

УДК 53.082.53 : 531.7 : 681.786

ИЗМЕРЕНИЕ НЕКРУГЛОСТИ ЦИЛИНДРОВ, СВОБОДНО КАТЯЩИХСЯ ПО НАПРАВЛЯЮЩИМ ОПОРАМ ЛИБО ГЛАДКОЙ РОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

П. П. Белоусов¹, П. Я. Белоусов¹, О. П. Белоусова^{1, 2}

¹ Учреждение Российской академии наук
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
E-mail: pyabelousov@ngs.ru

² Учреждение Российской академии наук
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41

Экспериментально обосновывается новый оптический метод измерения некруглости цилиндров, заключающийся в измерении горизонтальной проекции скорости катящегося круглого тела и вычислении максимального отклонения локального значения радиуса, периодически повторяющегося в процессе движения. Проведены сравнения результатов измерений предложенным методом с результатами прямых измерений микрометром. Показано, что новый метод позволяет получить допусковые оценки некруглости при дефектах образующих цилиндра и максимальные вариации радиуса при некруглости направляющей. Экспериментально подтверждена погрешность измерения некруглости (~ 1 мкм).

Ключевые слова: лазерная доплеровская анемометрия, измерение скорости, измерение некруглости, измерение геометрических параметров круглых тел.

Введение. Измерение геометрических параметров шаров и цилиндров является важной задачей в машиностроении и других отраслях производства. Качество шариковых и роликовых подшипников определяет долговечность и эффективность работы движущихся механизмов в производственных условиях и на транспорте.

Существуют различные методы измерения некруглости шаров и цилиндров. Простейшим из них является измерение диаметра с помощью микрометра либо микроскопа [1]. Многократные измерения диаметра при различной ориентации объекта позволяют определить отклонение этого важного параметра от требуемой величины. Используя лазерные измерители перемещений [2, 3], можно определять вариации диаметра до десятых долей микрона. Применяются теневые и триангуляционные методы [4–6], которые обеспечивают измерение диаметров цилиндров с микронными погрешностями. Информация о диаметре цилиндров недостаточна для определения их формы. Современные видеокамеры имеют линейный шаг дискретности $\sim 10^{-3}$ – 10^{-4} от максимального размера изображения, благодаря чему можно определять с соответствующей погрешностью форму и поперечные размеры тел. Однако при этом объективы камер должны обладать достаточным полем зрения, разрешающей силой и малыми оптическими искажениями для решения поставленной задачи. Кроме того, необходимо обеспечивать измерения при различной угловой ориентации объектов. Все перечисленные методы позволяют проводить их только в фиксированных точках. Выполнение измерений в большом количестве точек для получения подробной информации об объекте сопряжено, как правило, с большими затратами времени и средств и не даёт возможности определить непрерывный профиль сечения шаров и цилиндров.

Не умаляя эффективности существующих методов, в данной работе предлагается простой и сравнительно дешёвый способ определения некруглости больших сечений шаров или нормальных сечений цилиндров, суть которого состоит в том, что измеряются вариации скорости свободно катящегося объекта (например, цилиндра) по ровной гладкой поверхности либо по двум параллельным направляющим опорам. Этими опорами могут быть два цилиндра одинакового диаметра, лежащие на плоскости. При этом поверхность, по которой катится цилиндр, ориентирована нормально относительно направления силы тяжести. Это же условие характерно для плоскости, на которой лежат направляющие цилиндрические опоры.

Круглый цилиндр имеет нормальную направляющую, характеризующуюся тем, что все её точки лежат в плоскости нормального сечения цилиндра и равноудалены от его оси. У такого цилиндра радиус $r(\varphi) = R_0$ — постоянная величина, не зависящая от полярного угла φ . В отличие от круглого цилиндра радиус некруглого зависит от полярного угла φ .

При движении некруглого вращающегося цилиндра полярный угол $\varphi(t)$ элемента его боковой поверхности, касающейся опоры, непрерывно меняет своё значение:

$$\varphi(t) = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^t \omega(t) dt = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_{\text{ЦМ}}(t)}{R} dt.$$

Здесь $\omega(t)$ — угловая скорость вращения цилиндра вокруг оси, а $V_{\text{ЦМ}}$ — скорость центра масс (ЦМ). Значение радиуса цилиндра R в точке опоры также будет непрерывно изменяться, так как оно однозначно определяется значением φ . Вместе с радиусом будет изменяться расстояние от оси цилиндра до точки опоры. При этом ЦМ катящегося цилиндра будет смещаться в вертикальном направлении, изменяя кинетическую и потенциальную энергию объекта. Смещение центра тяжести вверх из-за некруглости объекта приведёт к уменьшению поступательной и вращательной скоростей, а смещение вниз — к их увеличению (согласно закону сохранения энергии). Используя этот закон, можно определить изменение вертикального положения ЦМ и соответственно радиуса цилиндра.

Действительно, при качении идеально круглого цилиндра по ровной поверхности в поле сил земного тяготения сила веса mg приложена к его оси и направлена нормально к поверхности качения в точку опоры цилиндра (рис. 1, *a*). При этом отсутствуют силы, изменяющие кинетическую энергию цилиндра, поскольку момент силы относительно точки опоры равен нулю. Если цилиндр некруглый (эллипсоидный, рис. 1, *b*), то сила веса направлена в точку опоры цилиндра только тогда, когда нормаль \mathbf{N} к поверхности, проведённая из точки опоры, проходит через ось цилиндра. В противном случае (рис. 1, *c*) нормаль \mathbf{N} проходит слева от ЦМ. При этом силу веса, приложенную к ЦМ цилиндра, можно разложить на две составляющие: \mathbf{F}_D , ориентированную на точку опоры, и \mathbf{F}_T , тормозящую движение цилиндра, поскольку она направлена против вектора скорости ЦМ. На рис. 1, *d* нормаль \mathbf{N} расположена справа от ЦМ. Здесь сила веса имеет составляющие \mathbf{F}_D и \mathbf{F}_V , ориентированные на точку опоры и по направлению \mathbf{V} соответственно. В последнем случае \mathbf{F}_V увеличивает кинетическую энергию цилиндра. Как видно, ось некруглого цилиндра при смещении вверх (см. рис. 1, *c*) увеличивает его потенциальную энергию и уменьшает кинетическую, а при смещении вниз (см. рис. 1, *d*) увеличивает кинетическую энергию. На этих рисунках угол θ большой. При определении поступательной скорости ЦМ проводится измерение её горизонтальной проекции. При этом значение скорости умножается на косинус угла θ . На практике высота h локальных неровностей направляющей цилиндра мала по сравнению с радиусом цилиндра R . Тогда расстояние между нормалью \mathbf{N} и осью цилиндра не превышает значения $\sqrt{2hR}$, θ меньше величины

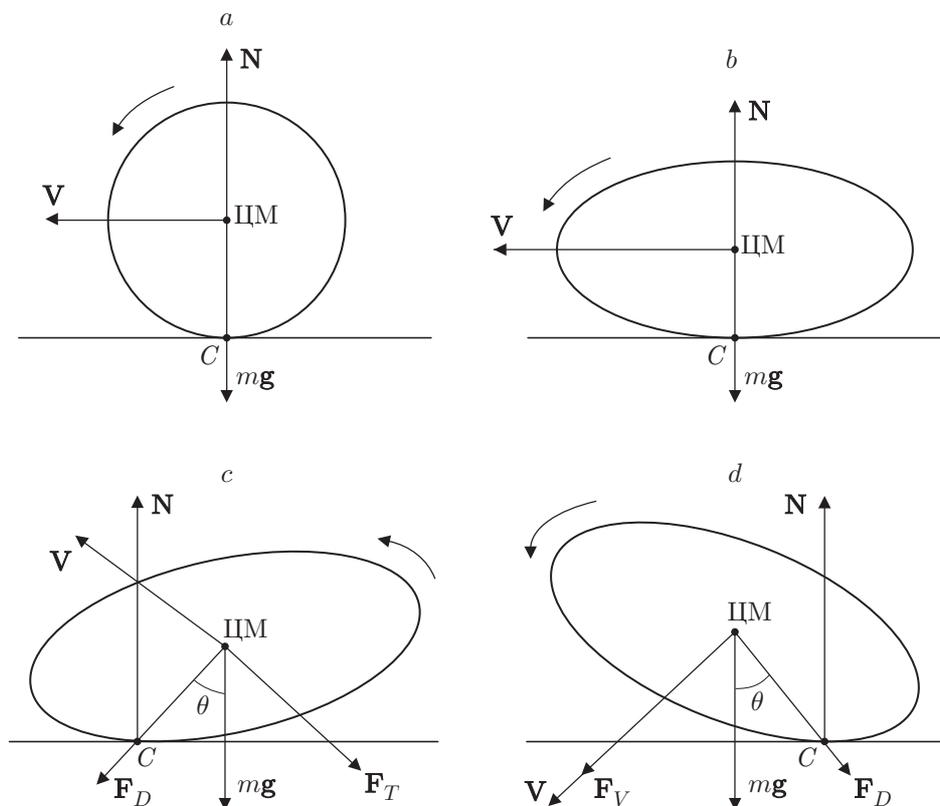


Рис. 1. Механизм изменения скорости ЦМ некруглого цилиндра, катящегося по ровной поверхности

$\sim \sqrt{2h/R}$, а $\cos \theta$ отличается от единицы на величину, не превышающую h/R . Отсюда видно, что относительная ошибка измерения скорости ЦМ цилиндра, связанная с поворотом вектора скорости ЦМ в процессе движения, также не превышает величину h/R . Таким образом, измерение поступательной и вращательной скоростей в каждый момент времени может быть выполнено с точностью, достаточной для решения поставленной задачи.

При прокатывании круглых объектов по ровной поверхности выявляются выпуклые дефекты на боковой поверхности цилиндра, связанные как с локальной непрямолинейностью образующих, так и некруглостью направляющей цилиндра. Недостатком использования ровной поверхности является то, что на результат измерения могут влиять внешние факторы, например пыль, прилипшая к боковой поверхности цилиндра.

Прокатывание цилиндров по направляющим опорам позволяет уменьшить влияние внешних факторов и проводить локальные измерения некруглости в сечениях с известными продольными координатами. Недостатком использования направляющих является невозможность контролировать наличие дефектов на всей боковой поверхности цилиндра и, следовательно, осуществлять оперативный допусковый контроль качества цилиндров.

Задачи данной работы — экспериментально проверить возможности косвенного измерения некруглости цилиндров по динамике изменения скорости поступательного движения и рассмотреть возможности применения для этого методов лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА); найти математические выражения, позволяющие произвести пересчёт изменений горизонтальной компоненты скорости элемента боковой поверхности цилиндра в вариации вертикального положения ЦМ цилиндра; сравнить результаты измерения некруглости методом ЛДА с результатами, полученными при измерении диаметра цилиндра микрометром; оценить меру допусковых значений при измерении непрямолинейности

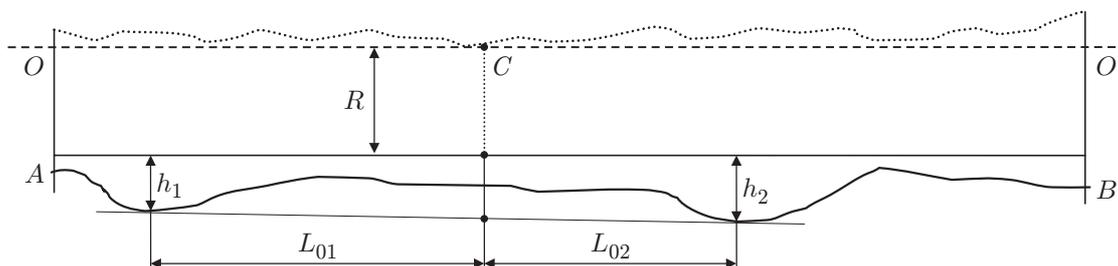


Рис. 2. Пространственная конфигурация элементов некруглого цилиндра

образующих цилиндра и погрешность измерения некруглости направляющей цилиндра.

Допусковые оценки непрямолинейности образующей цилиндра, лежащего на ровной поверхности. При качении цилиндра по гладкой поверхности (рис. 2) положение его центра тяжести в каждый момент времени определяется пространственным положением двух точек касания, которые располагаются вблизи плоскости меридионального сечения цилиндра. Остальные точки, лежащие в этой плоскости со стороны точек касания, расположены ближе к оси цилиндра, чем проекция оси цилиндра на плоскость. Точки касания располагаются по разные стороны от нормального сечения цилиндра, включающего ЦМ. В противном случае происходит опрокидывание цилиндра и его точки касания с поверхностью меняют своё положение. Таким образом, точка касания с опорой, максимально удалённая от оси цилиндра, может не являться максимально удалённым элементом поверхности. При некруглости катящегося цилиндра происходит как смещение ЦМ цилиндра вдоль направления силы тяжести, так и поворот оси цилиндра вокруг ЦМ в меридиональной плоскости. Поворот оси цилиндра в процессе поступательно-вращательного движения указывает на то, что образующая цилиндра не является прямой линией, параллельной остальным образующим. Смещение ЦМ может указывать как на непрямолинейность образующей, так и на некруглость направляющей цилиндра. Если при качении цилиндра по ровной поверхности не происходит поворота его оси вокруг ЦМ, то измеренные изменения вертикального положения однозначно определяют некруглость нормальной направляющей цилиндра. Поворот цилиндра в процессе движения вокруг ЦМ с одновременным смещением его по вертикали происходит при непрямолинейности образующей цилиндра. Поскольку неизвестно продольное положение точек контакта цилиндра с поверхностью, то возможны лишь допусковые оценки максимальной высоты неровностей ($h_{\text{доп}}$). Так как $0 \leq h_{\text{min}} \leq h_{\text{max}}$, а точка контакта с h_{max} может находиться на расстоянии, равном половине длины цилиндра от точки контакта с h_{min} , то при $h_{\text{min}} = 0$ (точка контакта совпадает с краем цилиндра) $h_{\text{доп}} \leq 2h_{\text{max}}$. Здесь h_{max} и h_{min} — максимальная и минимальная высоты неровностей в точках контакта с опорой. Если h_1 и h_2 — отклонения элементов поверхности от заданного радиуса R , а L_{01} и L_{02} — расстояния от точек касания до плоскости нормального сечения цилиндра, проходящей через ЦМ, то его результирующее смещение в вертикальном направлении h_{Σ} определяется выражением

$$h_{\Sigma} = \frac{h_1 L_{02}}{L_{01} + L_{02}} + \frac{h_2 L_{01}}{L_{01} + L_{02}}. \quad (1)$$

При $L_{01} = L_{02} = L_0$ формула (1) примет вид

$$h_{\Sigma} = \frac{1}{2}(h_1 + h_2). \quad (2)$$

Если $h_1 = 0$, то $h_{\Sigma} = h_{\text{max}}/2$. Отсюда допусковую оценку некруглости цилиндра для двух известных сечений (при использовании двух параллельных цилиндрических опорных

направляющих, ориентированных ортогонально оси цилиндра) можно записать как

$$h_{\text{доп}} \leq h_{\text{max}} = 2h_{\Sigma}. \quad (3)$$

При использовании плоской опорной поверхности неизвестно продольное положение точек опоры, тогда $h_{\text{доп}}$ также определяется выражением

$$h_{\text{доп}} \leq 2h_{\Sigma}. \quad (4)$$

При $h_1 = h_2 = h_0$ из формулы (2) следует

$$h_{\Sigma} = h_0. \quad (5)$$

Формула (5) может быть использована для определения некруглости в том случае, когда локальные отклонения образующей от прямой линии много меньше некруглости направляющей цилиндра. Тогда это равенство справедливо как для движения цилиндра по направляющим, так и для движения по ровной поверхности.

Полученные оценки некруглости направляющей и непрямолинейности образующей цилиндра могут быть использованы как для допусковых оценок износа роликовых подшипников, так и для допусковых оценок дисперсного состава твёрдых частиц, осаждённых на гладкую опорную поверхность. В общем случае вопрос о вкладе непрямолинейности или непараллельности образующих при измерении некруглости цилиндров должен решаться отдельно. Если велик вклад дефектов образующей цилиндра, то результаты измерения некруглости цилиндра используются для допусковых оценок его качества. В противном случае (когда дефекты образующей незначительны) результаты измерения относятся к некруглости нормальной направляющей цилиндра.

Определение вертикального смещения центра масс движущегося круглого тела по вариациям скорости движения. Смещение ЦМ h_{Σ} , обусловленное некруглостью объектов, может быть вычислено из вариаций доплеровского смещения частоты, пропорционального скорости поступательного и вращательного движений. Энергия катящегося без трения цилиндра представляется в виде

$$W = J\omega^2/2 + mv^2/2 = m(J/2R^2m + 1/2)v^2, \quad (6)$$

где J — момент инерции цилиндра, вращающегося вокруг оси; ω — угловая частота вращения; m — масса цилиндра; v — поступательная скорость движения ЦМ цилиндра. В (6) использовано условие отсутствия проскальзывания цилиндра в процессе качения, при котором $v = \omega R$. При наличии неровностей центр тяжести цилиндра смещается вверх. В таком случае кинетическая энергия цилиндра уменьшается на величину изменения потенциальной энергии mgh_{Σ} , а линейная скорость уменьшается на величину Δv . Тогда

$$m(J/2R^2m + 1/2)v^2 = m(J/2R^2m + 1/2)(v - \Delta v)^2 + mgh_{\Sigma}. \quad (7)$$

Упрощая выражение и обозначая линейные скорости (до смещения центра тяжести $v = v_1$, а после смещения $v - \Delta v = v_2$), получим

$$h_{\Sigma} = (J/2R^2m + 1/2)(v_1^2 - v_2^2)/g. \quad (8)$$

Здесь момент инерции J пропорционален mR^2 . В частности, для сплошного цилиндра

$$J = mR^2/2. \quad (9)$$

Тогда (8) упростится до

$$h_{\Sigma} = 3(v_1^2 - v_2^2)/4g. \quad (10)$$

Из полученного выражения видно, что при известном значении g величина h_{Σ} пропорциональна разности квадратов скоростей на участке локальной некруглости цилиндра ($v_{\max}^2 - v_{\min}^2$). Вариации скорости цилиндра могут быть обусловлены неровностью поверхности либо неровностью направляющих, по которым он катится. Для минимизации ошибки, связанной с влиянием этих факторов, принимаются во внимание локальные изменения, периодически повторяющиеся при движении цилиндра по направляющим. Все случайные непериодические вариации скорости не рассматриваются. После измерения величины периодических вариаций скорости вычисляется некруглость цилиндра. Выполнив измерения при одной или нескольких прокатках цилиндра, находят среднее значение некруглости и погрешность измерения.

Принимая сомножитель в выражении (8), содержащий момент инерции J , равным единице (это будет справедливо и для шаров), оценим порядок значений h_{Σ} в зависимости от v_{\max} . При $v_{\min}^2 \ll v_{\max}^2$ смещение ЦМ

$$h_{\Sigma} \sim v_{\max}^2/g. \quad (11)$$

Для скорости прокатки цилиндра порядка 1 см/с и $g \sim 10$ м/с² значения $h_{\Sigma} \sim 10$ мкм. В частности, для сплошного цилиндра при $v_{\min}^2 \ll v_{\max}^2$ и $v_{\max} = 1$ см/с значение

$$h_{\Sigma} = 3v_{\max}^2/4g = 7,5 \text{ мкм}. \quad (12)$$

Отсюда видно, что метод позволяет выявлять микронные неровности на поверхности сплошных аксиально-симметричных круглых тел.

Описание эксперимента. Схема эксперимента, в котором определялась некруглость сплошного цилиндра, представлена на рис. 3. Диаметр цилиндра составлял 10 мм, а длина — 205 мм. Цилиндр катился по двум направляющим вдоль оптической оси лазерной измерительной системы (лазерный измеритель скорости с опорным пучком [7]). Опорные точки цилиндра располагались на расстоянии 50 мм от краёв. Таким образом, координаты положения участков цилиндра, для которых проводились измерения приведённой некруглости, были определены. Измерялась горизонтальная составляющая вектора скорости элементов боковой поверхности катящегося цилиндра на высоте, меньшей или равной радиусу цилиндра. Сигнал с выхода фотоприёмника подавался на вход АЦП и записывался. Он обрабатывался на компьютере стандартным пакетом программ. Диаграмма распределения спектра энергии сигнала с фотоприёмника в координатах частоты и времени приведена на рис. 4. На рисунке видно, что частота сигнала периодически уменьшается. За время записи ~ 5 с произошло четыре повторения события, связанного с торможением цилиндра. Между крайними участками торможения записано три полных периода вариаций

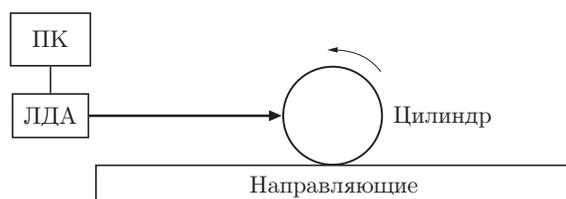


Рис. 3. Схема измерения горизонтальной скорости цилиндра

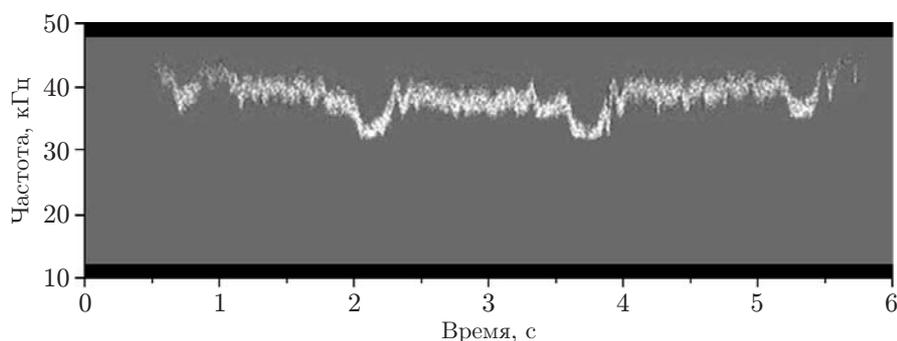


Рис. 4. Диаграмма зависимости частоты доплеровского сигнала от времени при измерении скорости движения цилиндра по двум параллельным направляющим

частоты доплеровского сигнала. В используемом измерительном устройстве коэффициент преобразования частоты в скорость составлял 3,161 кГц/(мм/с). Согласно диаграмме величина измеренной компоненты скорости изменяется в пределах 9–13 мм/с. Эта компонента пропорциональна горизонтальной скорости ЦМ цилиндра. Коэффициент пропорциональности определяется с учётом длины пути за полный оборот цилиндра. Интегрируя скорость за период оборота, определяемого по повторяющемуся локальному минимуму скорости, получаем путь S . Отношение $2\pi R/S$ даёт коэффициент, позволяющий вычислить скорость движения ЦМ цилиндра. В нашем случае коэффициент преобразования равен величине 1,47. Точка измерения горизонтальной компоненты скорости выбрана на высоте $h = (R - 1,6)$ мм от поверхности, по которой катится цилиндр. Это дало возможность снизить частоту доплеровского сигнала и согласовать её с предельной частотой АЦП.

Зависимость осреднённой скорости ЦМ цилиндра от времени показана на рис. 5. Там же приведена кривая тренда, связанная с неровностью цилиндрических направляющих опор. Определяя скорость ЦМ цилиндра и время в точке локального минимума v_{\min} , а также скорость на линии тренда v_{tr} (для того же момента времени), можно найти $h_{\Sigma} = 3(v_{\text{tr}}^2 - v_{\min}^2)/4g$.

Результаты измерения h_{Σ} для четырёх локальных минимумов приведены в табл. 1 ($h_{\Sigma\text{cp}} = 7 \pm 1,2$ мкм). Величина смещения ЦМ цилиндра в вертикальном направлении h_{Σ} , обусловленная неровностью его поверхности, составила 7 мкм с относительной ошибкой $\pm 17\%$.

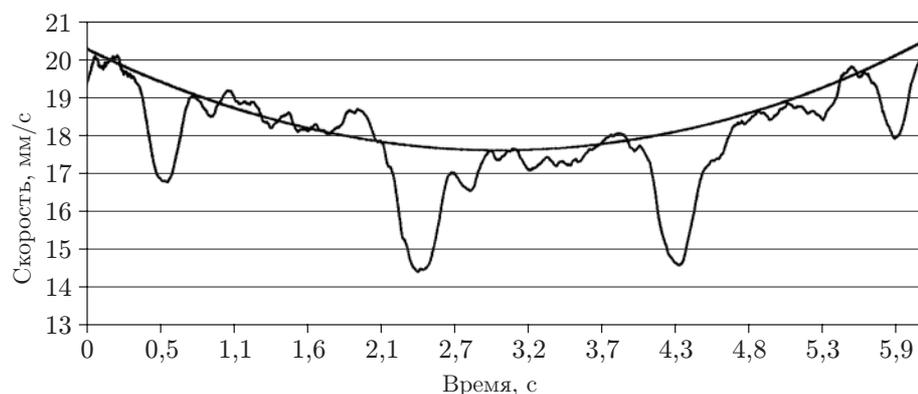


Рис. 5. Диаграмма зависимости скорости ЦМ цилиндра от времени

Таблица 1

Номер локального минимума	$v_{i_{cp}}$, мм/с	$v_{i_{min}}$, мм/с	h_{Σ} , мкм
1	19,00	16,80	6,00
2	17,60	14,45	7,73
3	18,06	14,73	8,36
4	19,92	17,88	5,90

Результаты отклонения диаметра цилиндра от среднего значения при повороте цилиндра вокруг оси представлены в табл. 2. Они получены путём осреднения по нескольким измерениям. Диаграммы изменения диаметра цилиндра в зависимости от угла поворота приведены на рис. 6. Сплошная и пунктирная диаграммы соответствуют двум сечениям цилиндра в точках касания с направляющими, расположенными на расстояниях 50 мм от торцов цилиндра. Измерения проводились стандартным микрометром. Из рисунков видно, что максимальное изменение диаметра цилиндра в зависимости от угла поворота достигает величины ~ 10 мкм. Следует отметить, что такое изменение угла поворота может качественно определять реальную форму цилиндра и его некруглость в редких случаях. В частности, в нашем случае направляющая используемого цилиндра имеет грушевидную форму. Это видно из динамики изменения доплеровской частоты (см. рис. 5). Резкое изменение скорости происходит на небольшом угловом интервале ($\sim 70^\circ$). Поскольку изменения диаметра на разных концах цилиндра имеют одинаковую величину и синхронизованы по фазе при изменении угла ориентации цилиндра, то можно сделать вывод, что некруглость связана с отклонением от круглой формы нормальной направляющей цилиндра. Если это отклонение вдоль радиуса составляет величину ΔR , а угловой размер дефекта

Таблица 2

Угол, град	Отклонение от среднего диаметра, мкм	
	Сечение 1	Сечение 2
0	5,2	4,5
22,5	3,7	3,4
45	-1,8	-0,4
67,5	-4,0	-2,3
90	-5,0	-3,0
112,5	-4,3	-3,7
135	-1,5	-2,0
157,5	0,3	0,7
180	2,3	3,2
202,5	2,8	3,5
225	-0,2	1,4
247,5	-2,8	-2,3
270	-3,5	-4,3
292,5	-1,5	-2,8
315	1,8	-0,1

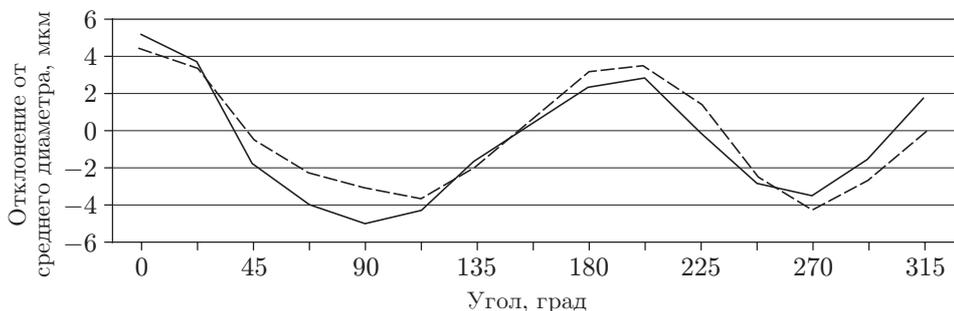


Рис. 6. Отклонение величины диаметра от среднего значения при различных углах ориентации цилиндра

$\Delta\varphi$ и $\Delta\varphi \ll \pi$, то смещение ЦМ в сторону дефекта $\delta \sim (\Delta R \Delta\varphi)/\pi$. При $\Delta\varphi \sim 1$ величина $\delta \sim (\Delta R)/\pi$. Таким образом, для грушевидной формы направляющей цилиндра с $\Delta\varphi \sim 1$ отклонение радиуса в области дефекта $\Delta R - \delta \approx (2/3)\Delta R$. Если цилиндр имеет радиальный размер дефекта $\Delta R \approx 10$ мкм, то, учитывая смещение ЦМ, поверхность цилиндра будет отстоять от него на величину $\sim 0,7\Delta R \approx 7$ мкм. Принимая во внимание, что ошибка измерения вариаций диаметра достигала 2 мкм, можно сделать заключение о хорошем соответствии результатов измерения некруглости, полученных различными методами (по изменению скорости и непосредственным измерением диаметра). Если дефекты направляющей цилиндра имеют меньшие угловые размеры, например $\Delta\varphi < 20^\circ$, то $\delta < 0,1\Delta R$ и смещение ЦМ можно не учитывать.

Возможность применения плоских поверхностей для определения некруглости прокатываемых сплошных цилиндров была проверена на цилиндре роликового подшипника 3ГП 3 (2Н 102605). Цилиндр диаметром 9 мм и высотой 14 мм прокатывался по поверхности интерференционной пластины ПИ-120, имеющей отклонение рабочей поверхности от плоскостности 0,4 интерференционной полосы. Зондирующий световой пучок ЛДА направлялся на боковую поверхность цилиндра. Расстояние зондирующего светового пучка от плоскости качения составляло 4,5 мм. Ось цилиндра ориентировалась ортогонально направлению зондирующего светового пучка. Электрический сигнал с выхода ЛДА обрабатывался на ПК. Сонограмма сигнала представлена на рис. 7. Видны резкие изменения скорости, связанные с влиянием частиц пыли, прилипших к боковой поверхности цилиндра.

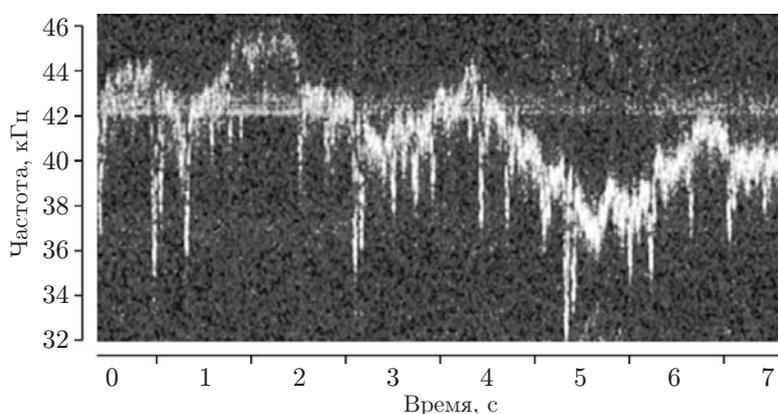


Рис. 7. Сонограмма доплеровского сигнала при качении ролика подшипника по поверхности интерференционной пластины

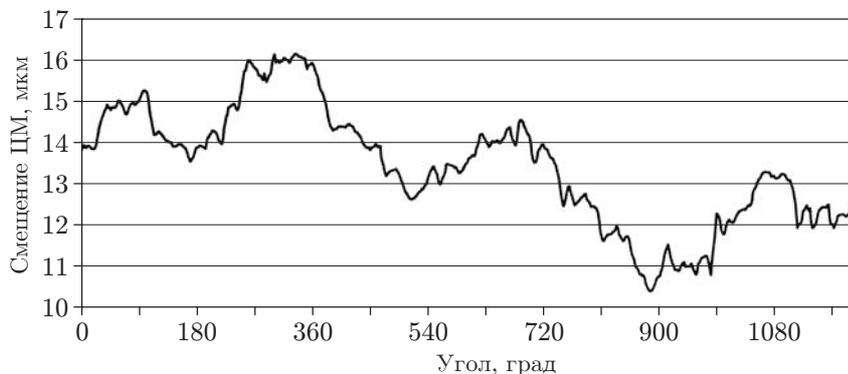


Рис. 8. Зависимость вертикального смещения ЦМ ролика от полярного угла

ра. В момент попадания пылевых частиц в зону контакта образующей цилиндра с поверхностью ПИ-120 происходит резкое уменьшение скорости ЦМ. По величине торможения можно проводить оценки размера пылевых частиц согласно формуле (4). Максимальная величина изменения скорости при резком торможении соответствует изменению частоты от 43 до 35 кГц, что связано с изменением вертикальной координаты ЦМ на ~ 5 мкм. Тогда диаметр пылевых частиц не превышает 10 мкм. Прилипшая частица ничем не отличается от локального дефекта образующей цилиндра. Таким образом, предложенная методика позволяет диагностировать дефекты образующей цилиндра. Измерение диаметра цилиндра микрометром не выявляет его вариаций, зависящих от угла поворота. Все изменения диаметра находятся в пределах погрешности измерения 1 мкм. Это значит, что мы, действительно, имеем дело с пылевыми частицами, которые удаляются при микрометрических измерениях.

Если игнорировать влияние пылевых частиц, то линия тренда сонограммы отслеживает динамику изменения вертикального положения ЦМ цилиндра. Оно периодически изменяется. Длинный период соответствует одному полному обороту цилиндра вокруг оси: $T_0 = 2\pi$. На сонограмме можно заметить более высокочастотную угловую модуляцию с периодом $T = \pi/3$.

Вертикальное смещение ЦМ цилиндра в зависимости от текущего угла поворота показано на рис. 8. Согласно рисунку амплитуда колебаний радиуса, соответствующая амплитуде вертикальных колебаний ЦМ цилиндра, составляет $\sim 1,6$ мкм.

Заключение. В данной работе продемонстрирована принципиальная возможность использования методов лазерной доплеровской анемометрии для высокоточного измерения некруглости (угловых вариаций радиуса) цилиндров. Практически измеренная некруглость по изменению скорости качения в поле силы тяжести совпала с измерениями, выполненными с помощью микрометра. Показано, что без применения сложных приёмов обработки сигналов измеряется некруглость ~ 7 мкм с погрешностью ~ 1 мкм. Возможность измерения некруглости роликов подшипников проверена в эксперименте по прокатке ролика на плоской поверхности. Такой метод позволяет диагностировать некруглости роликов, радиус которых варьируется в пределах $\pm 1,6$ мкм. Пригодность метода для допусковой диагностики дефектов образующей цилиндра доказана на примере влияния пыли на положение центра масс. На основании полученных результатов можно сделать заключение, что предложенный метод позволяет измерять некруглость цилиндров в диапазоне 1–10 мкм с погрешностью ~ 1 мкм и может быть использован для допускового контроля качества цилиндров и шаров при производстве шариковых и роликовых подшипников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев В. А.** Оптические измерения. М.: Высш. шк., 1981. 229 с.
2. **Коронкевич В. П., Ханов В. А.** Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука, 1985. 179 с.
3. **Доброва С. Я., Золотов А. В., Левандовская Н. Е. и др.** Промышленный лазерный измеритель перемещений ФОРУ-1 // Автометрия. 1975. № 5. С. 43–48.
4. **Вертопрахов В. В., Михляев С. В., Чугуй Ю. В., Юношев С. В.** Оптико-цифровая система промышленного контроля // Автометрия. 1983. № 4. С. 53–58.
5. **Арбузов В. А., Дубнищев Ю. Н.** Методы гильберт-оптики в измерительных технологиях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. С. 273.
6. **Волков Е. В., Плотников С. В.** Исследование влияния ширины зондирующего пучка на погрешность измерения триангуляционных систем // Автометрия. 1997. № 2. С. 19–25.
7. **Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс Б. С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. С. 66–68.

Поступила в редакцию 1 ноября 2008 г.
