

# Исследование алгоритма функционирования системы центрирования кругломера

К. Епифанцев, к. т. н.<sup>1</sup>

УДК 006.1 | ВАК 2.2.4

Проведен анализ корреляционных связей в системе компенсации кругломера зарубежного производства с целью создания аналогичного отечественного прибора. Проанализированы результаты исследований по Спирману, построены корреляционные графы, отражающие зависимости в программном модуле кругломера от массы пригрузов, значения центрирования, компенсационных коэффициентов на осях  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $L_x$ ,  $L_y$ .

**К**ругломеры (рис. 1) отечественного производства во времена СССР производились на нескольких заводах. Предшественниками кругломеров были оптические линейки, автоколлиматоры, интерферометры, индикаторы частоты, микаторы. В современной России специалистами из Самарского университета [1] был разработан кругломер оптического типа на основе датчиков Шака – Гармана, сканирующий сечение детали с помощью пучка лазера, но изделие находится пока на стадии прототипа.

Современными лидерами в производстве кругломеров являются Mahr, Mitytoyo и др. В табл. 1 представлены производители кругломеров и характеристики машин [3].

Основой кругломера служит вращающийся стол, на котором устанавливается деталь с дефектом геометрии для анализа качества продукции. Сначала проводится операция центрирования стола (точность

центрирования должна быть в пределах 5 мкм), только после этого начинается процесс измерения. Самый важный интеллектуальный центр кругломера расположен в датчиках и в программе, имеющей модуль математического расчета компенсации на оси, которые вносят поправку.

В современном производственном процессе определение дефектов формы деталей играет важную роль. В настоящее время процесс поверки кругломеров регламентируется следующими стандартами [4–6]. В рамках данных стандартов для процесса поверки кругломера основной мерой являются образцовые меры отклонения от круглости типа ОМОК-1, ОМОК-2, ОМК. По полученным результатам отклонения от круглости определяется погрешность прибора, нормируются его метрологические характеристики. Однако для расширения эталонной базы данного высокоточного прибора необходимо

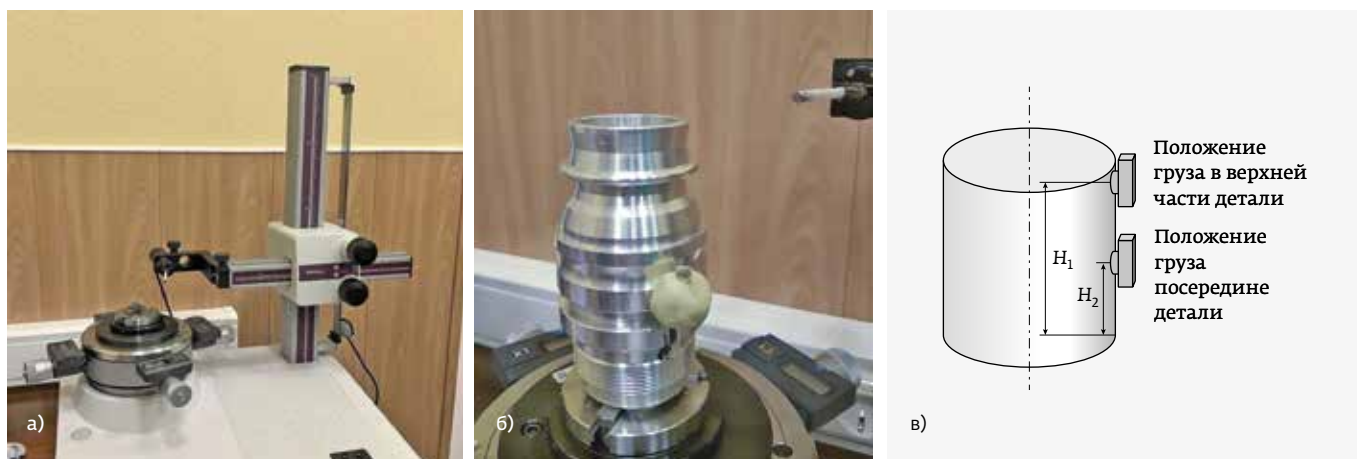


**Рис. 1.** а – кругломер модели 237 московского завода «Калибр»; б – кругломер модели Абрис К-10.2 (НПП «Абрис», г. Пенза); в – кругломер современного типа Roundtest (Япония) [2]

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

Таблица 1. Виды кругломеров

Наименование	Пределы измерений, мм		Увеличение, крат	Погрешность измерений, мм
	наружные и внутренние диаметры	высота		
Кругломеры с вращающимся датчиком				
Мод. 218 (ЭНИМС и Калибр), направляющие качения	3–300	400	250–10 000	0,0001
ВЕ-20 (ЭНИМС), направляющие скольжения	3–250	380	120–10 000	0,00015
Талиронд-51 (RankTaylor Hobson), комбинированные направляющие (качения и скольжения)	1,6–350	406	50–10 000	0,00003
Талиронд-2 (RankTaylor Hobson), комбинированные направляющие (качения и скольжения)	1,6–350	1270	50–10 000	0,00003
БВ-2003 (Челябинский инструментальный), аэростатические направляющие	2–150	150	2 000, 4 000	0,0002
Ротари Пайлтор типа RLE (Micrometrical Manufacturing Co-Bendix), аэростатические направляющие	0,8–203	203	250–100 000	0,00004
Ротари Пайлтор типа RLF (Micrometrical Manufacturing Co-Bendix), аэростатические направляющие	0,8–385	457	250–100 000	0,00004
Талитрон R-20 (FAG Kugetfisher), аэростатические направляющие	До 2 000	до 1600	250–10 000	0,0001
Кругломеры с вращающимся столом				
Мод. 246 (ЭНИМС и Калибр), направляющие скольжения	350	1500	250–10 000	0,0002
Талиронд-200 (RankTaylor Hobson), комбинированные направляющие (качения и скольжения)	305	305	100–10 000	0,000075
Цинформ (British Aircraft Corporation), аэростатические направляющие	200	75	до 100 000	0,00005
Талитрон R-1 (FAG Kugetfisher), аэростатические направляющие	340	100	2500–10 000	0,00008
Индирон (Cleveland), аэростатические направляющие	До 127		10 000–50 000	0,000075
Пневмоцентрик (Federal), аэростатические направляющие	До 177		220–22 000	0,000125
Тестер EG (Ksaka), гидравлические направляющие	До 100		100–3000	0,001
ERT-18 (Tokyo Seimitsu), аэростатические направляющие	До 120		100–10 000	0,0005
Ротари Пайлтор типа RLG (Micrometrical Manufacturing Co-Bendix), направляющие качения	До 208		до 100 000	0,000075
Formscan 3000 (Federal), аэростатические направляющие	До 450	до 400	20 000–25 400	0,00005
Formscan 3600 (Federal), аэростатические направляющие	До 178	229	до 25 000	0,00004



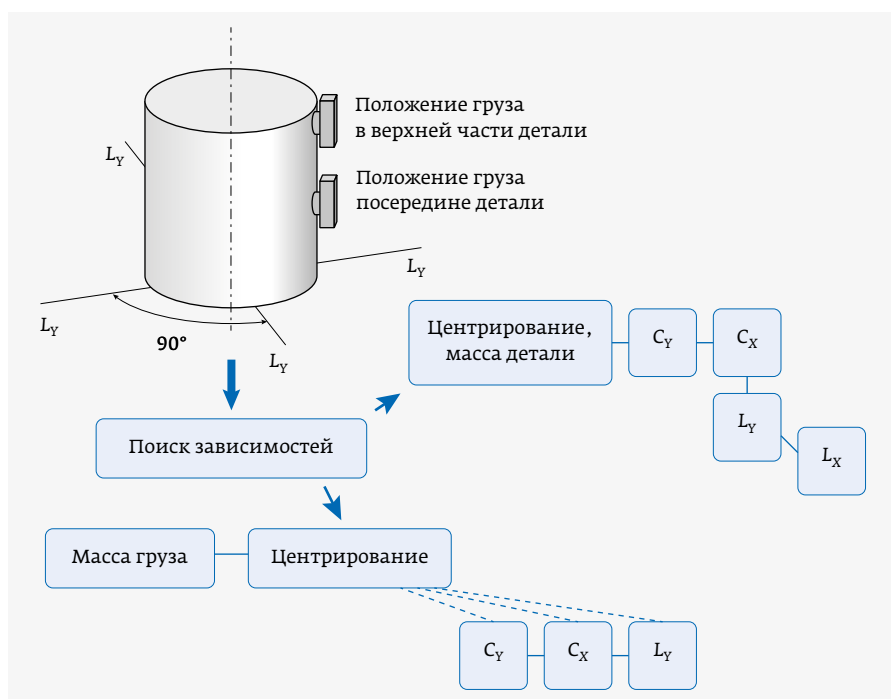
**Рис. 2.** Разработка эталона осевого биения. Кругломер – а; пригруз на мастике – б; проект эталона и фиксации грузов – в

ввести также еще один важный эталон и методику для измерения осевого биения детали, как наиболее важного и часто используемого измерения при решении производственных задач по выявлению брака деталей в виде тел вращения.

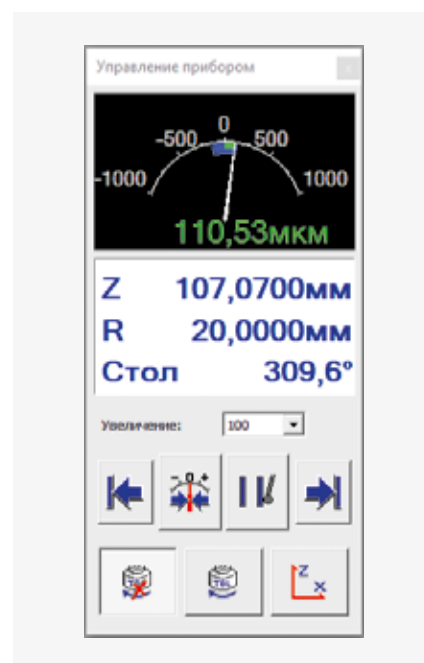
В процессе проведения эксперимента, была реализована методика и прототип эталона для определения биения детали. Методика установки грузов в верхней части на цилиндрическую деталь и в средней части

цилиндрической детали представлена на рис. 2. Высота  $H_1 = 2H_2$ , груз крепится строго напротив оси поворотного стола кругломера  $C_X C_Y L_X L_Y$ . Установленный с помощью мастики груз представлял собой эталонный набор микропластин и гирь различной массы – от 6750 до 7750 мг.

Эталон с пригрузами, уставленный на стол кругломера, также представлен на рис. 2. Цель исследования – обнаружить зависимости между осями кругломера и пригрузами (рис. 3).



**Рис. 3.** Расположение детали при проведении эксперимента, положение осей



**Рис. 4.** Мнемосхема контактного щупа

**Таблица 2.** Корреляционная матрица, деталь 216,65 г – 70,40 мм, расположение груза на  $C_x$ . Корреляции рангового порядка Спирмена. Попарно отмеченные красным цветом корреляции, значимые при  $p < 0,05000$

	Масса	Центрирование	$C_x$	$C_y$	$L_x$	$L_y$
Масса	1,000000	0,188811	0,009179	0,129550	-0,128105	-0,014783
Центрирование	0,188811	1,000000	-0,761853	0,647750	-0,172026	0,395440
$C_x$	0,009179	-0,761853	1,000000	-0,850230	0,360319	-0,504498
$C_y$	0,129550	0,647750	-0,850230	1,000000	-0,678064	0,684653
$L_x$	-0,128105	-0,172026	0,360319	-0,678064	1,000000	-0,290149
$L_y$	-0,014783	0,395440	-0,504498	0,684653	-0,290149	1,000000

План эксперимента включал последовательное увеличение массы пригрузов на детали из стали и из дюралюминия в соответствии с рис. 2. Масса груза представлена рядом увеличивающихся грузов, крепящихся строго напротив каждой из осей. Масса грузов составляла (граммы):  $m_1=6750$ ,  $m_2=6770$ ,  $m_3=6800$ ,  $m_4=6850$ ,  $m_5=6950$ ,  $m_6=7150$ ,  $m_7=7250$ ,  $m_8=7350$ ,  $m_9=7450$ ,  $m_{10}=7550$ ,  $m_{11}=7650$ ,  $m_{12}=7750$ .

Исследованию подвергались следующие детали: деталь массой 216,65 г (марка сплава Д16Т) и 732,6 г (марка стали Ст45). Детали поочередно устанавливались на стол кругломера, закреплялись, затем стол совершал два оборота вокруг своей оси и программа выдавала на экран данные о центрировании-выравнивании. Эти данные фиксировались в виде графиков. Далее были учтены корреляционные связи, представленные в табл. 2.

Все микронеровности в программе вычислений учитываются контактным щупом, который визуализирован в виде мнемосхемы (рис. 4).

Оценка зависимостей проводилась по программе Statistica. В качестве оценки выбран эксперимент с расположением груза в центре детали.

Корреляционный анализ представляет собой статистическую процедуру, позволяющую выявлять взаимосвязи между переменными и производить их количественную оценку. Расчеты выполнялись в программе Statistica 7.0. Связь между переменными характеризуют коэффициентом парной корреляции  $r(x, y)$ , величина которого может быть от -1 до +1.

При  $r(x, y) < 0$  (со знаком минус) – связь между переменными  $X$  и  $Y$  обратная, отрицательная, то есть с увеличением значений переменной  $X$  значения переменной  $Y$  уменьшаются. При  $r(x, y) > 0$  (со знаком плюс) – связь прямая, положительная, то есть с увеличением значений переменной  $X$  переменная  $Y$  также увеличивается.

Корреляционный анализ Спирмена проводится по формуле:

$$\rho = 1 - \frac{6 \cdot \sum d^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (1)$$

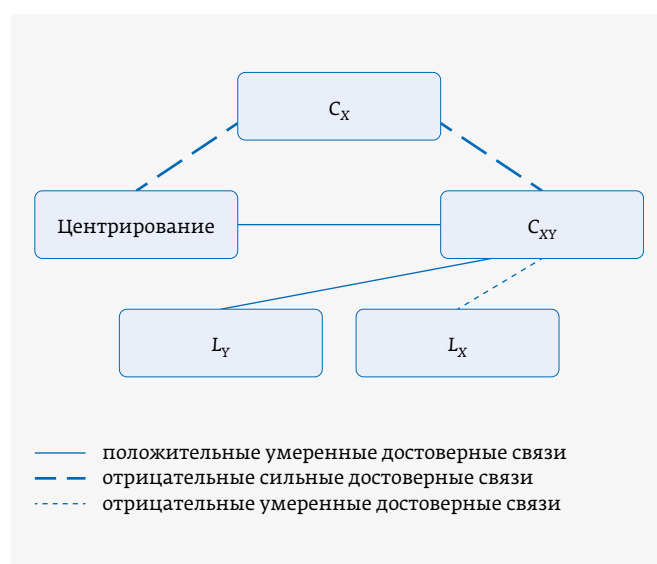
где  $n$  – количество ранжируемых признаков (показателей, испытываемых);

$d$  – разность между рангами по двум переменным для каждого испытуемого.

Результаты корреляционного анализа показателей экспериментов детали массой 216,65 г и высотой 70,40 мм (центрирование 17,022) представлены ниже.

При расположении груза на  $C_x$  выявлено, что увеличение массы не всегда взаимосвязано с изменением по осям. Чем выше показатель центрирования, тем выше положительное смещение по  $C_y$  и тем выше отрицательное смещение по  $C_x$ . Чем выше смещение по  $C_x$ , тем выше отрицательное смещение по  $C_y$ . Чем выше смещение по  $C_y$ , тем выше смещение по  $L_y$  и выше отрицательное смещение по  $L_x$  (табл. 2, рис. 5).

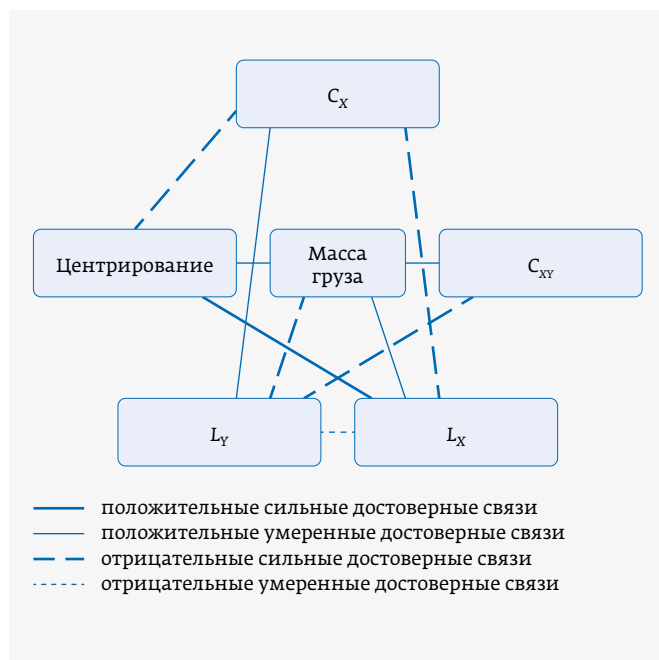
Далее производим анализ графиков детали массой 732,6 г и высотой 95,98 мм. При расположении груза на  $C_x$



**Рис. 5.** Корреляционный граф, деталь 216,65 г – 70,40 мм, расположение груза на  $C_x$

**Таблица 3.** Корреляционная матрица, деталь 732,6 г – 95,98 мм, расположение груза на  $C_x$ . Корреляции рангового порядка Спирмена. Попарно отмеченные красным цветом корреляции, значимые при  $p < 0,05000$

	Масса	Центрирование	$C_x$	$C_y$	$L_x$	$L_y$
Масса	1,000000	0,608392	-0,547104	0,579365	0,663162	-0,708319
Центрирование	0,608392	1,000000	-0,933075	0,434524	0,880707	-0,570287
$C_x$	-0,547104	-0,933075	1,000000	-0,388075	-0,774655	0,620923
$C_y$	0,579365	0,434524	-0,388075	1,000000	0,532952	-0,752355
$L_x$	0,663162	0,880707	-0,774655	0,532952	1,000000	-0,637905
$L_y$	-0,708319	-0,570287	0,620923	-0,752355	-0,637905	1,000000



**Рис. 6.** Корреляционный граф, деталь 732,6 г – 95,98 мм, расположение груза на  $C_x$

выявлено, что чем выше масса груза, тем выше показатель центрирования, выше отрицательное смещение по  $C_x$ ,  $C_y$  и  $L_y$ . Чем выше показатель центрирования, тем выше отрицательное смещение по  $C_x$ ,  $C_y$  и  $L_y$ . Выявлены положительные достоверные связи между показателями  $C_x$ ,  $C_y$  и  $L_y$ , то есть при увеличении одного показателя, другие показатели так же увеличиваются (табл. 3, рис. 6).

Далее в качестве оценки выбран эксперимент с расположением груза в верхней части детали. Результаты корреляционного анализа показателей экспериментов детали 216,65 г – 70,40 мм представлены в табл. 4.

При расположении груза на  $C_x$  выявлено, что увеличение массы не взаимосвязано с изменением по осям. Чем выше показатель центрирования, тем выше положительное смещение по  $C_x$  и  $L_y$  и тем выше отрицательное смещение по  $C_y$  и  $L_x$ . Чем выше смещение по  $C_x$ , тем выше положительное смещение по  $L_y$  и тем выше отрицательное смещение по  $C_y$  и  $L_x$ . Чем выше смещение по  $C_y$ , тем выше положительное смещение по  $L_x$  и выше отрицательное смещение по  $L_y$ . Чем выше положительное смещение по  $L_x$ , тем выше отрицательное смещение по  $L_y$  (табл. 4). Графически выявленные связи представлены на рис. 7.

**Таблица 4.** Корреляционная матрица, деталь 216,65 г – 70,40 мм, расположение груза на  $C_x$ . Корреляции рангового порядка Спирмена (табл. 1). Попарно отмеченные красным цветом корреляции, значимые при  $p < 0,05000$

	Масса	Центрирование	$C_x$	$C_y$	$L_x$	$L_y$
Масса	1,000000	-0,370629	-0,349371	0,345878	0,350879	-0,353377
Центрирование	-0,370629	1,000000	0,960769	-0,980581	-0,985971	0,876374
$C_x$	-0,349371	0,960769	1,000000	-0,964951	-0,964146	0,971008
$C_y$	0,345878	-0,980581	-0,964951	1,000000	0,984027	-0,882919
$L_x$	0,350879	-0,985971	-0,964146	0,984027	1,000000	-0,879455
$L_y$	-0,353377	0,876374	0,971008	-0,882919	-0,879455	1,000000

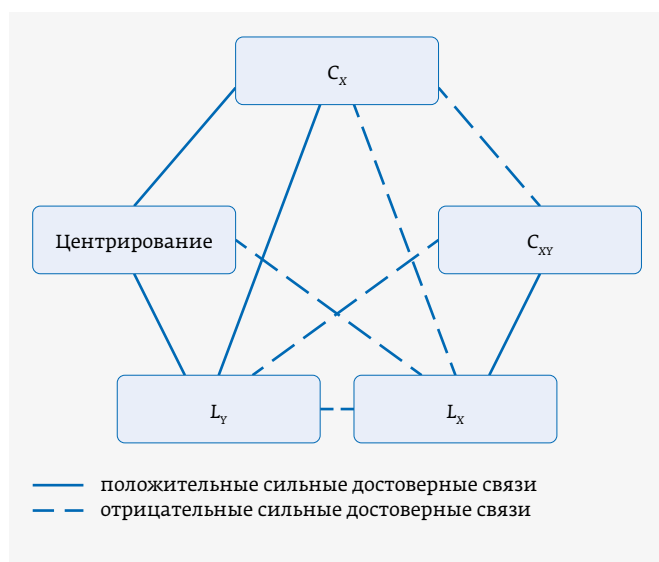


Рис. 7. Корреляционный граф, деталь 216,65 г – 70,40 мм, расположение груза на  $C_x$

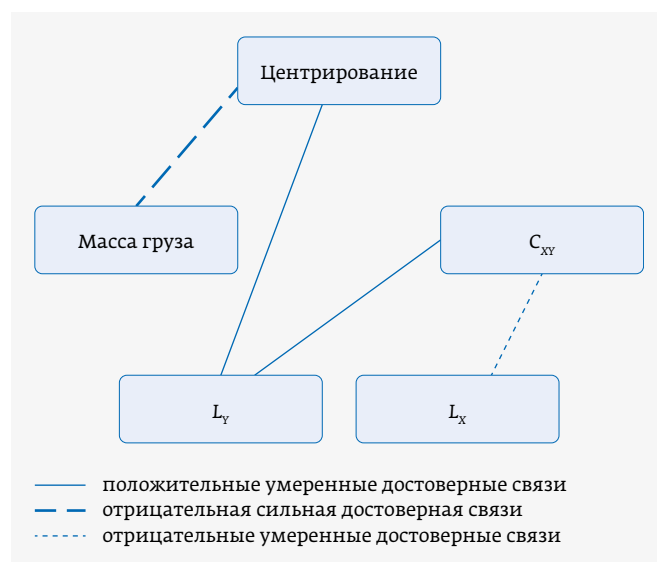


Рис. 8. Корреляционный граф, деталь 732,6 г – 95,98 мм, расположение груза на  $C_x$

Результаты корреляционного анализа показателей экспериментов детали 732,6 г – 95,98 мм. При расположении груза на  $C_x$  выявлено, что смещение при всех грузах по  $C_y$  составляло  $-0,009$ . Увеличение массы груза приводит к уменьшению показателя центрирования. Чем выше показатель центрирования, тем выше положительное смещение по  $L_y$ . Чем выше смещение  $C_x$ , тем выше положительное смещение по  $L_y$  и тем выше отрицательное смещение по  $L_x$  (табл. 5, рис. 8).

Анализ графиков, созданных на основе проведенных экспериментов, позволил определить положительные умеренные достоверные связи, отрицательные сильные достоверные связи, отрицательные умеренные достоверные связи. При этом важной частью метрологического отказа при проведении измерений может служить некорректная работа системы автоматической фильтрации

полученных значений, причиной этого может быть изначальная погрешность при отсутствии процедуры калибровки щупа на измерительное усилие. Также важной процедурой калибровочной схемы, по которой возможно оценить работу компенсационной характеристики на этапе центрирования прибора с установленной деталью, является процесс подбора подвесов, который значительно упростит настройку прибора, на основе анализа правильности введения компенсационных коэффициентов. Зачастую при ремонте прибора снимается с вращающегося подшипника столик с микрометрическими винтами, однако при обратной установке можно перепутать оси подшипника и оси микрометрических винтов. Признаки данной некорректной установки могут обнаружиться при невозможности провести центрирование детали. Ошибкой, как говорилось ранее, может служить снятие

Таблица 5. Корреляционная матрица, деталь 732,6 г – 95,98 мм, расположение груза на  $C_x$ . Корреляции рангового порядка Спирмена (табл. 1). Попарно удаленные и отмеченные красным цветом корреляции, значимые при  $p < 0,05000$

	Масса	Центрирование	$C_x$	$C_y$	$L_x$	$L_y$
Масса	1,000000	<b>-0,851140</b>	-0,131014		-0,146863	-0,310968
Центрирование	<b>-0,851140</b>	1,000000	0,481227		-0,073560	<b>0,578826</b>
$C_x$	-0,131014	0,481227	1,000000		<b>-0,630548</b>	<b>0,577350</b>
$C_y$				1,000000		
$L_x$	-0,146863	-0,073560	<b>-0,630548</b>		1,000000	-0,060674
$L_y$	-0,310968	<b>0,578826</b>	<b>0,577350</b>		-0,060674	1,000000



стола с подшипникового узла и установка его не в соответствии с осями, которые должны ставиться по наклейкам-указателям. Однако при стирании или отслоении данных наклеек оператор может столкнуться с проблемой, что, как только поставлена деталь, после центрирования значение достигает 400 мкм и выше. При этом даже после выставления компенсационных коэффициентов результат центрирования только ухудшается, при этом непонятно, как прибор отдает команды регулировок осей. В данном случае могут помочь откалибровать прибор только пригрузки, которые сразу продемонстрируют, правильно ли установлен стол после снятия его с вращающего подшипника, соответствуют ли оси столика с трехкулачковым патроном осям подшипникового узла.

Таким образом, представленные расчеты могут быть также использованы для разработки программного алгоритма отечественного кругломера, поскольку в процессе обнаружения дефектов месторасположения, ориентации и биения стратегической задачей является выравнивание детали и создание для нее идеально ровной поверхности и идеально ровной оси, относительно которых контактным щуповым или бесконтактным лазерным методом можно произвести измерение без предварительно загруженной модели трехмерного эталона,

а лишь предварительным заданием конструкторских допусков [7].

Следовательно, как указано в источнике [8, 9], остаточный эксцентриситет является важной составляющей инструментальной погрешности прибора, которая уменьшает точность работы встроенных в программный модуль внутренних фильтров прибора. Если к этому добавить не всегда идеальное состояние по вибрации и запыленности в силу нахождения прибора в центре города, то нужно сказать, что он подвержен большой сумме погрешностей, накапливающихся со временем и не позволяющим постоянно использовать одну калибровку на долгий срок измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Заякин О. А., Белопухов В. Н., Манухин А. В., Ростов А. А.** Комплекс программных средств для исследования погрешности измерений экспериментального лазерного кругломера // Программные продукты и системы. 2018. № 1. С. 64–71.
2. **Преображенская Е. В., Лутьянов А. В.** Повышение степени достоверности контроля соосности расточенных отверстий корпусных деталей станков с помощью кругломеров // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Машиностроение. 2011. № 37. С. 19–22.
3. **Сергеев С. А.** Создание и исследование систем измерения некруглости с виртуальным базированием, синтез структуры и разработка кругломеров. Автореф. дисс. на соис. уч. ст. канд. тех. наук, СПб, 2000.
4. ГОСТ 8.481-82. Кругломеры. Методики и средства поверки. М.: Стандартинформ. 1982.
5. ГОСТ 17353-89. Приборы для измерений отклонений формы и расположения поверхностей вращения. М.: Стандартинформ. 1999.
6. ГОСТ Р 58868-2020. Отклонение от круглости поверхности деталей. Методика выполнения измерений. М.: Стандартинформ. 2020.
7. **Четвернин М. Ю.** Исследование методов определения положения оси вращения и измерение ее координат. В сб.: Инженерно-физические проблемы новой техники // Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного работника ВШ РФ, д. ф.-м. н., проф. М. И. Киселёва / Редакция: А. А. Крансуцкая, Е. В. Тумакова, Е. В. Кречетова. М., 2020. С. 135–136.
8. **Захаров О. В., Пугин К. Г.** Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 14–21.
9. **Захаров О. В., Бржозовский Б. М.** О точности центрирования при измерении на кругломерах // Измерительная техника. 2006. № 11. С. 20–22.

**ООО “Руднев-Шиляев”**

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

**Инструментальные решения задач заказчика!**

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35  
 www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru  
 тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368