

# Алгоритм введения компенсационных коэффициентов в кругломере

К. Епифанцев, к. т. н.<sup>1</sup>

УДК 006.1 | ВАК 2.2.4

Кругломер предназначен для контроля отклонения от величины заданного профиля цилиндрических деталей. В процессе подготовки кругломера к работе одной из важных фаз настройки оборудования является его калибровка, заключающаяся в выравнивании стола и введении компенсационного коэффициента давления щупа. Анализируется зависимость алгоритма введения компенсационных коэффициентов в кругломере от дополнительных пригрузов детали.

## КРУГЛОМЕР

Основное назначение кругломеров – определение отклонений формы и взаимного расположения поверхностей деталей, тел вращения. Работа устройства основана на измерении положения наконечника щупа по отношению к измеряемой детали. В ходе измерений производится непрерывное прощупывание цилиндра по кругу. Кругломер – очень важный измерительный прибор для улавливания дефектов геометрии на субмикронном уровне. В статье исследуется зависимость значения центрирования прибора от пригрузов.

В процессе проведения эксперимента применялся метод, который позволил исследовать систему компенсации кругломера при прикреплении последовательно к четырем осям груза увеличивающейся массы. Методика установки грузов в верхней части на цилиндрическую деталь и в нижней части цилиндрической детали представлена на рис. 1а. При этом контактный щуп кругломера находился в крайней верхней или крайней нижней точке детали, так как для получения результата центрирования-выравнивания необходимо всегда сравнивать разницу кругового сечения нижней части с верхней. При испытаниях в верхнем положении груза на приборе щуп проходил верхнее сечение в непосредственной близости от него (рис. 1б), но без соприкосновения с ним.

Высота  $H_1 = 2H_2$  (см. рис. 1). Грузы выбирались не произвольно, а в соответствии с планом эксперимента, который предполагал нагружать две детали (представляющие собой тела вращения) последовательно увеличивающимися пригрузами с целью выявления влияния данных пригрузов на алгоритм работы фильтров, отвечающих

в приборе за введение компенсационных коэффициентов. Используемые для исследований детали имели вес 216,65 г (сплав Д16Т) и 732,6 г (марка стали Ст45). Детали с изначально равными точностными характеристиками были изготовлены на станках с ЧПУ, параметры шероховатости также схожи. Однако на детали из сплава Д16Т после нескольких месяцев эксплуатации образуется незначительный слой оксидной пленки, но и первая и вторая деталь перед проведением измерений в равной степени обрабатывались специальными растворами для очищения. Детали изображены на рис. 2, одна из деталей представляет собой сквозной ступенчатый вал высотой 96 мм с максимальным диаметром на одной из ступеней 60 мм, вторая деталь, меньшая по весу, – несквозную ступенчатую втулку высотой 70 мм, с максимальным диаметром на одной из ступеней 54 мм.

Кругломер является важным прибором для оценки цилиндричности, сферичности, плоскостности деталей и других параметров в соответствии с ГОСТ Р53442-2015 [1]. Нужно отметить, что в последнее время поставки данного прибора в РФ затруднены, поэтому производство отечественного аналога является актуальной задачей, которая может быть реализована только после ряда экспериментальных операций, позволяющих понять принцип работы данного прибора, а также поддержать его метрологические характеристики в ходе последующих поверок и калибровок. Поверка и калибровка кругломера осуществляется согласно ГОСТ 17353-89 «Приборы для измерений отклонений формы и расположения поверхностей вращения» [2], который включает в себя ряд мероприятий для оценки соответствия прибора заявленным характеристикам, оценки его метрологических погрешностей. С целью дополнительной оценки программы действующего кругломера RoundPak были предложены пригрузки в качестве универсальных систем, предназначенных для оценки поведенческой характеристики системы введения

<sup>1</sup> ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Россия, доцент, epifancew@gmail.com.



Рис. 1. а – схема проведения эксперимента; б – ощупывание детали щупом в верхней плоскости

компенсирующих коэффициентов для анализа правильности адекватной оценки и нахождения программой методом микросенсорики винтов выравнивающего стола с четырьмя микрометрическими щупами. В процессе проведения данных испытаний были проанализированы основные метрологические характеристики прибора [3–5], отвечающие за точность измерения, и потенциально – за погрешности в процессе работы. Также из ГОСТ Р 58868-2020 «Отклонение от круглости поверхности деталей. Методика выполнения измерений» [6] следует: окончательное центрирование производят путем перемещения измерительного преобразователя или рабочего стола (в зависимости от модели кругломера) с помощью микровинтов. Однако процесса испытания компенсационных коэффициентов не описано, данные испытания было решено провести инициативно, используя различные стандартные весовые пригрузки на мастике, магнитные системы закрепления было решено исключить, так как это оказало бы негативное влияние на электроконтактный щуп (рис. 3) и могло привести к искажениям результатов измерений. Согласно ГОСТ 17353-89 «Приборы для измерений отклонений формы и расположения поверхностей вращения» предусмотрены следующие типы погрешностей кругломеров: радиальная погрешность, осевая погрешность, погрешность прибора при измерении отклонений от круглости, коэффициент увеличения, погрешность коэффициента увеличения, коэффициент основного увеличения [3, 4]. При этом, согласно классу точности прибора, задается следующий предел погрешностей (табл. 1).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В соответствии с планом эксперимента, груз крепился строго напротив оси  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $L_x$ ,  $L_y$  в программе управления прибора перед началом работы проводится предварительная калибровка усилия щупа по пленочному эталону, после этого начинается процесс



Рис. 2. Исследуемые детали: а – деталь массой 216,65 г (сплав Д16Т) и б – массой 732,6 г (марка стали Ст45)

центрирования-выравнивания. После каждых двух оборотов стола с трехкулачковым патроном, на котором фиксируется деталь с грузом, груз снимается, в ту же точку ставится груз, массой больше предыдущего, и снова запускается операция центрирования-выравнивания [7–9]. Груз представлял собой эталонный набор микропластин и гирь различной массы – от 6750 до 7750 мг (рис. 4). Масса первой детали – 216,65 г, масса второй детали 732,6 г. Измерение проводилось контактным методом щупом 12AAL021 (см. рис. 3).

Процесс фиксации груза проводился с помощью мастики, вес которой постоянно контролировался (рис. 4). Суммарная масса была посчитана с учетом массы мастики. Результаты экспериментов представлены на рис. 5 и 6.

### ВЫВОДЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ, КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ГРАФИКОВ

В процессе анализа детали 216,65 г был сделан вывод о значительном расхождении осей  $C_x$  и  $L_y$ , что говорит о работе алгоритма для компенсации этих осей, так как после каждого испытания система введения поправок прибора выдает поправочные коэффициенты, которые должны вводиться на микрометрических винтах (рис. 7).

Таблица 1. Метрологические характеристики кругломеров согласно [2]

Класс точности прибора	Допускаемая погрешность, мкм		Допускаемая погрешность траектории прямолинейного перемещения на длине, мкм	
	Радиальная	Осевая	До 100 мм	От 100 до 500 мм
1	$0,05 + 0,0005h$	0,08	0,2	0,4
2	$0,12 + 0,0012h$	0,15	0,4	0,8

\*  $h$  – высота над уровнем стола, мм.

При анализе компенсационных элементов на двух деталях, у более массивной, но имеющей при испытаниях совершенно такие же грузы на аналогичной оси, проявилось расхождение в осях  $C_x$  и  $C_y$  (рис. 8).

При анализе результатов измерения, был сделан вывод: все компенсационные коэффициенты должны быть схожи на одной и той же детали, однако, как видно из проведенных исследований, есть оси, отличающиеся от значения других осей. Оси, в которых прослеживается рассогласование, выделены на рис. 5 и 6 серым цветом. Алгоритм выравнивания осей и приведение к значению менее 5 мкм путем многократно вводимых коэффициентов компенсации является главным алгоритмом программы. При этом, как следует из исследований, имеются определенные расхождения при измерении деталей из различных материалов,

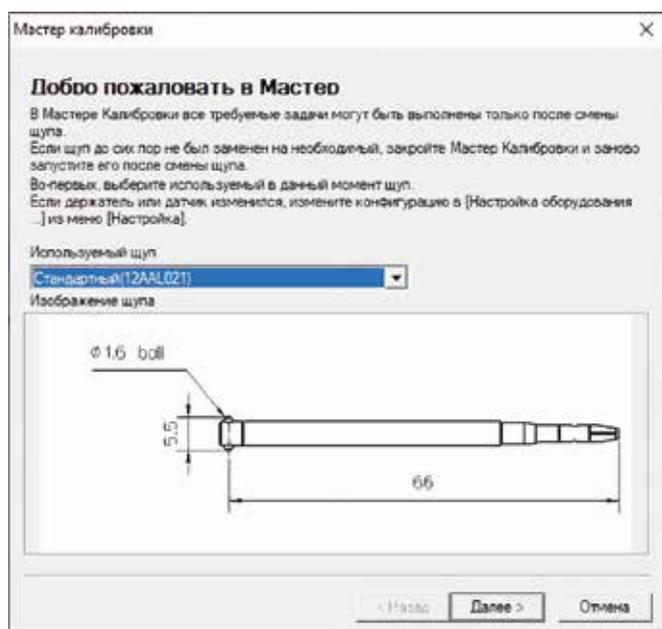


Рис. 3. Параметры используемого щупа (скриншот из мастера калибровки программы RoundPak)



Рис. 4. Приготовление мастики и грузов

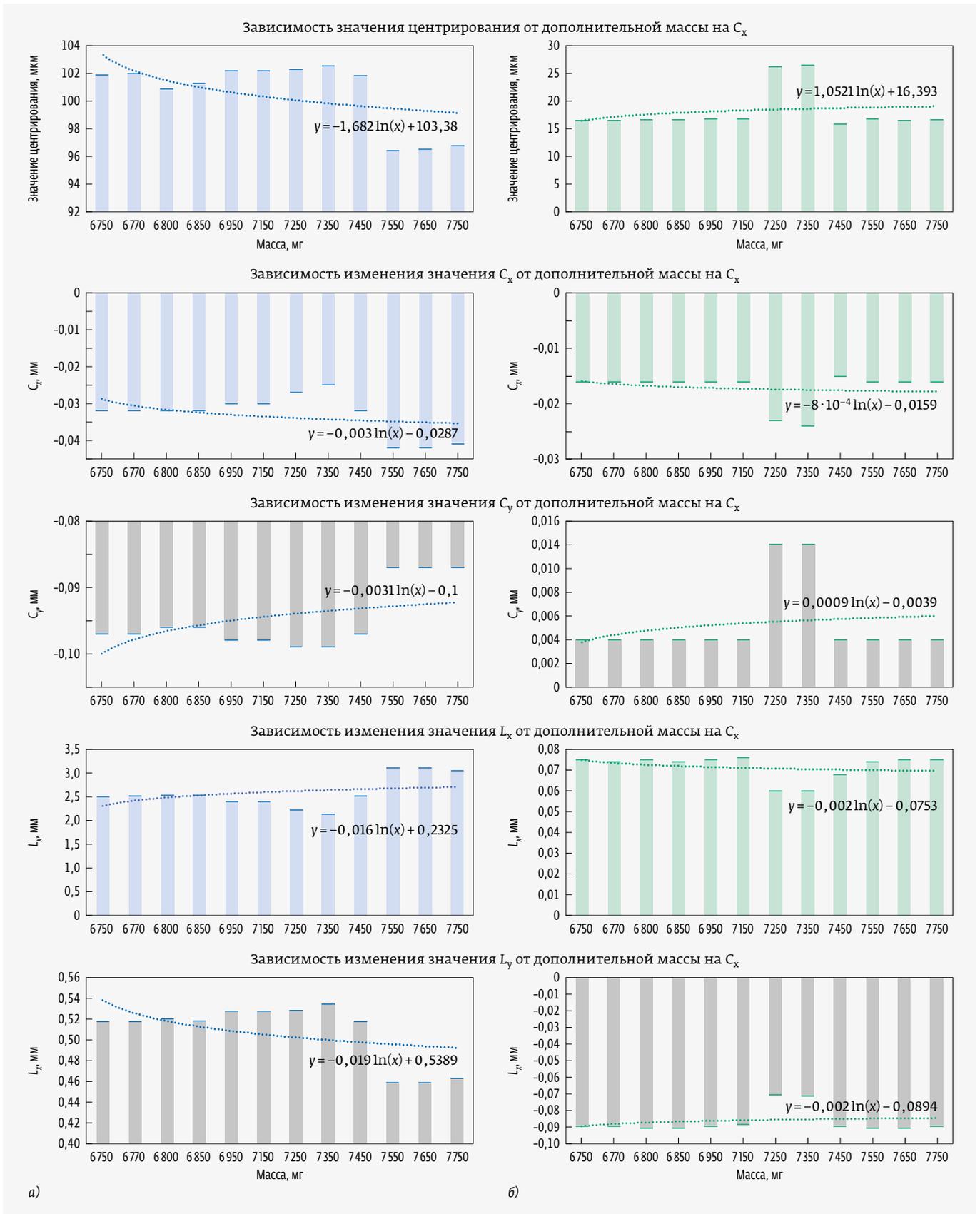


Рис. 5. Результаты эксперимента. Масса детали – 216,65 г, сплав Д16Т: а – груз сверху, б – груз в центре

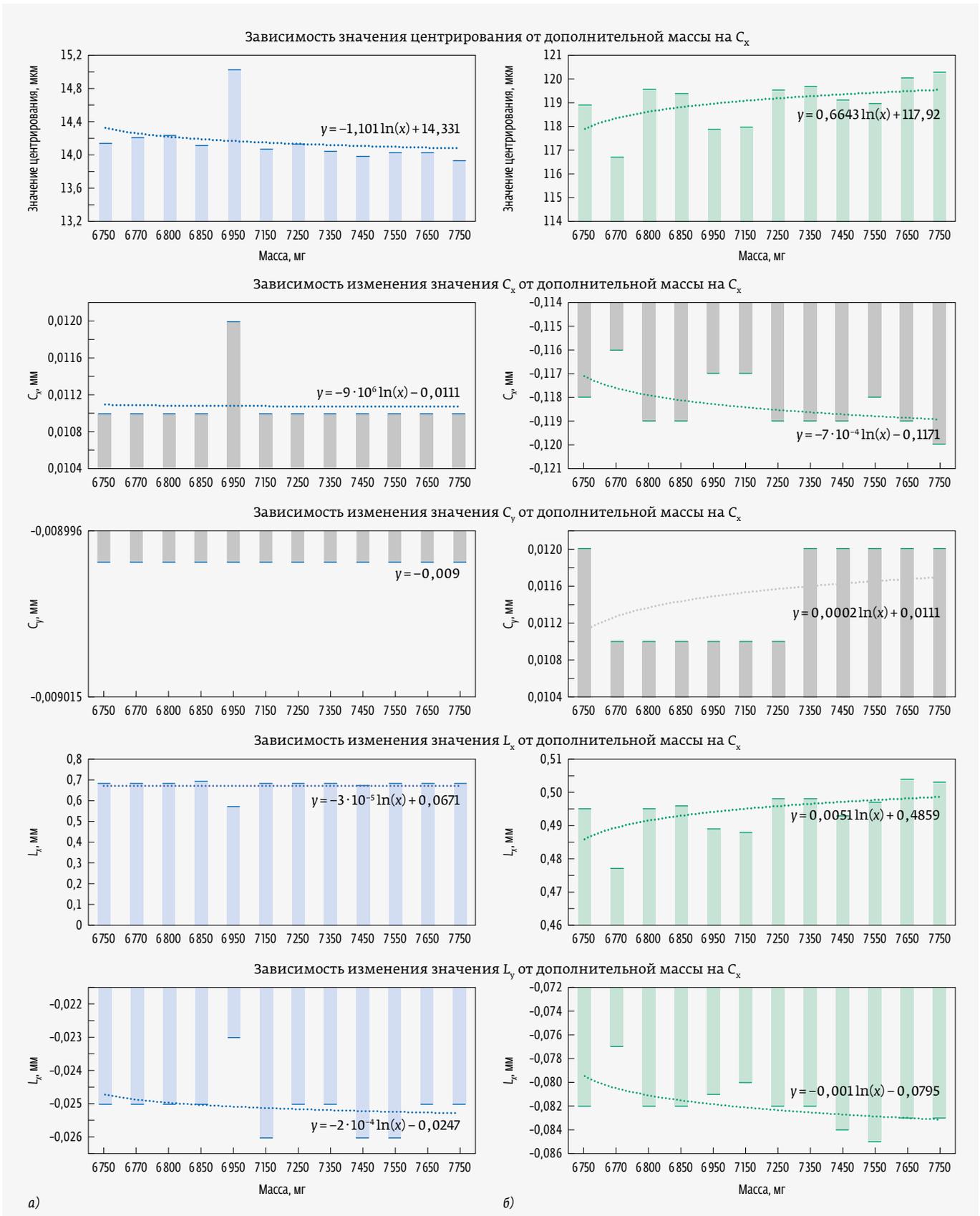


Рис. 6. Результаты эксперимента. Масса детали 732,6 г, марка стали Ст45: а – груз сверху, б – груз в центре

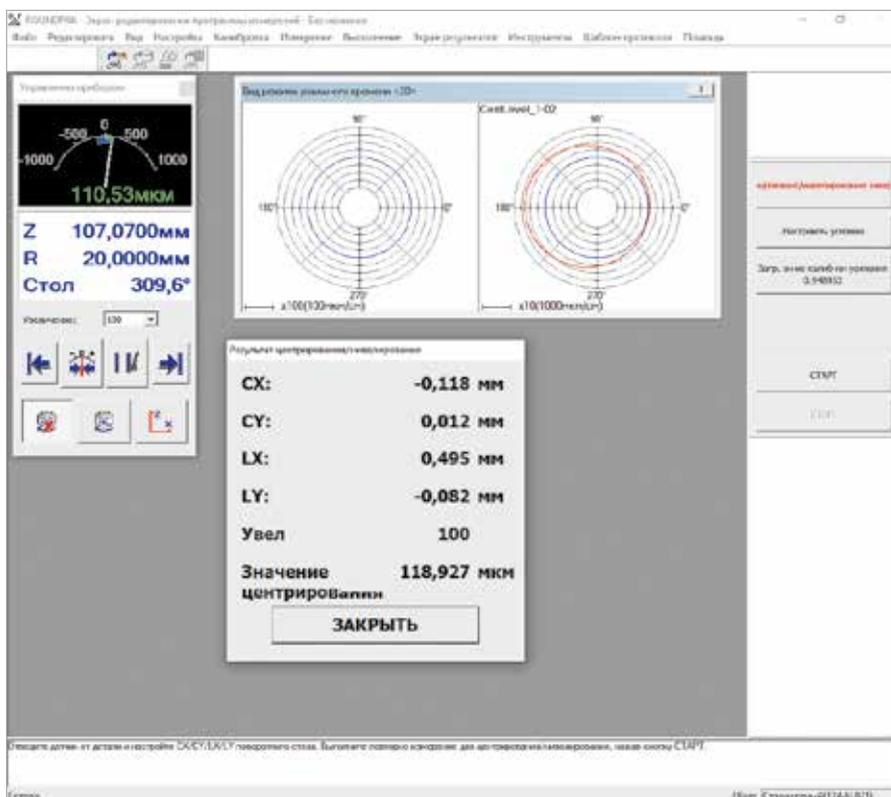


Рис. 7. Пример компенсационных поправок по четырем осям, на основании которых строились графики



Рис. 8. Схематичное изображение расхождения полярностей

с разной высотой и массой: на детали из дюралюминия наблюдается рассогласование в осях  $C_y$  и  $L_y$ , в стальной детали, превышающей по массе дюралюминиевую и имеющей существенно большую высоту, рассогласование в осях  $C_x$  и  $C_y$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 53442-2015. Характеристики изделий геометрические. Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. М.: Стандартинформ. 2015. 96 с.
2. ГОСТ 17353-89. Приборы для измерений отклонений формы и расположения поверхностей вращения. М.: Стандартинформ. 1999.
3. **Захаров О. В., Пугин К. Г.** Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 14–21.
4. **Захаров О. В., Бржозовский Б. М.** О точности центрирования при измерении на кругломерах // Измерительная техника. 2006. № 11. С. 20–22.
5. **Четвернин М. Ю.** Исследование методов определения положения оси вращения и измерение ее координат. В сб.: Инженерно-физические проблемы новой техники // Сб. материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного работника ВШ РФ, доктора физико-математических наук, профессора М. И. Киселёва / Под ред. А. А. Крансуцкая, Е. В. Тумакова, Е. В. Кречетова. М., 2020. С. 135–136.
6. ГОСТ Р 58868-2020. Отклонение от круглости поверхности деталей. Методика выполнения измерений. М.: Стандартинформ. 2020. 16 с.
7. **Гущина Е. А., Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю.** Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. СПб: ГУАП, 2022. 104 с.
8. **Фролова Е. А., Ефремов Н. Ю., Епифанцев К. В.** Проблемы калибровки кругломера «Roundtest RA-120P» при подготовке к работе. Сб. тезисов докладов I Молодежной конференции «За нами будущее». ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 2022. С. 219–221.
9. **Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю.** Исследование процесса калибровки и настройки датчиков кругломера ROUNDTEST RA-120P // Датчики и системы. 2022. № 5. С. 57–61.