единицы измерения этого материала. Это выбранное государством количество материала становилось эквивалентом ценности денежной единицы. Важно подчеркнуть, что *именно количество, а не рыночная цена количества вещества* определяет ценность денежных единиц. Ведь именно количество эталонируется в государственной системе измерений и поддерживается неизменным во времени. В то время как цена является формой рыночной оценки товара и изменяется во времени в зависимости от рыночной ситуации. Поэтому цену невозможно использовать в качестве эталона ценности денежных единиц. В разное время в качестве такого конкретного количества материала оказывалась конкретная масса меди, серебра, золота. В конечном итоге золото заняло главенствующее положение [4].

В XVIII в. развитые в экономическом отношении страны начали активно использовать бумажные деньги и, чтобы задекларировать их ценность, стали приписывать денежным единицам фиксированное количество золота. Данное количество (масса) золота становилось эталоном (мерой) ценности конкретной денежной единицы государства. Государство, осуществившее эталонирование денежных единиц, гарантировало поддержание постоянства количества золота, приписанного денежной единице. Иными словами, было гарантировано соблюдение требований к эталонам денежных единиц, аналогичных требованиям к эталонам ЕФВ. Это обеспечивало доверие к (эталонированной) национальной валюте и стабильность её обращения. Соответствующая денежная система получила название *золотой стандарт*. Взаимосвязь между метрологическим обеспечением измерений физических величин и измерением ценности денег в режиме *золотого стандарта* показана на рис. 1.

В монетном исполнении *золотой стандарт* успешно функционировал в далекие античные времена. В бумажном исполнении *золотой стандарт* впервые де-факто начали использовать в Великобритании в 1717 г., в США – в 1834 г. Россия ввела у себя *золотой стандарт* в 1887 г. (реформа С. Ю. Витте), при этом российский рубль эталонировался 0,7 г золота. Один американский доллар в тот период эталонировался 1,37 г золота. Ценность доллара по *золотому стандарту* примерно в два раза превышала ценность рубля.

Современное состояние метрологии денег. Началом завершения почти 250-летнего периода *золотого стандарта* считается 1971 г., когда президент США Р. Никсон принял решение отказаться от гарантированного обмена долларов на объявленный США эквивалент доллара – соответствующую массу золота. Однако окончательно этот механизм перестали использовать в 1978 г., когда вступило в силу Соглашение Ямайской конференции, состоявшейся в 1976 г. в городе Кингстон (Ямайка). Это соглашение устранило функцию золота в качестве *меры ценности национальных валют*. При этом курсы (ценность) национальных валют стали плавающими, а диапазоны изменений стали определяться спросом и предложением национальных валют на международном рынке. Иными словами, национальные валюты стали товаром, рыночная цена которых определялась законами и особенностями рынка.

В соответствии с Бреттон-Вудскими решениями к 1976 г. доллар США уже более 30 лет являлся *ключевой валютой* на международном рынке и занимал лидирующие позиции в части спроса и предложения. Поэтому естественно, что курс (ценность) национальных валют достаточно быстро стал определяться (оцениваться) в долларах США. *Доллар стал единицей измерения ценности национальных валют.*

Однако курс доллара в соответствии с Ямайскими соглашениями изменяется в зависимости от рыночных условий. Ценность доллара США невозможно зафиксировать, она изменяется так же, как и цена любого товара на рынке. Поэтому эталонировать доллар невозможно из-за его непредсказуемой изменчивости, а следовательно, невозможно эталонировать национальные валюты других стран с помощью доллара США в качестве эталона национальных денежных единиц.

При этом на рынке сложилась парадоксальная ситуация. Цена товара определяется рынком и оплачивается деньгами, которые являются товаром, цена которого определяется рынком и оплачивается деньгами, которые являются товаром – и так до бесконечности. Софистика!

Нарушен фундаментальный принцип метрологии – обеспечение достоверности и стабильности измерений количественных величин путём поддержания в неизменном состоянии эталонов единиц измерения величин. Это означает, что *в нынешних условиях невозможно создать стабильную и предсказуемую финансовую и рыночную систему.*

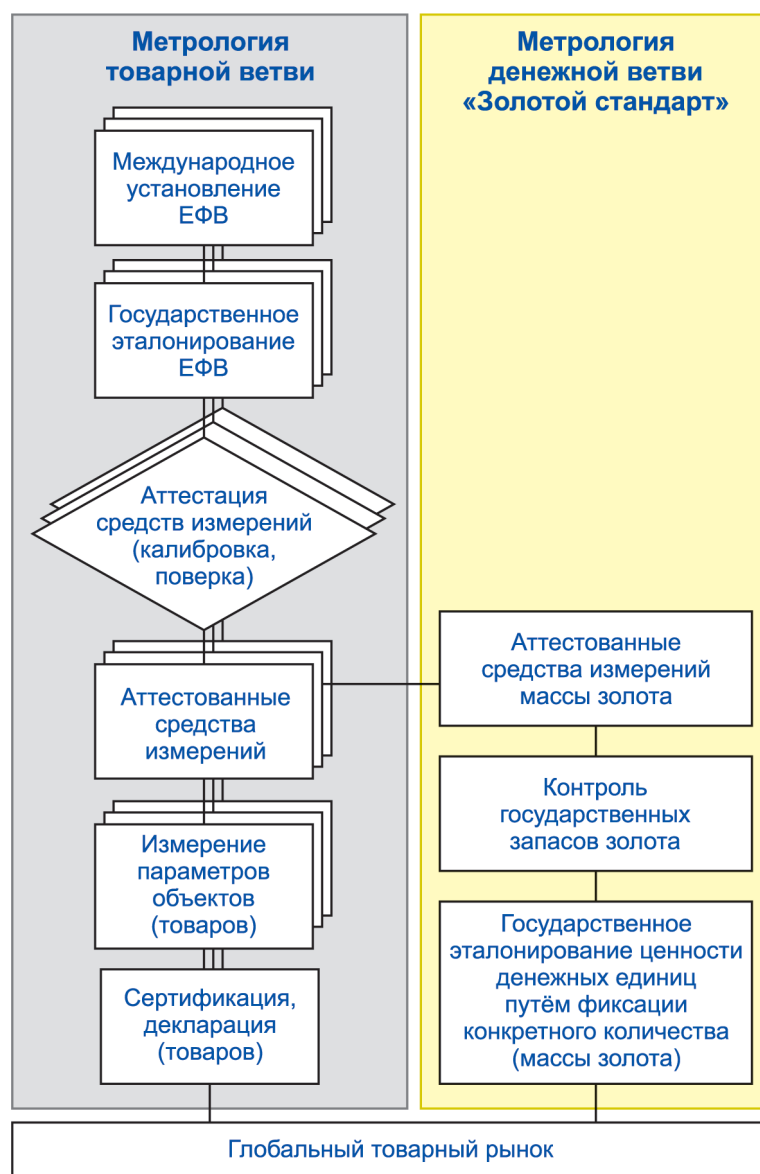


Рис. 1. Схема метрологического обеспечения эталонирования ценности денежных единиц в режиме *золотой стандарт*

Fig. 1. Scheme of metrological support for standardization of the value of monetary units in *the gold standard mode*

Последствия нарушения данного принципа проявились достаточно быстро.

Доллар США начал стремительно дешеветь: по отношению к золоту за последние 40 лет он подешевел почти в 50 раз. Продолжается колоссальное, превышающее мировой валовой внутренний продукт (ВВП), вливание в рынок ничем не обеспеченных долларов США. Это указывает на то, что раздут и продолжает раздуваться долларовый пузырь.

Сегодня в мире обращается от 350 до 550 трлн \$ [5], при общемировом ВВП 100–110 трлн \$ [6]. Это значительно больше общемирового ВВП и в 25 раз больше ВВП США. Существенная часть (более 85 %) этих денег обращается в безналичной форме. Нетрудно посчитать, что один процент (как

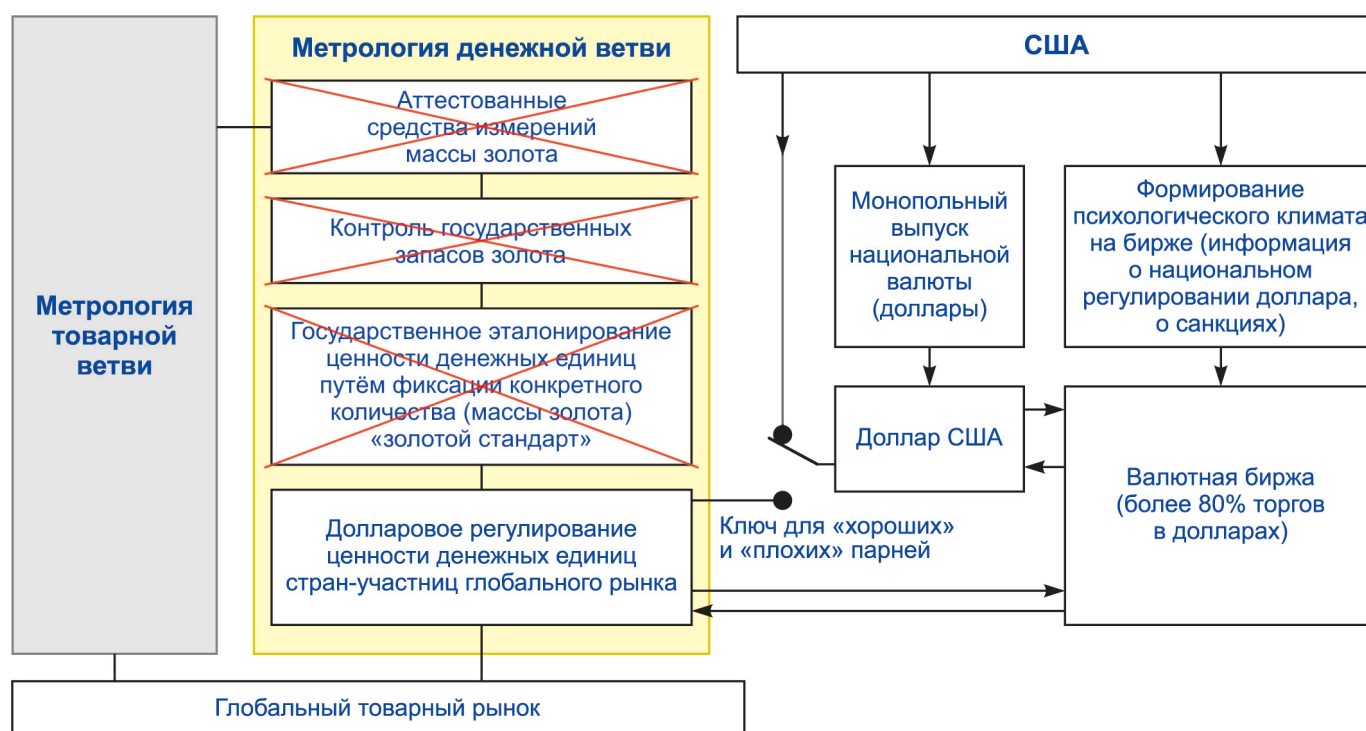


Рис. 2. Схема функционирования долларового регулирования ценности денежных единиц

Fig. 2. The scheme of functioning of the dollar regulation of the value of monetary units

платеж за предоставленный кредит), например 300 трлн \$, составляет 3 трлн \$. Ощутимая часть этих денег попадает в государственный бюджет США и используется для реализации национальных интересов США. В дополнение к этому в основном США регулярно открыто вбрасывают новые порции долларов. В частности, за два «ковидных» года США вбросили не менее 5,0 трлн ничем не обеспеченных долларов. Это больше годового ВВП такой развитой страны, как Германия. Пузырь продолжает раздуваться. На триллионном фоне десятки тысяч участников валютного рынка, в основном долларового рынка (объёмы долларовых торгов составляют 85 %, а рублевых – менее 0,2 %), приобретают и теряют миллионы и миллиарды долларов. Рынок виртуальных денег давно уже превратился в игровую зону. Действует механизм фанатичной веры в доллар, подогреваемой микроскопическими на фоне долларового моря выигрышами и (или) проигрышами иногда даже миллиардов долларов. Эта вера даёт надежду участникам и тем самым отодвигает момент схлопывания пузыря.

Сегодня доллар, являясь национальной валютой США, стал мерой ценности практически всех валют мира. США в полной мере используют национальное законодательство для давления на финансовые системы других государств. Денежные системы подавляющего числа государств, участвующих в международной торговле, находятся под гнётом сверхтоталитарной, сверхмонопольной денежной системы США. Мир разделён на «плохих» и «хороших» парней. Классическая финансовая система, базирующаяся на стабильной

(твёрдой) ценности денег, ликвидирована. Сложившееся сегодня положение в денежной метрологии схематически представлено на рис. 2.

Так как деньги являются товаром, можно утверждать, что создана всемирная бартерная система торговли, когда товар меняется на товар. Практически первобытная торговля в условиях повальной компьютеризации и цифровизации. Сформировавшаяся глобальная финансовая система является в принципе нестабильной, с присущими ей отрицательными факторами, частично отмеченными выше. При этом отсутствуют признаки того, что нарастание отрицательных факторов замедлится.

Нынешняя ситуация тревожит многих экономистов и государственных деятелей участвующих в международной торговле стран. Появляется всё больше предложений по реформированию или даже уходу от нынешней финансовой системы [7].

Возврат к эталонированию. Единственным выходом из этого долларового тумана является *возврат к эталонированию национальных валют с использованием новых подходов*, соответствующих современному состоянию экономики. При этом отсутствуют какие-либо обоснованные препятствия для эталонирования денег путём использования не только золота, но и других востребованных на международном рынке товаров. Важно лишь то, что производство этих товаров должно быть обеспечено соответствующими экономическими возможностями государства.

Основная цель данной статьи – рассмотреть возможные варианты перехода к стабильной предсказуемой международной

финансовой системе, *использующей вместо золотого стандарта ресурсное эталонирование денежных единиц*. Естественно, что при этом следует учитывать современные тенденции развития денежных систем, связанные, в том числе, с цифровизацией экономики.

Электронные формы денег. Развитие цифровых технологий оказывает уже сейчас и будет оказывать в будущем ощутимое влияние на государственные денежные системы. В настоящее время это привело к созданию цифровых (электронных) денег, что необходимо учитывать при рассмотрении вариантов *ресурсного эталонирования* денег. Рассмотрим два варианта цифровых денег: биткойны и электронные деньги.

Биткойны появились в 2009 г. и сегодня используются при платежах. Биткойны ещё называют криптовалютой, поскольку при их создании применяются технологии криптографии для обеспечения конфиденциальности. Электронные деньги, так же как и биткойны, возникли в начале XXI в., их создание и применение аналогичны биткойнам.

В настоящей статье не стоит задача подробного изучения принципов работы биткойнов и электронных денег. Рассмотрим только особенности денежных систем, построенных на основе этих денег с точки зрения возможностей для преодоления недостатков нынешней долларовой международной финансовой системы.

Денежная система на основе биткойнов не имеет регулирующего центра – она децентрализована. Для её функционирования создаётся специализированная цифровая сеть, построенная по принципу блокчейна. Одним из основных принципов функционирования сети на основе биткойнов является обеспечение максимальной конфиденциальности при выполнении транзакций денежных средств. Ценность биткойна, как денежного средства, не обеспечивается никакими материальными ресурсами. Сегодня биткойны, как и другие деньги, являются товаром. Цена биткойна определяется рыночным ажиотажем и зависит от множества субъективных факторов.

В рамках стоящей перед авторами задачи выделим следующие важные особенности биткойн-системы:

децентрализация исключает ответственность сторон, например, при торговой сделке, так как неизвестна третья (независимая) сторона при разрешении возможных противоречий;

единицей измерения ценности биткойна является доллар, за которым тянутся все описанные выше проблемы;

обеспечиваемая биткойн-системой конфиденциальность хороша для спецслужб, террористов, взяточников и других, желающих тайно переводить денежные средства, что не всегда может устраивать государство [8].

Сказанное выше однозначно указывает на то, что биткойн нельзя рассматривать в качестве варианта построения денежной системы, использующей *ресурсное эталонирование* биткойна.

В отличие от биткойна электронные деньги могут фактически исполнять функции национальной валюты и допускают государственное (национальное) регулирование.

Эмитентами электронных денег в России могут выступать банки или другие кредитные организации, имеющие соответствующую государственную лицензию. Электронные деньги, выраженные в национальной валюте (*фиатные электронные деньги*), выпускаются по правилам Центрального банка Российской Федерации. При этом надо помнить, что ценность российской валюты, как и других национальных валют, сегодня оценивается в долларах США. Поэтому, если не принимать соответствующих действий по преодолению долларовой зависимости, электронные деньги только загонят проблемы в цифровые дебри, из которых будет ещё трудней выбраться.

Система электронных денег допускает возможность выпуска негосударственных электронных денег, однако их надёжность государством не гарантируется. Для обеспечения конфиденциальности система электронных денег включает в себя механизмы электронной подписи и криптографии с использованием открытых и закрытых ключей.

Система электронных денег может базироваться на уже привычных для пользователей электронных пластиковых картах и электронных вычислительных устройствах. Только в качестве привычных электронных карт в этом случае требуются смарт-карты, являющиеся фактически микрокомпьютерами [9].

Таким образом, электронные деньги с учётом современных цифровых тенденций подходят для применения при совершенствовании национальных финансовых систем, в том числе при эталонировании ценности денежных единиц. Для этого предстоит обеспечить население страны смарт-картами и другими миниатюрными вычислительными средствами, а также обеспечить также достаточный собственный выпуск смарт-карт и смарт-гаджетов для поддержания суверенитета. Однако для этого потребуются значительное время. Следует также понимать, что переход на электронные деньги без эталонирования их ценности не приведёт к стабильной и суверенной финансовой системе. Ценность цифровых денег по-прежнему будет определяться долларом США со всей его нынешней спецификой. Сегодняшние долларовые проблемы ещё глубже уйдут в дебри цифровизации и избавиться от этих проблем станет ещё труднее.

Возможные варианты эталонирования. Проанализируем различные варианты такого эталонирования. Рассмотрим, как изменилась ценность российского рубля по отношению к доллару США со времён реформы С. Ю. Витте до наших дней. Рубль 1887 г. (Р1887) (эталонировался) обеспечивался 0,7 г золота. В нынешних ценах это соответствует примерно 30 \$ (Д2021). Иными словами, один Р1887 соответствует 30 Д2021. В то же время один Д2021 соответствует примерно 75 сегодняшним рублям (Р2021). Сопоставив данные, получим, что 1 Р1887 соответствует 2250 Р2021. В это трудно поверить, но это можно перепроверить.

Россия пережила Октябрьскую революцию 1917 г., СССР пережил кровопролитную и разрушительную Великую Отечественную войну. Несмотря на это экономика СССР была практически эквивалентна экономике США. Рубль при международных торговых операциях котируется в 1,6 \$. Получается, что

Таблица 1

Доли ВВП США, Китая, Германии и России,
обеспеченные золотым запасом

Страна	ВВП+ВР, трлн \$	Запас золота, тыс. т	Обеспечено ВВП, %
США	25	8,1	1,6
Китай	24	1,9	0,4
Германия	4,4	3,4	3,9
Россия	2,0	2,3	5,8

в течение 100 лет ценность рубля почти не изменялась, а за последние 30 лет рубль обесценился более чем в 2000 раз. Вот такая интересная метрология!

Продолжим исследование возможных вариантов ресурсного эталонирования (обеспечения) национальных валют в современных условиях. Для оценки предположим, что объём национальной валюты, подлежащий эталонированию, должен складываться из объёма ВВП и некоторого валютного резерва (ВР), например 20 % ВВП. Количественные значения ВВП, золотого запаса и других ресурсов, приводимые в открытых источниках, заметно отличаются, поэтому здесь и далее взяты приблизительные значения, которые используются только для оценочных, демонстрационных расчётов.

В табл. 1 приведены значения ВВП с ВР США, Китая, Германии и России, золотой запас этих стран и процентная доля ВВП+ВР, которая может быть обеспечена имеющимся золотым запасом [10]. Для простоты расчётов примем цену одного грамма золота 50 долларов США, а одного доллара 75 рублей.

Обеспеченность золотом национального ВВП Российской Федерации значительно больше, чем Германии, США и Китая. В то же время цифры показывают, что золотое обеспечение даже в Российской Федерации менее 10 %, а в Китае – менее 1,0 % ВВП. Эталонировать национальные валюты только золотом невозможно. Тем не менее и в этих условиях законы метрологии позволяют осуществить эталонирование. Если для эталонирования не хватает золота, то можно использовать *любой материальный ресурс* государства, при условии, что достоверное измерение количественных характеристик ресурса обеспечивается государством, а выбранный ресурс пользуется спросом на международном рынке. Не имеет значения, что его цена на международном рынке сегодня определяется в долларах США. Важно, чтобы количество ресурса измерялось в общепризнанных единицах измерения. При этом, как и в случае *золотого стандарта* за национальной валютой должно стоять конкретное, фиксированное количество государственных материальных ресурсов.

Любая страна (покупатель) согласится на расчёты в валюте, обеспеченной конкретным количеством конкретного товара, имеющего устойчивый спрос на международном рынке. При этом главной является гарантия государства, выпустившего данную национальную валюту, выполнить в случае необходимости обмен валюты на соответствующее количество ресурса (товара), обеспечивающего данную валюту.

Таблица 2

Материальная база ресурсного эталонирования России

Наименование продукции	Единица измерения
Рыба свежая и мороженная	тыс. т
Ракообразные и моллюски	То же
Пшеница	—«—
Мука (пшеничная и т.д.)	—«—
Крупа	—«—
Масло растительное	—«—
Макаронные изделия	—«—
Кондитерские изделия	—«—
Соль природная, пищевая	—«—
Фосфаты кальция	—«—
Руды и концентраты железные	—«—
Уголь каменный	млн. т
Кокс, полукокс	тыс. т
Нефть сырая	млн. т
Нефтепродукты	То же
Газ природный	млрд м ³
Электроэнергия	млрд кВт·ч
Аммиак безводный	тыс. т
Удобрения	То же
Шины резиновые	тыс. шт.
Лесоматериалы обработанные	млн. т
и необработанные	млн. м ³
Ткани	млн м ²
Металлы черные и цветные	тыс. т
Машины, оборудование и транспортные средства	млн \$

Это фактически соответствует режиму *золотого стандарта*. Только вместо золота обеспечением национальных денег становятся конкретные материальные ресурсы государства, востребованные на международном рынке. Такие условия торговли надёжней, чем торговля, когда платежи осуществляются ничем не обеспеченными деньгами.

Некоторые эксперты при обсуждении такой ситуации рассуждали, что цена на тот или иной ресурс может значительно упасть, но ведь известно, что цена падает, когда предложение превышает потребность. Однако, во-первых, производящие данный ресурс страны могут, как показывает практика, по договорённости сокращать его поставку на рынок и тем самым поддерживать приемлемую цену. Во-вторых, эталонирование не должно базироваться только на одном ресурсе. У государства должен оставаться манёвр по страховке потерь другими ресурсами. В-третьих, современные цифровые технологии позволяют государству быстро реагировать на рыночные изменения и *самостоятельно* поддерживать твёрдость национальной валюты.

Следует подчеркнуть, что использование услуг в качестве обеспечивающего ресурса национальных валют не представляется возможным. Это объясняется тем, что в настоящее время отсутствуют обоснованные метрологические методы измерения (определения) объёма оказываемой услуги. *Отсутствует единица измерения услуги.*

Очевидно, что объём национальной валюты, выпускаемой государством в обращение и подлежащей обеспечению ресурсами, должен исходить из объёма ВВП, резервного фонда и ожидаемого роста ВВП на период декларируемого ресурсного обеспечения. Именно декларируемого, так как

государство должно публично устанавливать структуру и период ресурсного обеспечения при эталонировании национальной валюты.

Для примера выполним *ресурсное эталонирование* российского рубля. В табл. 2 приведены 24 наименования товара российского экспорта [11], которые составляют материальную базу для *ресурсного эталонирования*.

Оценочные данные по национальным ресурсам, которые в качестве примера выбраны из табл. 2 для эталонирования российского рубля с использованием ресурсного обеспечения, приведены в табл. 3 [11, 13].

Приведённые в табл. 3 ресурсы востребованы сегодня и будут востребованы за рубежом в обозримом будущем. Единицы измерения количества этих ресурсов обеспечены соответствующими национальными эталонами в России и практически во всех торгующих странах. В течение многих лет с помощью национальных эталонов поддерживается постоянство этих единиц. Контроль количественных параметров приведённых в табл. 2 ресурсов осуществляется с помощью соответствующих средств измерений, прослеживаемых к национальным эталонам России, которые регулярно проходят международные сличения, подтверждают характеристики и признаются во всех развитых странах.

Эталонирование денежных единиц подразумевает определение и фиксацию государством количества (массы, объёма и т. д.) каждого ресурса, из группы выбранных национальных ресурсов (см. табл. 3), которые фактически становятся *групповым материальным эквивалентом (групповым эталоном) соответствующей денежной единицы*. При этом государство обязуется поддерживать эту эквивалентность.

Пример возможного распределения выбранных материальных ресурсов (см. табл. 3) при *ресурсном эталонировании* национальной валюты России – рубля, приведён в табл. 4. Период обеспечения – 5 лет. Для расчётов использован объём обеспечиваемой национальной

валюты 187,5 трлн руб., что эквивалентно 2,5 трлн \$ при курсе 75 руб. за 1,0 \$. Эти объёмы значительно превышают нынешний ВВП России, но здесь важно рассмотреть принципиальную возможность эталонирования. Период обеспечения выбран из предположения, что государственный долг за этот период не превысит национальный ВВП.

При обеспечении эталонирования рубля исходим из количества произведённых (добытых) Россией национальных ресурсов в течение 5 лет. В качестве примера при расчётах используем практически полный объём добытых нефти и газа, часть произведённых нефтепродуктов, угля и электроэнергии, а золото взято с учётом его добычи и запасов в России.

Из табл. 4 следует:

1. Эталонирование рублевой суммы, эквивалентной в настоящее время 2,5 трлн \$ обеспечивается всего шестью национальными ресурсами, даже при современных производственных возможностях России. Объём эталонируемой национальной валюты России в размере 2,5 трлн \$ (190 трлн руб. при курсе 75 руб. за доллар США) взят с большим запасом и значительно превышает нынешний ВВП России.

2. Существенная часть (68 %) эталонируемой суммы покрывается основными энергетическими ресурсами России, которые востребованы на международном рынке в настоящее время и однозначно будут востребованы в следующие 25–30 лет.

3. Столбцы 6–8 (см. табл. 3) показывают, что курс рубля при таком эталонировании можно выбирать с учётом

Таблица 3

Ресурсы, выбранные для эталонирования российского рубля

Вид ресурса (цена за единицу измерения)	Подтвержденные запасы	Добыча в год	Экспорт в год
Сырая нефть (300 \$/т)	12,5 млрд т	560,0 млн т	270,0 млн т
Природный газ (250 \$/тыс. м³)	33 трлн м³	743 млрд м³	260 млрд м³
Нефтепродукты (320 \$/т)	–	–	140 млн т
Уголь (90 \$/т)	157 млрд т	449 млн т	218 млн т
Электроэнергия (59 \$/тыс. кВт·ч)	–	1150 млрд кВт·ч	20 млрд кВт·ч
Золото	15 тыс. т	300 т	100–300 т

Таблица 4

Распределение материальных ресурсов при *ресурсном эталонировании* национальной валюты России – рубля

Вид ресурса	Количество ресурсов	Цена за ед. измерения	Эталонирование		Обеспеченная ресурсом часть ВВП, трлн руб., при разных курсах рубля к доллару, руб.		
			Сумма, млрд \$	Доля, %	75	7,5	0,75
1	2	3	4	5	6	7	8
Сырая нефть	2,65 млрд т	300 \$/т	800	32	60	6	0,6
Природный газ	3,5 трлн м³	250 \$/ тыс. м³	875	36	65	6,5	0,65
Нефтепродукты	630 млн т	320 \$/т	201	8	15	1,5	0,15
Уголь	2,0 млрд т	90 \$/т	180	7	13	1,3	0,13
Электроэнергия	5,0 трлн/кВт·ч	60 \$/тыс. кВт·ч	250	10	18	1,8	0,18
Золото	4,0 тыс. т	50 \$/г	200	7	20	2,0	0,2
Итого			2506	100	–	–	–



Рис. 3. Схема метрологического обеспечения эталонирования ценности денежных единиц в режиме *ресурсный стандарт*

Fig. 3. Scheme of metrological support for standardization of the value of monetary units in the *resource standard* mode

национальных интересов. Отметим, что в табл. 4 приведены три возможных варианта курса рубля: $1 \$ = 75 \text{ руб.}$; $1 \$ = 7,5 \text{ руб.}$; $1 \$ = 0,75 \text{ руб.}$. Например, 2,65 млрд т нефти могут обеспечить 60 трлн руб., 6 трлн руб. и 0,6 трлн руб. в зависимости от количества нефти, выделенной для обеспечения выбранного курса рубля. В рассматриваемом примере изменяется только курс рубля, обеспечиваемый этими ресурсами, а доллар США постоянен. Это ещё раз показывает, что *ресурсное эталонирование* денег позволяет государству устанавливать курс национальной валюты с учётом собственных интересов. Важно подчеркнуть, что сегодня из-за нынешнего курса рубля не используется весь спектр российских денег (копейка, гривенник, полтинник). Самый дешёвый товар – коробок спичек – сегодня стоит 1,5 рубля, в 1980-х гг. и раньше он стоил 1 коп. А ведь кроме копейки есть ещё гривенник и полтинник. Иными словами, существует реальная возможность перехода на курс 0,75 руб. за 1 \$ и использование всего спектра российских денег.

После того как определены национальные ресурсы, суммарное количество которых позволило покрыть (обеспечить) выбранный для эталонирования рублёвый объём, можно выполнить эталонирование – установить количество ресурсов, которые будут определять ценность денежной единицы России – рубля. Для этого поделим количество конкретного вида обеспечивающего ресурса (см. столбец 2 табл. 4) на сумму в рублях, соответствующую данному виду ресурса (см. столбцы 6–8 табл. 4). Полученное соотношение покажет количество конкретного ресурса, обеспечивающего в совокупности

с другими ресурсами эталонирование рубля. Такой подход позволяет рассчитать ресурсное обеспечение любого реального курса рубля и выбрать наиболее удобный для государства.

В качестве примера рассчитаем ресурсное обеспечение рубля по курсу $0,75 \text{ Р} = 1 \$$. Получим шесть видов ресурсов: нефть сырая 4,4 кг, газ природный 6,4 м³, нефтепродукты 4,2 кг, уголь 15 кг, электроэнергия 28 кВт·ч, золото 20 мг. При нынешних ценах этих ресурсов в долларах США они обеспечивают эталонирование рубля по курсу $1 \text{ Р} = 1,3 \$$. Взятые для расчётов количество ресурсов обеспечивает эталонирование рубля, равного 2,5 трлн \$. Это значительно больше ВВП России на сегодняшний день.

Таким образом, *ресурсное эталонирование* национальной валюты, по сути, практически не отличается от эталонирования в режиме *золотого стандарта*. Разница только в том, что при ресурсном эталонировании используется несколько видов ресурсов, а при эталонировании в режиме *золотого стандарта* использовали только один вид ресурса – золото. Поэтому, по аналогии с *золотым стандартом*, рассматриваемое эталонирование национальных валют можно называть – *ресурсным стандартом*. Английское слово *standard* в метрологии соответствует русскому слову *эталон* (рис. 3).

В рассмотренном примере для эталонирования были использованы сырьевые (ископаемые) ресурсы. Однако не у всех стран есть достаточный выбор таких ресурсов. Некоторые страны торгуют на международном рынке только ископаемыми ресурсами. У некоторых стран имеется большой выбор продукции с высоким уровнем переработки: самолеты, автомобили, электронная техника и т. д. Принимая во внимание современные механизмы ценообразования продукции, которые в части затратных смет практически одинаковы, продукцию с высоким уровнем переработки также можно использовать для *ресурсного эталонирования*. При этом следует учитывать некоторые особенности. В частности, такая продукция имеет срок годности, поэтому со временем её ценность, которая должна учитываться в ресурсном обеспечении национальной валюты будет уменьшаться. Это нужно учитывать, например, введением соответствующего поправочного коэффициента. Механизм учёта поправок должен отражаться в документах, регламентирующих процесс *ресурсного эталонирования* и требует дополнительного исследования. Использование при эталонировании природных ресурсов и ресурсов с высоким уровнем промышленной переработки доступно для большинства стран – участниц международной торговли. Страны, которые не смогут обеспечить эталонирование национальных валют собственными ресурсами, могут, как и сейчас, строить финансовые системы по соглашению с другими дружественными странами.

Отметим ещё один аспект *ресурсного эталонирования* – применение нескольких видов обеспечивающих ресурсов. В этих условиях важную роль могут сыграть электронные деньги, принцип действия и оборот которых основаны на цифровых технологиях. Это позволит эффективно обеспечивать расчёты, в частности, на международном рынке. Для

этого необходимо разработать ряд нормативно-правовых и нормативно-методических документов, регламентирующих порядок функционирования государственной денежной системы (в том числе с использованием электронных денег) на основе *ресурсного стандарта*. Несмотря на то, что *ресурсное эталонирование* может успешно работать на основе классических денег, электронные деньги в будущем могут повысить эффективность функционирования такой денежной системы.

Заключение. Исследование метрологических аспектов денег показало значительное сходство в построении государственных систем измерений и государственных денежных систем. В обеих системах устанавливаются и применяются единицы измерений. В первом случае это единицы измерения физических величин (килограмм, метр, ампер, вольт, секунда и т. д.), во втором – единицы измерения национальных или коллективных денег (рубль, доллар, евро, юань и т. д.). Стабильность и доверие к этим системам обеспечивается государственным эталонированием единиц. В качестве эталонов, как правило, используется принятое по соглашению определённое количество конкретных материальных объектов. При эталонировании в режиме *золотой стандарт* для национальной валюты каждая страна использовала конкретную массу золота. Такой режим успешно применялся более 250 лет.

Во второй половине прошлого века в результате последовательных действий ряда стран во главе с США *золотой стандарт* перестал применяться. Доллар США постепенно стал единицей измерения национальных валют других стран. Однако доллар, являясь рыночным товаром, из-за нестабильности рыночной цены не может исполнять роль эталона ценности денег. В дополнение к этому доллар является национальной валютой США и регулируется национальными законами США с учётом интересов США. Поэтому такая долларовая международная финансовая система в принципе не может быть стабильной.

Полная монополия на выпуск доллара США – единицы измерения национальных валют других стран, в сочетании с гипертрофированным ощущением исключительности и неуёмным желанием осчастливить всех своими ценностями, привело к созданию супертоталитарной международной финансовой системы. Выход из создавшегося положения сегодня видится в возвращении к эталонированию национальных валют *материальными единицами измерения денег*, аналогично тому, как это было ранее в режиме *золотого стандарта*. Проведённый анализ показывает, что современные государственные накопления золота недостаточны для обеспечения эталонирования денег в объёмах, соответствующих нынешним объёмам ВВП. Поэтому для обеспечения эталонирования национальных валют предлагается использовать материальные ресурсы, которые производятся государством и востребованы на международном рынке. Один из возможных вариантов *ресурсного эталонирования* исследован в настоящей работе на примере российской национальной валюты – рубля. Проведённые расчёты показали, что сегодняшние объёмы

производства и запасы всего шести материальных ресурсов (нефти, газа, нефтепродуктов, угля, электроэнергии и золота) достаточны для обеспечения эталонирования рубля в объёме, превышающем нынешний ВВП России. При этом в России имеется возможность самостоятельно удерживать курс рубля.

Показано, что для *ресурсного эталонирования* можно использовать не только ресурсы с низким уровнем переработки, но и ресурсы с высоким уровнем переработки (автомобили, самолёты, средства радиоэлектроники и т. д.). При этом предстоит выработать взаимоприемлемый механизм учёта их вклада в общий объём ресурсов, обеспечивающих эталонирование.

Также следует отметить важность роли, которую могут сыграть электронные деньги при организации государственной денежной системы, использующей *ресурсное эталонирование* национальной валюты. Исследование метрологических аспектов денег показало, что создание стабильной и предсказуемой международной финансовой системы, свободной от тоталитарного и монопольного давления, реализуемо установлением государствами собственных единиц измерения ценности денег, применяя ресурсное эталонирование национальной валюты, использующее собственные материальные ресурсы.

Список источников

1. Крутиков В. Н., Окрепилов В. В. Метрология денег // Измерительная техника. 2020. № 12. С. 42–49. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-12-42-50>
2. Русско-англо-французско-испанский словарь основных и общих терминов в метрологии / Пер. с англ. – фр. / Исаев Л. К., Мардин В. В. М.: Издательство стандартов, 1998.
3. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины: [перевод с английского и французского]. СПб.: НПО «Профессионал», 2009.
4. Маккей Д. Монеты. Большая энциклопедия. М.: Издательство «ЭКМО», 2009.
5. Паладьева А. Сколько всего денег в Море (Карта Денер) // NIE Journal Souzconsalt: сетевой журнал. 08.08.2021. URL: <https://niejournal.ru/countries-money/> (дата обращения: 30.12.2021).
6. Selection [сайт]. ВВП стран мира. Рейтинги. URL: <https://infoselection.ru/infokatalog/biznes-i-finansy/ekonomika-i-rynki/item/755-vvp-stran-mira> (дата обращения: 30.12.2021).
7. Воронцова Г. В., Карлов Д. И. Перспективы развития мировой финансовой системы в современных условиях // Фундаментальные исследования. 2020. № 5. С. 45–53. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42745> (дата обращения: 30.12.2021).
8. Что такое биткоины и как они работают // Investonomic: сетевой журнал. 21.04.2021. URL: <https://investonomic.ru/chto-takoe-bitkoin-bitcoin-prostyimi-slovami/> (дата обращения: 30.12.2021).
9. Серебряков Н. Электронные деньги // Хабр [сайт]. 09.12.2020. <https://habr.com/ru/post/532062/> (дата обращения: 30.12.2021).
10. Современный рынок золота / С. В. Бажанов и др.; под ред. В. И. Букато, М. Х. Лапидуса. М.: Финансы и статистика, 2004 (ОАО Тип. Новости). 319 с.

11. Россия: Статистика внешней торговли. По данным ФТС России. Итоги внешней торговли России. Аналитика за 2020 год. 12.02.2021. URL: <https://ru-stat.com/analytics/7839> (дата обращения: 30.12.2021).

12. Полезные ископаемые в России и их добыча. URL: <https://rosinfostat.ru/poleznye-iskopaemye/> (дата обращения: 30.12.2021).

13. Природно-ресурсный потенциал России – основные виды природных богатств // Nauka.Club: образовательный портал. 04.04.2019. URL: <https://nauka.club/geografiya/prirodno-resursnyy-potentsial-rossii.html> (дата обращения: 30.12.2021).

References

1. Krutikov V. N., Okrepilov V. V., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 63, no. 12, pp. 993–1003.

<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01883-8>

2. Russian-English-French-Spanish dictionary of basic and General terms in Metrology, Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1998. (In Russ.)

3. International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM), Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 2), 2008.

4. Coins. Illustrated Encyclopedia.

5. Palad'eva A., Skol'ko vsego deneg v Mire (Karta Deneg), *NIE Journal Souzconsalt*: online journal, 08.08.2021, available at: <https://niejournal.ru/countries-money/> (accessed: 30.12.2021).

6. Selection [website], *VVP stran mira. Reitingi*, available at: <https://infoselection.ru/infokatalog/biznes-i-finansy/ekonomika-i-rynki/item/755-vvp-stran-mira> (accessed: 30.12.2021). (In Russ.)

7. Vorontsova G. V., Karlov D. I., *Perspektivy razvitiya mirovoi finansovoi sistemy v sovremennykh usloviyakh, Fundamental Research*, 2020, no. 5, pp. 45–53, available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42745> (accessed: 30.12.2021). (In Russ.)

8. Chto takoe bitkoiny i kak oni rabotayut, *Investonomic*: online journal, 21.04.2021, available at: <https://investonomic.ru/chto-takoe-bitkoin-bitcoin-prostymi-slovami/> (accessed: 30.12.2021). (In Russ.)

9. Serebryakov N., Ehlektronnye den'gi, *Khabr* [website], 09.12.2020. <https://habr.com/ru/post/532062/> (accessed: 30.12.2021). (In Russ.)

10. Sovremenniy rynek zolota, S. V. Bazhanov et al.; Ed. V. I. Bukato, M. Kh. Lapidusa, Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004 (OAO Tip. Novosti). 319 p. (In Russ.)

11. Rossiya: Statistika vneshnei torgovli, *Po dannym FTS Rossii. Itogi vneshnei torgovli Rossii. Analitika za 2020 god*, 12.02.2021. available at: <https://ru-stat.com/analytics/7839> (accessed: 30.12.2021). (In Russ.)

12. *Poleznye iskopaemye v Rossii i ikh dobycha*, available at: <https://rosinfostat.ru/poleznye-iskopaemye/> (accessed: 30.12.2021). (In Russ.)

13. Prirodno-resursnyi potentsial Rossii – osnovnye vidy prirodnikh bogatstv, *Nauka.Club*: obrazovatel'nyi portal, 04.04.2019. available at: <https://nauka.club/geografiya/prirodno-resursnyy-potentsial-rossii.html> (accessed: 30.12.2021).). (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 20.12.2021; одобрена после рецензирования 10.01.2022; принята к публикации 12.01.2022.
The article was submitted 20.12.2021; approved after reviewing 10.01.2022; accepted for publication 12.01.2022.

Температурная шкала в диапазоне 692,67–1234,93 К: построение по инфракрасному излучению

Леонид Андреевич Назаренко¹, Павел Иванович Неежмаков², Роман Вячеславович Пушин³,
Светлана Викторовна Филь⁴✉

^{1, 2, 3, 4} Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков, Украина

²pavel.neyezhnikov@gmail.com, ³roman.pushchin@metrology.kharkov.ua, ⁴nc1.metrology@gmail.com✉

Аннотация. Рассмотрена методология построения температурной шкалы в диапазоне 692,67–1234,93 К путём воспроизведения единицы температуры излучателями на основе реперных точек чистых металлов цинка, алюминия, серебра и передачи единицы температуры излучателю сменных температур с помощью пирометра-компаратора. Излучатели являются абсолютно чёрными телами. Интерполяция показаний применяемого пирометра-компаратора осуществляется на основе закона Планка. Проанализированы источники неопределённости и представлен бюджет неопределённостей воспроизведения и передачи единицы температуры – кельвина – радиационным методом. Неопределённость измерения температуры излучателя в виде абсолютно чёрного тела, связанная с применением пирометра-компаратора, составила $(1,99–2,94) \cdot 10^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет использовать данный пирометр для построения термодинамической температурной шкалы.

Ключевые слова: температурная шкала, реперная точка, излучатель – абсолютно чёрное тело, пирометр-компаратор, бюджет неопределённостей

Для цитирования: Назаренко Л. А., Неежмаков П. И., Пушин Р. В., Филь С. В. Температурная шкала в диапазоне 692,67–1234,93 К: построение по инфракрасному излучению // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 61–65. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-61-65>

Temperature scale in the range from 692.67 K to 1234.93 K: construction by infrared radiation

Leonid A. Nazarenko¹, Pavlo I. Nyezmaikov², Roman V. Pushchin³, Svitlana V. Fil⁴✉

^{1, 2, 3, 4} National scientific center “Institute of metrology”, Kharkov, Ukraine

²pavel.neyezhnikov@gmail.com, ³roman.pushchin@metrology.kharkov.ua, ⁴nc1.metrology@gmail.com✉

Abstract. The methodology of constructing of temperature scale in the range 692,67–1234,93 K was described. It's based in the way of the reproduction of a temperature unit by absolutely black body emitters based on the reference points of pure metals of zinc, aluminum, silver and further transferring of the unit of the temperature to a variable temperatures absolutely black body emitter of using a pyrometer-comparator. Both of emitters are absolutely black bodies. Interpolation of values of using pyrometer-comparator performs by Plank law. Sources of uncertainties were analyzed and budget of uncertainties of reproduction of the unit of temperature kelvin by the radiation method was given. Measurement uncertainty of the emitter's (absolutely black body) temperature connected with pyrometer-comparator using is $(1.99–2.94) \cdot 10^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}$, and it allows to use this pyrometer for thermodynamic temperature scale constructing.

Keywords: temperature scale, reference point, blackbody emitter, pyrometer-comparator, uncertainty budget

Введение. Радиационная термометрия (пирометрия) в последнее время достигла значительного прогресса. Это касается как расширения температурного диапазона из области высоких температур в область средних и низких температур, так и повышения точности измерений. При этом бурно развивается радиационная термометрия в инфракрасной области спектра (инфракрасная термометрия), применяемая в тепловидении, при дистанционном управлении, контроле промышленных процессов и защите окружающей среды. Быстро увеличивается количество приборов радиационной инфракрасной термометрии, которые измеряют температуру в диапазоне $-50...+600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ с неопределённостью 0,6 %.

Современные пирометры позволяют измерять и в диапазоне температур 600–3000 °С с неопределённостью около $\pm 0,4 \text{ } \%$. Кроме того, используемые на производстве пирометры с цифровым выходом можно применять в системах дистанционного управления при контроле технологических процессов. Таким образом, требуется новая метрологическая инфраструктура (методы и средства измерений), которая могла бы обеспечить необходимые точность и достоверность радиационных температурных измерений [1, 2], т. е. необходимо построение радиационной температурной шкалы.

Цель настоящей работы – исследование температурной шкалы, построенной радиационным методом.

Построение температурной шкалы с помощью радиационной термометрии. Международная температурная шкала МТШ-90 определяет температуру между тройной точкой равновесного водорода ($-259,3467\text{ }^{\circ}\text{C}$) и точкой кристаллизации серебра ($961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$) с помощью эталонного платинового термопреобразователя сопротивления (ЭПТС) [3]. ЭПТС калибруется в реперных точках и использует точно определённые интерполяционные процедуры. Таким образом, прямая реализация МТШ-90 в этом температурном диапазоне должна быть основана на откалиброванных ЭПТС.

Для радиационной термометрии ЭПТС является чувствительным элементом, который измеряет температуру абсолютно чёрного тела (АЧТ). При этом излучатели типа АЧТ являются эталонными источниками при калибровке радиационных термометров. Для метрологического обеспечения в области радиационной термометрии используется схема, основанная на АЧТ-излучателях с ЭПТС. Однако согласно данным работы [4] такой подход не может обеспечить повышенные требования к точности радиационных измерений.

Традиционно радиационная температурная шкала строилась на длине волны $0,65\text{ мкм}$. Но в последнее десятилетие на мировом рынке востребована калибровка пирометров разных типов с рабочим диапазоном длин волн $1\text{--}14\text{ мкм}$. Температурная лампа, обычно применяемая при калибровке оптических пирометров на классической длине волны $0,65\text{ мкм}$, непригодна для калибровки инфракрасных пирометров, и вместо неё необходимо использовать АЧТ. Яркостная радиационная температура $T_{\text{я}}$, измеряемая пирометром с эффективной

длиной волны $\lambda_{\text{эфф}}$ при визировании полости излучателя АЧТ в приближении Вина определяется из соотношения

$$\frac{1}{T_{\text{я}}} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda_{\text{эфф}}}{c_2} \ln \varepsilon,$$

где T , ε – температура и эффективная излучательная способность АЧТ соответственно; c_2 – вторая радиационная постоянная.

Показания двух пирометров с разными эффективными длинами волн будут различными. Согласно расчётам, разница показаний ΔT (яркостных температур) двух пирометров с разными эффективными длинами волн $\lambda_{\text{эфф}1}=0,65\text{ мкм}$, $\lambda_{\text{эфф}2}=10\text{ мкм}$ при $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ может достигать $10; 4; 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $\varepsilon=0,990; 0,995; 0,999$ соответственно.

Поэтому в последние годы, специалисты всех ведущих метрологических лабораторий развивают мультиреперный метод радиационной термометрии [5]. Суть метода состоит в построении радиационной температурной шкалы подобной контактной температурной шкале, а именно используются излучатели типа АЧТ на реперных точках МТШ-90. Промежуточные температуры между реперными точками определяются интерполяционными методами с помощью пирометра-компаратора. При этом погрешности построения шкалы можно существенно уменьшить, если в качестве референтного эталона вместо иммерсионного термометра использовать радиационный термометр [4]. Это означает, что референтный радиационный термометр калибруется абсолютным образом без сличения его с иммерсионным термометром.

Такой подход (с акцентом на первичную термометрию) безусловно соответствует современным тенденциям, связанным с переопределением единицы температуры кельвина. В рамках предложенного подхода значения температуры реперных точек определяются методами радиационной термометрии – радиометрии, а интерполяция осуществляется на основе закона Планка.

Построение МТШ-90 основано на использовании в качестве эталона АЧТ-излучателя на реперной точке серебра (или золота, или меди). Дальнейшее построение шкалы в область высоких температур выполняется экстраполяцией с помощью высоколинейного радиационного пирометра.

В работе [6] предложен альтернативный метод реализации МТШ-90 – калибровка пирометров в нескольких реперных точках, реализованных в виде АЧТ (мультиреперное приближение). Полуэмпирическое выражение, описывающее выходной сигнал радиационного термометра – интерполяцию $S(T)$ между реперными точками и называемое уравнением Сакума-Хаттори, имеет вид (планковская форма):

$$S(T) = C \{ \exp[C_2/(AT+B)] - 1 \}^{-1}, \quad (1)$$

где A , B , C – параметры, которые подбираются методом наименьших квадратов по результатам градуировки в реперных точках (получаемые численными методами с помощью программы DataFit).

В [7] исследован альтернативный метод реализации МТШ-90 с использованием уравнения Сакума-Хаттори в температурном

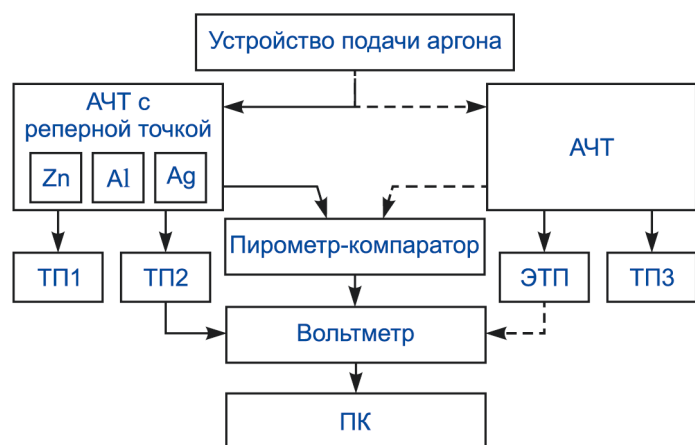


Рис. 1. Функциональная схема эталона:

АЧТ – абсолютно чёрное тело; ТП1, ТП3 – термоэлектрические преобразователи для регулирования нагрева АЧТ с реперными точками и АЧТ переменных температур соответственно; ТП2 – термоэлектрический преобразователь для измерения температуры АЧТ; ЭТП – эталонный термоэлектрический преобразователь для измерения температуры АЧТ; ПК – персональный компьютер

Fig. 1. Functional diagram of the standard:

ABB – absolutely black body; TC1, TC3 – thermocouples to control the heating of ABB with reference points and a blackbody of variable temperatures, respectively; TC2 – thermocouple for measuring ABB temperature; RTC – reference thermocouple for measuring ABB temperature; PC – personal computer

диапазоне 420–1085 °С и сделан вывод о возможности воспроизведения МТШ-90 в этом диапазоне с погрешностью $\pm 0,05$ °С.

Таким образом, построение температурной шкалы методом радиационной термометрии ниже точки кристаллизации серебра происходит аналогично построению платиновой шкалы: модель АЧТ на реперных точках и интерполяция с помощью радиационного термометра между реперными точками, вместо платинового термометра в контактной термометрии.

Государственный первичный эталон единицы температуры по инфракрасному излучению в диапазоне от 692,67 до 1234,93 К. В ННЦ «Институт метрологии» создан Государственный первичный эталон единицы температуры по инфракрасному излучению в диапазоне от 692,67 до 1234,93 К (далее – эталон), который воспроизводит единицу температуры АЧТ-излучателями на реперных точках чистых металлов цинка, алюминия и серебра и передаёт единицу температуры АЧТ-излучателю переменных температур с помощью пирометра-компаратора.

Функциональная схема эталона приведена на рис. 1. Эталон содержит следующие устройства: АЧТ-излучатель на реперных точках цинка, алюминия и серебра; АЧТ-излучатель переменных температур; пирометр-компаратор; система измерения и компьютерной обработки сигналов; вспомогательное оборудование. АЧТ-излучатель переменных температур расширяет возможности передачи единицы радиационных температур. Эксплуатация АЧТ-излучателя на реперных точках должна быть рациональной, поэтому единица температуры хранится АЧТ-излучателем переменных температур. При этом АЧТ-излучатели переменных температур калибруют с помощью пирометра-компаратора, а пирометры – с использованием АЧТ-излучателя переменных температур. Фактически единица температуры хранится как АЧТ-излучателем переменных температур, так и пирометром-компаратором, что позволяет взаимно проверять их долгосрочную стабильность. Кроме того, существует возможность сличения интерполяционных соотношений: с одной стороны, в соответствии с формулой Сакума-Хаттори (1), с другой – по характеристике иммерсионного термопреобразователя.

Общий вид эталона, где показаны пирометр-компаратор 1, нановольтметр 2, АЧТ-излучатель переменных температур 3 и АЧТ-излучатель на реперных точках 4, приведён на рис. 2.

Работа пирометра-компаратора. Пирометр-компаратор предназначен для передачи температурной шкалы от АЧТ-излучателя на реперных точках цинка, алюминия, серебра к АЧТ-излучателю переменных температур. Пирометр-компаратор на основе инфракрасного InAsGa-датчика работает в инфракрасном диапазоне, имеет зеркальную оптику, которая лишена недостатков линзовой оптики [8]. Пирометр-компаратор может принимать сигнал в реперных точках от цинка



Рис. 2. Общий вид эталона:
1 – пирометр-компаратор; 2 – нановольтметр; 3 – АЧТ-излучатель переменных температур; 4 – АЧТ-излучатель на реперных точках

Fig. 2. General view of the standard:
1 – pyrometer-comparator; 2 – nanovoltmeter; 3 – unit of the temperature to a variable temperatures absolutely black body emitter; 4 – unit by absolutely black body emitters based on the reference points of pure metals

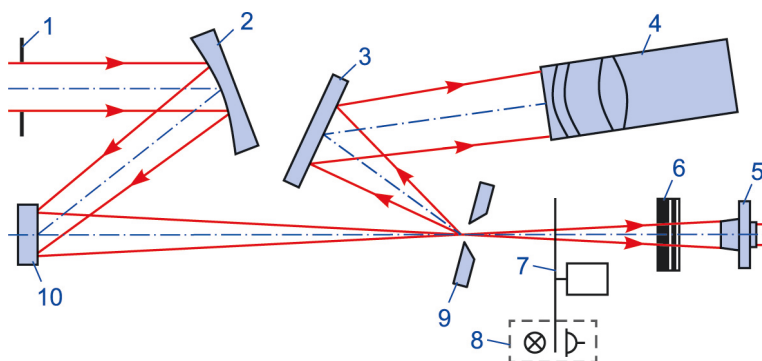


Рис. 3. Оптическая схема пирометра-компаратора:
1 – входное окно; 2 – сферическое зеркало; 3, 10 – плоские зеркала; 4 – визирующая труба; 5 – инфракрасный датчик; 6 – интерференционный фильтр; 7 – obturatorный диск; 8 – оптопара (лампа накаливания – инфракрасный датчик); 9 – плоское зеркало с отверстием

Fig. 3. Optical scheme of the pyrometer-comparator:
1 – entrance window; 2 – spherical mirror; 3, 10 – flat mirrors; 4 – sighting tube; 5 – IR-sensor; 6 – interference filter; 7 – obturator disc; 8 – optocoupler (incandescent lamp – IR-sensor); 9 – flat mirror with hole

к серебру. Оптическая схема приведена на рис. 3. Инфракрасное излучение, проходя сквозь входное окно 1 и систему зеркал 2, 3, 10, попадает на плоское зеркало с отверстием 9, вырезающее световой пучок. Пучок проходит через модулятор, состоящий из obturatorного диска 7 и оптопары 8, и попадает в инфракрасный датчик 5.

Неопределённость показаний инфракрасного пирометра связана с нестабильностью его нулевого сигнала, обусловленной двуполярным питанием синхронного усилителя приёмной головки пирометра. Дрейф нулевого сигнала исследовали в течение 30 мин после выхода пирометра на рабочий режим и получили его значение $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ В.

Термостабилизация приёмной головки пирометра является важным моментом в работе пирометра как эталонного средства. Режим термостабилизации приёмной головки тестировали при расположении терморезистора в трёх фиксированных точках: в начале (около инфракрасного датчика),

Таблица 1

Неопределённость u_B , °C, эталона

Источник неопределённости	Zn	Al	Ag
Примеси в металле	$1,73 \cdot 10^{-3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$4,62 \cdot 10^{-3}$
Расчёт излучательной способности полости АЧТ-излучателя на фазовых переходах	$2 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$
Теплообмен между полостью излучателя и окружающей средой	$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$
Идентификация плато	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$
Влияние размера источника для пирометра-компаратора	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
Нестабильность нулевого сигнала пирометра-компаратора	$6,88 \cdot 10^{-3}$	$5,91 \cdot 10^{-5}$	$2,41 \cdot 10^{-6}$
Разрешающая способность калибруемого пирометра	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Изменение эффективной длины волны	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$4,04 \cdot 10^{-3}$	$4,62 \cdot 10^{-3}$
Компарирование яркостей выходных отверстий АЧТ-излучателя и АЧТ-держателя	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$3,46 \cdot 10^{-2}$	$6,12 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2

Составляющие неопределённости, °C, измерений температуры реперных точек цинка, алюминия и серебра

Составляющая неопределённости	Zn	Al	Ag
Стандартная неопределённость по типу A u_A	$9,69 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$
Стандартная неопределённость по типу B u_B	$2,33 \cdot 10^{-2}$	$3,68 \cdot 10^{-2}$	$6,28 \cdot 10^{-2}$
Суммарная стандартная неопределённость u_C	$9,97 \cdot 10^{-2}$	$1,22 \cdot 10^{-1}$	$1,47 \cdot 10^{-1}$
Расширенная неопределённость U	$1,99 \cdot 10^{-1}$	$2,43 \cdot 10^{-1}$	$2,94 \cdot 10^{-1}$

центре и конце приёмной головки. Термостабилизация около датчика является наиболее важной, потому что временная нестабильность инфракрасного датчика (в результате изменения температуры) значительно влияет на показания пирометра, а соответственно, и на точность его измерений. Влиянием термостабилизации в центре и конце приёмной головки на точность показаний пирометра можно пренебречь вследствие малости. Время термостабилизации (около 2 ч) приёмной головки называется временем выхода пирометра на рабочий режим. Чувствительность пирометра-компаратора составляет $3,39 \cdot 10^{-2}$ В/°C.

АЧТ-излучатель на фазовых переходах чистых металлов. Излучатель представляет собой горизонтальную электрическую печь сопротивления с графитовыми моделями АЧТ на фазовых переходах (реперных точках) цинка, алюминия, серебра. Графитовые цилиндрические модели АЧТ, в тиглях которых находятся высокочистые металлы, поочередно нагреваются в устройстве нагрева до температур фазовых переходов. Эталонный пирометр-компаратор фиксирует температуру полости АЧТ-тигла с высокочистым металлом, находящимся в состоянии фазового перехода (кристаллизации). Режим работы моделей АЧТ (нагрев, кристаллизация реперной точки) поддерживается с помощью системы регулирования температуры, в состав которой входят

регуляторы температуры и три термоэлектрических преобразователя.

АЧТ-излучатель – держатель температурной шкалы (переменных температур). Излучатель предназначен для хранения температурной шкалы температур по инфракрасному излучению в диапазоне температур 400–1000 °C и передачи единицы кельвина рабочим эталонам температур по ИК-излучению методом прямых измерений. Излучатель АЧТ переменных температур представляет собой горизонтальную электрическую печь сопротивления с графитовой моделью абсолютно черного тела. Температуру измеряют с помощью эталонного платино-родий-платинового термоэлектрического преобразователя ТП 10(S) во время выхода и стабилизации температуры модели АЧТ в запрограммированной температурной точке.

В табл. 1 представлен бюджет неопределённости эталона при воспроизведении единицы температуры АЧТ-излучателями на реперных точках чистых металлов цинка, алюминия, серебра, а в табл. 2 – составляющие неопределённости измерений температуры указанных реперных точек.

Заключение. АЧТ-излучатель на реперных точках в составе эталона предоставляет уникальные возможности для проведения фундаментальных исследований в термометрии [9, 10]. ННЦ «Институт метрологии» имеет большой опыт в создании наиболее точных абсолютных криогенных радиометров. Сочетание АЧТ-излучателя на реперных точках вместе с указанным радиометром позволяет уточнять значения температуры фазовых переходов чистых металлов, а также значения постоянной Стефана-Больцмана.

В настоящее время основным интерполяционным прибором является платиновый термопреобразователь сопротивления, уравнение состояния которого невозможно записать в явном виде без привлечения неизвестных, зависящих от температур постоянных, поэтому исследования интерполяционных соотношений с помощью пирометра-компаратора имеют важное значение для усовершенствования международной температурной шкалы. Такие интерполяционные соотношения основаны на фундаментальном законе Планка, а шкала, построенная на таких соотношениях, является термодинамической температурной шкалой.

Список источников

1. Fellmuth B., Fischer J., Machin G., Picard S., Steur P. P. M., Tamura O., White D. R., Yoon H., *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2016, vol. 374 (2064), 20150037. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0037>
2. Sohn R. S. T. M., *Journal of Physics Conference Series*, 2021, vol. 1826 (1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1826/1/012031>

3. Guide to the Realization of the ITS-90, Bureau International des Poids et Mesures, Consultative Committee for Thermometry, 2021, pp. 5–7.

4. Buttuello M., Ricolfi T., *Measurement*, 1987, vol. 5, pp. 189–191. [https://doi.org/10.1016/0263-2241\(87\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0263-2241(87)90041-8)

5. McEvoy H., Report on the measurement results for the EURAMET 658 extension: project to examine underlying parameters in radiance temperature scale realisation (CCT WG-KC version for publication on BIPM database), *NPL Report Eng.*, 2018, vol. 67, pp. 5–8.

6. Sakuma F., Hattory S., Establishing a practical temperature standard by using a narrow-band radiation thermometer with a silicon detector, *Temperature: Its Measurement and Control in Sci. and Ind.: Proc. of Int. Symp.*, New York, American Institute of Physics, 1982, vol. 5, pp. 421–427.

7. Sounders P., *Metrologia*, 2003, vol. 34 (3), pp. 201–210. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/34/3/1>

8. Matthew James Hobbs and Jon R Willmott., *Measurement Science and Technology*, 2020, vol. 31, no. 1, 014005. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/AB41C6>

9. Yoon H. W., Woodward J. T., McEvoy H., Machin G., *Journal of Physics Conference Series*, 2018, vol. 1065 (12), 122023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/12/122023>

10. Taubert D. R., Hartmann J., Hollandt J., Fischer J., *AIP Conference Proceedings*, 2003, vol. 684, pp. 7–12. <https://doi.org/10.1063/1.1627092>

References

1. Fellmuth B., Fischer J., Machin G., Picard S., Steur P. P. M., Tamura O., White D. R., Yoon H., *Philosophical Transactions of The Royal*

Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2016, vol. 374 (2064), 20150037. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0037>

2. Sohn R. S. T. M., *Journal of Physics Conference Series*, 2021, vol. 1826 (1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1826/1/012031>

3. Guide to the Realization of the ITS-90, Bureau International des Poids et Mesures, Consultative Committee for Thermometry, 2021, pp. 5–7.

4. Buttuello M., Ricolfi T., *Measurement*, 1987, vol. 5, pp. 189–191. [https://doi.org/10.1016/0263-2241\(87\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0263-2241(87)90041-8)

5. McEvoy H., Report on the measurement results for the EURAMET 658 extension: project to examine underlying parameters in radiance temperature scale realisation (CCT WG-KC version for publication on BIPM database), *NPL Report Eng.*, 2018, vol. 67, pp. 5–8.

6. Sakuma F., Hattory S., Establishing a practical temperature standard by using a narrow-band radiation thermometer with a silicon detector, *Temperature: Its Measurement and Control in Sci. and Ind.: Proc. of Int. Symp.*, New York, American Institute of Physics, 1982, vol. 5, pp. 421–427.

7. Sounders P., *Metrologia*, 2003, vol. 34 (3), pp. 201–210. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/34/3/1>

8. Matthew James Hobbs and Jon R Willmott., *Measurement Science and Technology*, 2020, vol. 31, no. 1, 014005. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/AB41C6>

9. Yoon H. W., Woodward J. T., McEvoy H., Machin G., *Journal of Physics Conference Series*, 2018, vol. 1065 (12), 122023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/12/122023>

10. Taubert D. R., Hartmann J., Hollandt J., Fischer J., *AIP Conference Proceedings*, 2003, vol. 684, pp. 7–12. <https://doi.org/10.1063/1.1627092>

Статья поступила в редакцию 15.12.2021; одобрена после рецензирования 20.12.2021; принята к публикации 21.12.2021.
The article was submitted 15.12.2021; approved after reviewing 20.12.2021; accepted for publication 21.12.2021.

Система управления беспилотными транспортными электрокарами на основе радиоволновых доплеровских датчиков

Дмитрий Владиленович Хаблов

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия, dkhablov@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-4807-1281>

Аннотация. Исследовано управление беспилотными электрокарами в помещениях. Рассмотрена проблема обеспечения точного соответствия управляющих сигналов реальному перемещению транспортных средств в пространстве. В ходе анализа динамической модели электрокара обнаружено, что основные причины возникновения ошибок заключаются в косвенном характере измерения скорости этого транспортного средства с помощью одометров. Для решения указанной проблемы предложено использовать радиоволновые доплеровские датчики линейной скорости колёс, показания которых не зависят от скольжения, массы электрокара, давления в шинах и других параметров. Выведены формулы, позволяющие по доплеровским частотам датчиков определять текущую скорость и рулевой угол управления электрокаром с использованием условия Аккермана. На основе указанных формул разработана устойчивая система управления движением беспилотных транспортных электрокаров по заданному маршруту. Предложенную систему можно использовать в роботизированных транспортных комплексах.

Ключевые слова: эффект Доплера, электрокар, курсовой угол, рулевой угол, путевая скорость, условие Аккермана, автономная навигация, сверхвысокочастотные радиоволны

Для цитирования: Хаблов Д. В. Система управления беспилотными транспортными электрокарами на основе радиоволновых доплеровских датчиков // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 66–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-66-72>

Control system for unmanned transport electric vehicles based on microwave Doppler sensors

Dmitry V. Khablov

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, dkhablov@mail.ru,
<http://orcid.org/0000-0003-4807-1281>

Abstract. The control of unmanned electric cars in the premises has been studied. The problem of ensuring the exact correspondence of control signals to the real movement of vehicles in space is considered. Based on the analysis of the dynamic model of an electric car, it was found that the main causes of errors are the indirect nature of measuring the speed of this vehicle using odometers. To solve this problem, it was proposed to use microwave Doppler sensors of the linear speed of the wheels, the readings of which no longer depend on the slip, mass of the electric car, tire pressure, and other parameters. Formulas have been derived that allow the Doppler frequencies of the sensors to determine the current speed and steering angle of control of an electric car using the Ackermann condition. Based on them, a stable traffic control system along a given route has been developed, which can be used in robotic transport systems.

Keywords: Doppler Effect, electric vehicle, heading angle, steering angle, ground speed, Ackermann condition, autonomous navigation, microwave

Введение. В настоящее время актуальна автоматизация технологических процессов хранения и своевременной доставки деталей и материалов для окончательной сборки изделий на производстве. Указанная автоматизация связана с возрастающей глобализацией и усложнением технологий, ростом числа комплектующих от разнородных поставщиков, что существенно усложняет внутреннюю логистику производства. Требуются большие объёмы внутренних перемещений материалов и деталей различной массы и размера. Для достижения непрерывности производства необходимо накапливать на месте производства значительные запасы материалов. Чтобы в указанных

условиях стоимость конечного продукта оставалась конкурентной, надо снижать общие издержки производства, в том числе связанные с внутренними транспортировками. Например, по заданному маршруту внутри оцифрованной локальной области могут перемещаться недорогие беспилотные транспортные платформы, управляемые дистанционно из единого центра. Необходимо учитывать возможности маневрирования малогабаритных колёсных транспортных средств (ТС) в условиях помещений складов и цехов, а также переходов между ними.

Главная проблема разработки беспилотных ТС – невозможность использования глобальной спутниковой навигации из-за

сильного ослабления и искажения радиоволновых сигналов при прохождении через стены помещений и многолучевых отражений вблизи стен и в узких проходах. Кроме того, применение различных систем локальной навигации ограничивается лимитом затрат на инфраструктуру. При этом всё равно не достигается приемлемая точность (5–10 см) перемещения беспилотного транспорта в производственных и складских помещениях. По аналогичным причинам для наземного транспорта в помещениях невозможно использовать автономную инерциальную навигационную систему. Указанная система в принципе не может обеспечить высокую точность без привлечения данных для коррекции от дополнительных систем навигации. Показания инерциальной навигационной системы зависят от изменения кинематической модели транспорта (веса, центра тяжести, сопротивления поверхности и т. д.).

Для управления беспилотными ТС возможно использование телевизионных мониторов с искусственным интеллектом, что требует дополнительных затрат. Однако процесс глубокого обучения необходимо часто корректировать, поскольку рулевое управление не может без искажений обеспечить передачу сигналов для надёжного беспилотного передвижения ТС. У распространённой системы четырёхрычажного механического управления Аккермана [1] есть существенный недостаток, заключающийся в сложности передаточных механических преобразований для одновременного удовлетворения нескольким критериям. В механическом дифференциале возникает расшатывание муфт, передач из-за износа, нарушение синхронизации колёс и их проскальзывание. На динамику ТС влияют изменения массы, давления в шинах, сопротивления поверхности и других параметров. В результате управляющие сигналы, обеспечивающие поворот ТС таким образом, чтобы все четыре колеса линейно перемещались вокруг единого центра, передают движения с искажениями. Возникающая ошибка не даёт возможности использовать рулевое управление напрямую для автономной навигации.

Применение беспилотного транспорта в помещениях облегчают плоские поверхности (для которых используется двумерная система координат), небольшая (до 1–2 м/с) и постоянная скорость ТС, отдельный привод колёс, увеличивающий точность маневрирования. Последнее условие позволяет применить в электрокарах сверхвысокочастотные (СВЧ) радиоволновые доплеровские датчики для увеличения точности выполнения команд управляющих сигналов. Указанные датчики способны получать информацию о реальном перемещении ТС независимо от параметров динамической модели, а в сочетании с управлением для отдельных электродвигателей колёс при отдельном приводе могут обеспечивать точное маневрирование.

Цель статьи – разработка системы управления на основе радиоволновых доплеровских датчиков для измерения реального перемещения беспилотного транспортного электрокара.

Динамическая модель ТС. Кинематическая схема колёсного ТС для плоской поверхности с центром перемещения на середине задней колёсной оси представлена на рис. 1. Динамическую модель ТС в двумерной системе координат

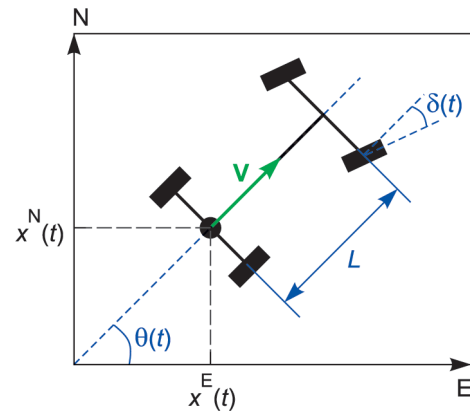


Рис. 1 Кинематическая схема колёсного ТС:
N, E – оси системы координат направлением на север и восток соответственно

Fig. 1. Kinematic model of a wheeled vehicle:
N, E – the axes of the coordinate system with the direction to the north and east

север-юг, в которой действуют силы, приводящие ТС в движение, и силы сопротивления, препятствующие этому, описывает следующее уравнение [2, 3]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x^E(t) \\ x^N(t) \\ V(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V(t)\cos\theta(t) \\ V(t)\sin\theta(t) \\ \frac{Pu_v(t)}{MV(t)} - \frac{ApCV(t)^2}{M} - \mu g - g\sin\beta \\ V(t)\text{tg}[u_\delta(t)]/L \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где состояние ТС характеризуют $x^N(t)$, $x^E(t)$ – текущие координаты в северном и восточном направлениях; $V(t)$ – линейная скорость; $\theta(t)$ – угол текущего расположения относительно ориентации на восток (курсовой угол); $\delta(t)$ – рулевой угол; параметры ТС, влияющие на динамику ТС: P – мощность двигателя ТС; A – площадь фронтального сечения; C – коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ – плотность воздуха; μ – коэффициент сопротивления качению; g – гравитационная постоянная; β – угол наклона поверхности (для плоской поверхности $\beta=0$); M – масса; L – длина ТС между передней и задней осью, называемая базой; входные параметры управления ТС: $-1 \leq u_v(t) \leq +1$ – сигнал управления движением (акселератор), устанавливающий скорость; $\pm u_\delta(t) = f[\delta(t)]$ – сигнал установки рулевого угла.

Из соотношения (1) следует, что линейная скорость $V(t)$ зависит не только от мощности двигателя и сигнала управления движением, но и от переменных параметров: массы ТС; фронтальной площади сечения A ; аэродинамического сопротивления C ; трения поверхности. Поскольку рассматривается случай плоской поверхности $\beta=0$, уклоном можно пренебречь. Изменение курсового угла $\theta(t)$ также зависит не только от сигнала $u_\delta(t)$ рулевого угла $\delta(t)$, но и от скорости $V(t)$, см. (1). В результате входные параметры управления не могут однозначно определять реальное перемещение. Для этого необходимо использовать прямое измерение, которое

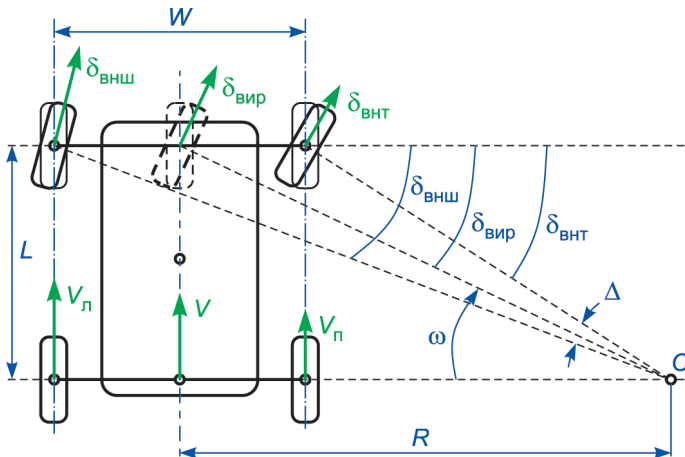


Рис. 2. Схема колёсного транспортного средства перемещающегося под действием условия Аккермана

Fig. 2. Scheme of a wheeled vehicle moving under the action of the Ackermann condition

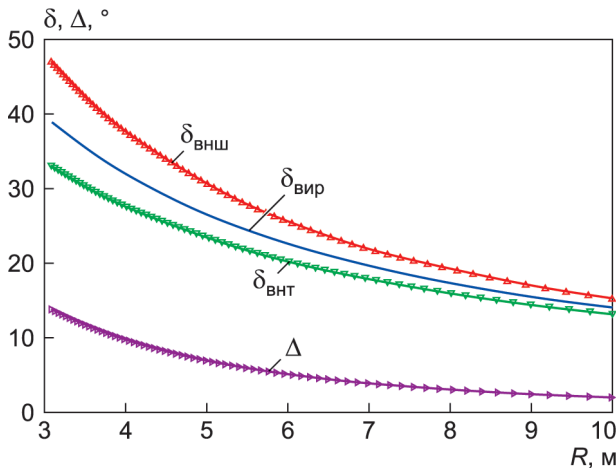


Рис. 3. Зависимости рулевых углов $\delta_{\text{внш}}$, $\delta_{\text{внт}}$, $\delta_{\text{вир}}$ и угла Δ от радиуса поворота R при $L=2,5$ м, $W=1,5$ м и соблюдении условия Аккермана

Fig. 3. Graphs of steering angles δ_o , δ_p , δ_{vir} and angle Δ from the turning radius R at $L=2,5$ m, $W=1,5$ m and the Ackermann condition is observed

возможно, например, на основе одометров или радиоволновых доплеровских датчиков.

Таким образом, задача системы управления беспилотным ТС состоит в генерации в нужные моменты управляющих команд (сигналов), обеспечивающих движение строго в линейном или круговом направлении без искажений. Тогда появляется возможность прямого отсчёта пройденного пути в двумерном пространстве, что можно использовать в качестве автономной навигации.

Условие Аккермана и определение рулевых углов. На рис. 2 приведена схема движения колёсного ТС, использующего привод с механическим дифференциалом, преобразующим поворот руля в углы поворота передних колёс, согласно условию Аккермана [3]. Указанная схема обеспечивает наиболее точное перемещение ТС, при котором все колёса

при повороте движутся по окружностям из единого центра O , имея разные скорости вращения. Таким образом максимально исключается эффект проскальзывания, сильно влияющий на точность перемещения. Если известны база ТС (колёсная база) L и мгновенные рулевые углы $\delta_{\text{внш}}$, $\delta_{\text{внт}}$ внешнего и внутреннего колёс, то расстояние между колёсами (кинематическая ширина или колея) W выражается как [3, 4]:

$$W = L \operatorname{ctg} \delta_{\text{внш}} - L \operatorname{ctg} \delta_{\text{внт}}.$$

Отсюда вытекает условие Аккермана

$$\operatorname{ctg} \delta_{\text{внш}} - \operatorname{ctg} \delta_{\text{внт}} = W/L. \quad (2)$$

Мгновенный виртуальный рулевой угол $\delta_{\text{вир}}$, соответствующий велосипедной (двухколёсной) схеме ТС определяется из формулы [4]:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{вир}} = L/R, \quad (3)$$

где R – радиус перемещения центра задней оси ТС.

Аналогично выводятся значения для тангенсов внешнего $\delta_{\text{внш}}$ и внутреннего $\delta_{\text{внт}}$ рулевого угла передних колёс ТС (см. рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\text{внш}} &= \arctg [L \operatorname{tg} \delta_{\text{вир}} / (L - 0,5W \operatorname{tg} \delta_{\text{вир}})]; \\ \delta_{\text{внт}} &= \arctg [L \operatorname{tg} \delta_{\text{вир}} / (L + 0,5W \operatorname{tg} \delta_{\text{вир}})]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Разность углов (4) – угол Аккермана

$$\Delta = \delta_{\text{внш}} - \delta_{\text{внт}}. \quad (5)$$

На рис. 3 приведены расчёты зависимостей рулевых углов $\delta_{\text{внш}}$, $\delta_{\text{внт}}$, $\delta_{\text{вир}}$ и Δ от радиуса поворота R для ТС с параметрами $L=2,5$ м, $W=1,5$ м.

Согласно графикам, при малых R изменения в рулевых углах значительные, в то время как с ростом радиуса поворота изменения уменьшаются. Это имеет большое значение для точного беспилотного управления грузовыми платформами, действующими в стеснённых помещениях цехов и складов.

Линейные скорости $V_{\text{л}}$, $V_{\text{п}}$ левого и правого задних колёс выражаем как функции угловой скорости ω поворота электрокара вокруг точки O и мгновенного радиуса R :

$$V_{\text{л}} = \omega(R + W/2); \quad (6)$$

$$V_{\text{п}} = \omega(R - W/2). \quad (7)$$

Делим уравнение (6) на уравнение (7) и получаем выражение $V_{\text{л}}/V_{\text{п}} = (R + W/2)/(R - W/2)$, из которого можно найти значение радиуса R :

$$R = WV/\Delta V,$$

где $V = (V_{\text{л}} + V_{\text{п}})/2$ – линейная скорость ТС, определяемая относительно точки на центре задней оси $\Delta V = V_{\text{л}} - V_{\text{п}}$.

Подставив полученное значение R в формулу (3), получим

$$L/\operatorname{tg}\delta_{\text{вир}}=WV/\Delta V.$$

В результате запишем выражение для рулевого угла

$$\delta_{\text{вир}}=\operatorname{arctg}\left[\frac{\Delta V}{V}\frac{L}{W}\right]. \quad (8)$$

Направление поворота ТС определим из условий

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\text{вир}} > 0 & - \text{поворот направо, } \delta_{\text{л}} = \delta_{\text{внш}}; \delta_{\text{п}} = \delta_{\text{внт}}; \\ \delta_{\text{вир}} = 0 & - \text{движение по прямой, } \delta_{\text{л}} = \delta_{\text{внш}} = \delta_{\text{п}} = \delta_{\text{внт}} = 0; \\ \delta_{\text{вир}} < 0 & - \text{поворот налево, } \delta_{\text{л}} = \delta_{\text{внт}}; \delta_{\text{п}} = \delta_{\text{внш}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Таким образом, мгновенные скорости (угловые или линейные) задних колёс ТС определяют рулевой угол $\delta_{\text{вир}}$ (8), а также через соотношения (4) рулевые углы $\delta_{\text{внш}}$ и $\delta_{\text{внт}}$ модели управления Аккермана. Поэтому точное измерение мгновенных линейных скоростей задних колёс позволяет потенциально построить систему управления с обратной связью беспилотного ТС с учётом условий (9). Дополнительно появляется возможность вычисления траектории движения ТС в удобном виде с оценкой текущего позиционирования для автономной навигации.

Мгновенная кривизна $k(t)$ траектории ТС полностью определяется выражением [5]:

$$k(t) = 1/R(t) = \operatorname{tg}\delta_{\text{вир}}(t)/L = d\theta(t)/dS, \quad (10)$$

где $R(t)$ – радиус кривизны (радиус поворота ТС); $\delta_{\text{вир}}(t)$ – виртуальный рулевой угол; S – длина пути; $\theta(t)$ – угол ТС.

Динамику изменений $\theta(t)$ вычисляем в зависимости от скорости ТС по формуле:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{ds} \frac{dS}{dt} = k(t)V(t) = \frac{\operatorname{tg}\delta_{\text{вир}}(t)}{L}V(t), \quad (11)$$

что соответствует уравнению динамической модели (1).

Таким образом, для полного расчёта траектории ТС и управления его перемещением на всём протяжении маршрута достаточно контролировать линейные или угловые скорости колёс на заднем дифференциале при условии использования на передней подвеске многорычажного механического дифференциала, удовлетворяющего условию Аккермана.

Применение электронного дифференциала для раздельного привода задних колёс электрокара. Собственно измерение скоростей колёс заднего привода необходимо для навигационных целей, чтобы контролировать правильность прохождения заданного маршрута. Если же требуется только увеличить устойчивость управления при поворотах на изогнутой дороге, при движении на скользком или вязком покрытии, то в случае раздельного привода задних колёс достаточно применить электронный дифференциал. Электронный дифференциал обладает преимуществами замены слабой, тяжёлой и неэффективной механической трансмиссии и механического дифференциала более эффективными и лёгкими

небольшими электродвигателями, непосредственно связанными с колёсами через одну передачу или двигателями на колесе. Электронный дифференциал работает следующим образом. Когда ТС подъезжает к началу поворота, водитель устанавливает рулевой угол $\delta_{\text{вир}}$, при этом скорость V устанавливается нажатием педали акселератора. Соответствующие сигналы $u_{\delta}(t)$, $u_V(t)$ поступают на электронный дифференциал, который немедленно воздействует на два колесных электрических двигателя, уменьшая скорость внутреннего колеса и увеличивая скорость внешнего колеса. В зависимости от знака $u_{\delta}(t)$ электрокар будет поворачивать направо, налево или двигаться прямо в соответствии с условиями (9) [6].

Для беспилотного транспорта кроме устойчивости и стабильности управления необходимо точное соответствие сигналов управления реальному перемещению. Только в этом случае ТС может успешно перемещаться в стеснённых условиях производственных помещений и складов в автономном режиме. Поэтому требуется реальное перманентное измерение параметров перемещения, в частности определение скоростей задних колёс. Если исключить из рассмотрения глобальную или локальную навигацию и возможности инерциальной навигационной системы, то эти скорости можно измерить одометрами либо доплеровскими датчиками.

Измерение скоростей колёс на заднем дифференциале ТС одометрами. Одометр – прибор для измерения числа оборотов колеса. С его помощью может быть измерен путь, пройденный наземным колёсным ТС. Если радиус колеса равен ρ , а ось колёса перемещается со скоростью V , то угловая скорость вращения колеса $\Omega_{\rho} = V/\rho$. При этом колесо должно быть непрерывно сцеплено с дорогой нижней точкой. Полный путь ТС $S = Vt$ выражается через число оборотов n и длину окружности колеса

$$S = n2\pi\rho. \quad (12)$$

Скорость ТС определяется как производная от пути (12) по времени

$$V = dS/dt = (dn/dt)2\pi\rho. \quad (13)$$

Погрешности одометра делятся на инструментальные и методические. Инструментальные погрешности являются следствием пробуксовки и скольжения, разной скорости вращения колёс, прогиба колеса под действием силы тяжести, погрешности формы и центровки колеса. В результате, например, появляется ошибка измерения, связанная с текущим весом ТС, поскольку шины прогибаются, изменяя радиус колеса на $\delta\rho_{\text{вес}}$: $\Delta S = S\delta\rho_{\text{вес}}/\rho$. Также следует учесть, что реально форма колеса может отличаться от окружности. Это вызывает погрешности двух видов: $\delta\rho_{\text{п}}$ – из-за неверного определения центра колеса и $\delta\rho_{\text{тек}}$ – отклонение текущего (в момент соприкосновения с дорогой) радиуса колеса от среднего. При постоянном курсе за время оборота колеса ошибка от $\delta\rho_{\text{тек}}$ усредняется и ею можно пренебречь [7], однако при изменениях курса она будет накапливаться.

Наиболее распространённой конструкцией одометра является колесо, угловая скорость вращения которого механически

синхронизирована с колесом ТС. При повороте такого измерительного колеса на целый оборот или $1/q$ оборота, где q – целочисленный параметр, происходит замыкание (размыкание) электрической цепи, что приводит к генерации импульсного сигнала на приёмном устройстве, включённом в эту цепь. Исходя из (12) измеряется путь, пройденный ТС за время T_i между двумя импульсами i и $i+1$: $S_T = 2\pi r/q$.

Выходным сигналом одометра является число импульсов, сгенерированных в течение определённого постоянного интервала времени – такта T . Отсюда возникает неизбежная методическая максимальная погрешность измерения пройденного пути, когда отсчёт может начаться и закончиться между последовательными тактовыми импульсами $\Delta S = \pm S_T$. Если предположить, что движение за время T в среднем равномерное, то погрешности измерения пути η будут распределены равномерно между двумя предельными случаями неполного такта: $-\eta$; $+\eta$. Математическое ожидание погрешности измерения пройденного пути в данном случае будет равно нулю. Среднеквадратическое отклонение составляет [7]:

$$\sigma_{\Delta S} = 2\pi r \left[\int_0^T (\eta_i/T_i)^2 d\eta \right]^{1/2} / q = \frac{2}{3} \pi r / q.$$

Естественным образом методическая и инструментальная погрешности искажают значения скоростей колёс (13) $V_{л'}$, $V_{п'}$ и, следовательно, значения рулевых углов $\delta_{внш'}$, $\delta_{л'}$, $\delta_{п'}$, что уменьшает точность определения траектории. Однако благодаря калибровке и некоторым приёмам коррекции одометры можно использовать для увеличения устойчивости

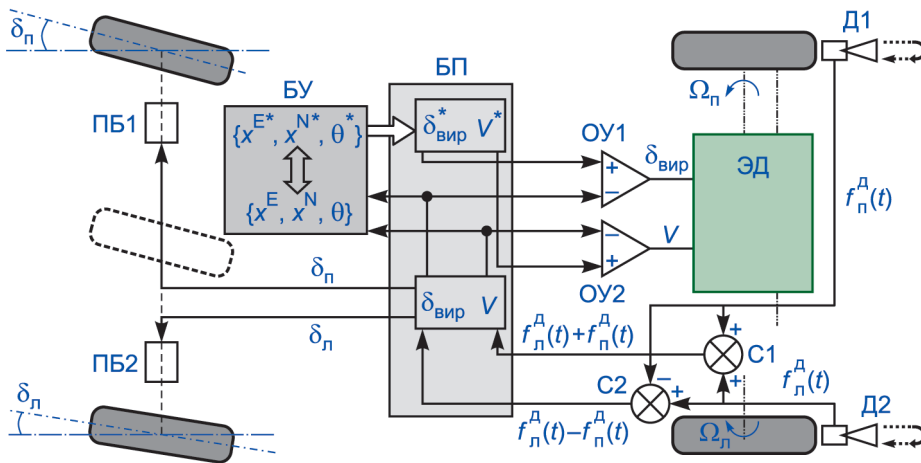


Рис. 4. Схема управления беспилотным электрокаром, скорость и рулевой угол которого измеряются с помощью СВЧ-датчиков:

Д1, Д2 – доплеровские СВЧ-датчики для правого и левого заднего колеса соответственно; ЭД – электронный дифференциал; С1, С2 – смесители доплеровских частот соответственно; БП – блок преобразователей; ОУ1, ОУ2 – операционные усилители соответственно; БУ – блок управления; ПБ1, ПБ2 – поворотные блоки соответственно

Fig. 4. Control scheme of an unmanned electric car with speed and steering angle measurement, using microwave sensors:

Д1, Д2 – microwave Doppler sensors for the right and left rear wheels; ЭД – electronic differential; С1, С2 – Doppler frequency mixers; БП – block of converters; ОУ1, ОУ2 are operational amplifiers; БУ – control unit; ПБ1, ПБ2 – rotary blocks

системы управления и в качестве дополнительных датчиков для автономной навигации [8].

Существует ещё один автономный метод измерения скорости с помощью визуального одометра [9], при котором измерение происходит за счёт обработки изображений от стереоскопических телекамер. Указанный метод характеризуется невысокой точностью и большими аппаратными затратами. Поэтому в настоящей статье предложен альтернативный метод измерения линейных скоростей колёс – использование радиоволновых доплеровских датчиков [10].

Использование радиоволнового СВЧ-датчика для измерения скоростей колёс на задней подвеске. Принцип работы СВЧ-датчика скорости наземного ТС основан на использовании эффекта Доплера для радиоволн. В отличие от одометрического измерения скорости этот метод является бесконтактным, что позволяет избежать многих инструментальных ошибок. В простейшем случае используется непрерывное излучение радиоволн СВЧ-диапазона. Приёмопередающая антенна (может использоваться схема с приёмной и передающей антенной) излучает вперед и под углом α к направлению движения ТС в вертикальной плоскости электромагнитные волны с частотой f_0 . Отражённые от поверхности дороги электромагнитные волны принимаются этой же антенной. Затем они смешиваются в смесителе с частью излучаемых волн, в результате чего выделяется доплеровский сигнал с частотой f^A . Эта частота пропорциональна линейной скорости V ТС:

$$f^A = 2V \cos \alpha / \lambda_0, \quad (14)$$

где $\lambda_0 = c/f_0$ – длина волны электромагнитных колебаний; c – скорость света.

Из формулы (14) можно определить линейную скорость ТС

$$V = \lambda_0 f^A / (2 \cos \alpha). \quad (15)$$

Из формул (15), (14) следует, что точность измерения скорости увеличивается с ростом несущей частоты f_0 вследствие увеличения разрешающей способности. Поэтому для увеличения точности надо использовать максимально высокую (24–75 ГГц) частоту СВЧ-диапазона, которую могут обеспечить маломощные (10–20 мВт) модули. Длины волн в этом случае составляют единицы миллиметров, поэтому антенные устройства, выполненные по полосковой технологии, обеспечивают приемлемую ширину диаграммы направленности 5–10° при малых габаритных размерах антенны. Поляризация излучения антенны и амплитудные искажения принимаемого сигнала от неоднородной поверхности очень слабо влияют на результат измерения доплеровской частоты.

Таким же образом можно измерить не только путевую линейную скорость, но и вектор скорости, что необходимо для автономной навигации [10]. Расположим антенны доплеровских датчиков с одинаковыми длинами волн λ_0 несущей частоты над задними колёсами электрокара и направим в вертикальной плоскости параллельно оси ТС и вниз под углом α к поверхности дороги. Вычислим линейные скорости V_n^D , V_p^D левого и правого колёс соответственно по формуле (15):

$$\left. \begin{aligned} V_n^D &= \lambda_0 f_n^D / (2 \cos \alpha); \\ V_p^D &= \lambda_0 f_p^D / (2 \cos \alpha); \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где f_n^D , f_p^D – доплеровские частоты левого и правого датчика соответственно.

Линейную скорость электрокара определим по формуле

$$V = (V_n^D + V_p^D) / 2 = \lambda_0 (f_n^D + f_p^D) / (4 \cos \alpha). \quad (17)$$

Подставив значения линейных скоростей из уравнений (16) и (17) в уравнение (8), получим выражение для виртуального рулевого угла $\delta_{\text{вир}}$:

$$\delta_{\text{вир}} = \arctg \left[\frac{2(f_n^D - f_p^D) \frac{L}{W}}{f_n^D + f_p^D} \right]. \quad (18)$$

Поскольку в результате применения доплеровских СВЧ-датчиков напрямую измеряются скорости задних колёс, скорость изменения курсового угла получим из уравнения (11). Кинематические дифференциальные уравнения для конфигурационного пространства $\{x^E, x^N, \theta\} \in S$, описывающие движение в рассматриваемой двухмерной системе координат, представим как

$$\begin{bmatrix} \dot{x}^E \\ \dot{x}^N \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \theta \\ V \sin \theta \\ \frac{V}{L} \tan \delta_{\text{вир}} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Принцип действия системы управления беспилотным электрокаром, основанной на использовании радиоволновых доплеровских датчиков. На рис. 4 приведена схема системы управления беспилотным электрокаром, в которой линейная скорость колёс измеряется доплеровскими СВЧ-датчиками и вычисляются $\delta_{\text{вир}}$, V .

Перед началом работы координаты начальной точки приводятся в соответствие с системой координат. Затем в блоке управления БУ включается генератор траектории, содержащий N точек, которые описывают весь маршрут передвижения ТС $\{x^{E*}, x^{N*}, \theta^*\}$. В первом такте данные первой точки передаются в блок преобразователей БП, откуда сигналы, соответствующие $\delta_{\text{вир}}^*$ и установленной оптимальной скорости V через плюсовые входы ОУ1, ОУ2 поступают в электронный дифференциал ЭД. Моторы правого и левого колёс приводятся в движение, Ω_n , Ω_p – угловые скорости вращения приводов правого и левого колеса соответственно. С выходов датчиков Д1, Д2 доплеровские частоты f_n^D , f_p^D

поступают на смесители С1, С2, с выходов которых сигналы разности и суммы этих частот поступают в блок преобразования БП. В блоке эти сигналы преобразуются в $\delta_{\text{вир}}$ и V (см. формулы (17), (18)) и выходят на минусовые входы ОУ1, ОУ2. Благодаря этому возникает отрицательная обратная связь, обеспечивающая устойчивое боковое и продольное движение ТС. Одновременно, для обеспечения условия Аккермана, в БП вычисляются значения сигналов рулевых углов δ_n , δ_p правого и левого колёс (см. формулы (4)), которые подаются на соответствующие поворотные блоки ПБ1, ПБ2. Там же через кинематические дифференциальные уравнения (19) вычисляется текущее положение ТС $\{x^E, x^N, \theta\}$, которое сравнивается с первой точкой генератора траектории. В момент совпадения координат этих точек происходит переход ко второй точке и далее процесс повторяется до точки $N-1$, после чего следует завершение маршрута в конечной точке N .

Заключение. В разработанной системе управления четырёхколёсными беспилотными транспортными электрокарами с отдельным задним приводом используются доплеровские СВЧ-датчики линейных скоростей. Задние колёса приводятся в движение электрическими моторами с помощью электронного дифференциала, который управляет перемещением путём изменения скоростей вращения колёс. Сигналы управления дифференциалом формируются на основе заданного массива путевых точек и корректируются данными о реальном перемещении ТС, поступающими с измеряющих линейные скорости задних колёс доплеровских СВЧ-датчиков. При этом система управления за счёт обратной связи обеспечивает устойчивое слежение за движением электрокара по заранее заданному маршруту между путевыми точками независимо от устанавливаемой скорости.

Список источников

1. Mondek M., Hromčík M., 2017 21st International conference on Process Control (PC), Strbske Pleso, Slovakia, June 6–9, 2017, IEEE, 2017, pp. 240–246.
<https://doi.org/10.1109/PC.2017.7976220>
2. Jazar R. N., *Vehicle Dynamics: Theory and Application*, Springer, 2008, 1015 p.
3. Khristamto M., Praptidjanto A., Kaleg S., *Energy Procedia*, 2015, vol. 68, pp. 463–470.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.278>
4. Sotelo M. Á., *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, vol. 45, iss. 3–4, pp. 223–233.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2003.09.002>
5. Hartani K., Miloud Y., Miloudi A., Electric Vehicle stability with rear Electronic differential Traction, *EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications*, Ghardaia, Algeria, November 2–4, 2010, EFEEA, 2010, pp. 1–5.
6. Vitols K., Galkin I., 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), September 4–6, 2012, Novi Sad, Serbia, 2012, pp. 1–5.
<https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397315>

7. Горбачев А. Ю. Применение одометров для коррекции интегрированных навигационных систем // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2009. № 4. С. 37–54.

8. Егорушкин А. Ю., Мкртчян В. И. Повышение точности автономной навигации наземных подвижных объектов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 4. С. 1–12. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-04-1480>

9. Nister D., Naroditsky O., Bergen J., *Journal of Field Robotics*, 2006, vol. 23, iss. 1, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1002/rob.20103>

10. Хаблов Д. В. Непрерывное наземное позиционирование на основе сверхвысокочастотных датчиков перемещений // Измерительная техника. 2019. № 6. С. 65–70. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-6-65-70>

References

1. Mondek M., Hromčík M., *2017 21st International conference on Process Control (PC)*, Strbske Pleso, Slovakia, June 6–9, 2017, IEEE, 2017, pp. 240–246.

<https://doi.org/10.1109/PC.2017.7976220>

2. Jazar R. N., *Vehicle Dynamics: Theory and Application*, Springer, 2008, 1015 p.

3. Khristamto M., Praptidjanto A., Kaleb S., *Energy Procedia*, 2015, vol. 68, pp. 463–470.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.278>

4. Sotelo M. Á., *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, vol. 45, iss. 3–4, pp. 223–233.

<https://doi.org/10.1016/j.robot.2003.09.002>

5. Hartani K., Miloud Y., Miloudi A., Electric Vehicle stability with rear Electronic differential Traction, *EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications*, Ghardaïa, Algeria, November 2–4, 2010, EFEEA, 2010, pp. 1–5.

6. Vitols K., Galkin I., *15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, September 4–6, 2012, Novi Sad, Serbia, 2012, pp. 1–5.

<https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397315>

7. Gorbachev A. Yu., Application of Odometers for Correction of Integrated Navigation Systems, *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrument Engineering*, 2009, no. 4, pp. 37–54. (In Russ.)

8. Egorushkin A. Yu., Mkrтчян V. I., Improving the accuracy of land mobile object autonomous navigation, *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, vol. 4, pp. 1–12 (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-04-1480>

9. Nister D., Naroditsky O., Bergen J., *Journal of Field Robotics*, 2006, vol. 23, iss. 1, pp. 3–20.

<https://doi.org/10.1002/rob.20103>

10. Khablov D. V., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 554–561. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01660-8>

Статья поступила в редакцию 14.12.2021; одобрена после рецензирования 18.01.2022; принята к публикации 25.01.2022.
The article was submitted 14.12.2021; approved after reviewing 18.01.2022; accepted for publication 25.01.2022.

ПОДПИСКА – 2022

- на ежемесячный научно-технический журнал
«Измерительная техника»
(печатное издание и электронная копия)

- ▶ онлайн на сайтах подписных агентств
- ▶ в редакции

Подписка через Интернет

ГК «Урал-Пресс»

«Измерительная техника»
38168 (печатное издание)
013315 (электронная копия)

www.ural-press.ru

☎ +7 (495) 789-86-36; +7 (499) 700-05-07

Агентство по распространению зарубежных изданий

www.arzi.ru

☎ +7 (495) 680-89-87; +7 (495) 631-62-55

✉ secret@arzi.ru

Агентство «Книга-Сервис»

- интернет-каталог «Пресса по подписке» www.akc.ru
- объединённый каталог «Пресса России» www.pressa-rf.ru

☎ +7 (495) 631-62-54

✉ podpiska@pressa-rf.ru

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU www.elibrary.ru

Электронно-библиотечная система «РУКОНТ» www.lib.rucont.ru

Подписка в редакции
на номера текущего года и архивные номера 2016–2021 гг.

- ▶ по телефону +7 (495) 430-28-02
- ▶ по электронной почте kersova@vniims.ru
- ▶ на сайтах www.vniims.ru, www.izmt.ru

Адрес редакции:

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГБУ «ВНИИМС»

☎ +7 (495) 781-48-70

✉ izmt@vniims.ru

www.izmt.ru