

УДК 53.082.53 : 531.7 : 681.786

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА И СКОРОСТИ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ КАТЯЩЕГОСЯ КОЛЕСА ЛАЗЕРНЫМ ДОПЛЕРОВСКИМ АНЕМОМЕТРОМ

О. П. Белоусова¹, П. Я. Белоусов^{1,2}

¹ Учреждение Российской академии наук
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения РАН,

630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41

² 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

Теоретически и экспериментально обосновывается применение методов лазерной доплеровской анемометрии для определения радиуса и скорости проскальзывания катящихся колёс. Показано, что эти методы позволяют проводить измерения радиуса колеса с относительной погрешностью 0,05–0,02 % при угле поворота колеса 0,6–4,0°. Скорость проскальзывания при этом может быть вычислена с погрешностью 20 %. Найдена скорость проскальзывания железнодорожного колеса при скорости движения 60 мм/с.

Ключевые слова: проскальзывание, катящееся колесо, лазерный доплеровский анемометр.

Введение. Развитие железнодорожного транспорта сопровождается увеличением скорости движения поездов. В процессе эксплуатации транспорта обод колеса подвержен износу. Его степень зависит от скорости проскальзывания, определяющейся как скоростью обода колеса и значением коэффициента трения, так и формой обода, которая перестаёт быть круглой. Оперативное установление радиуса и формы обода колеса, а также скорости его проскальзывания является актуальной задачей, так как позволяет своевременно выявлять брак колёс, износ пути, что может предотвратить аварии на железнодорожном транспорте и обеспечить комфорт пассажирам.

Попытки автоматически измерить радиус железнодорожных колёс предпринимались ранее. В [1] представлен лазерный доплеровский анемометр (ЛДА) для измерения радиуса заготовок железнодорожных колёс при неподвижной оси колеса. В [2] дано описание триангуляционного устройства, позволяющего измерять геометрические размеры обода и гребня колёс движущегося вагона. Зная параметры обода нового колеса и текущие их значения, можно определить радиус колеса. С помощью этого устройства находятся параметры обода колеса в двух точках, но не устанавливается его форма (некруглость) и не выявляется брак. В [3] описано устройство для расчёта геометрических параметров движущегося колеса с применением видеокамеры. Указанные методы не позволяют измерить проскальзывание колёс, которое может оказаться аномально большим вследствие наличия «ползунов» и «наваров» на ободе колеса и привести к преждевременному его износу либо к аварии.

Целью данной работы является создание ЛДА для косвенного измерения радиуса движущегося колеса и скорости его проскальзывания, а также оценка погрешности измерения этих параметров [4].

Метод измерения радиуса катящегося колеса и скорости проскальзывания.

При качении колеса по направляющей поверхности его ось движется с продольной линейной скоростью \mathbf{V} . Эта скорость равна скорости объекта, на котором смонтировано колесо. Линейная скорость объекта может быть измерена с высокой точностью, например, времяпролётным способом или с помощью ЛДА. Если известна угловая скорость вращения колеса ω , то, измеряя горизонтальную проекцию скорости катящегося колеса \mathbf{V}_{hx} на обод в точке, расположенной на высоте h , можно определить радиус колеса R и скорость его проскальзывания $V_{\text{пр}}$. Это следует из очевидных соотношений

$$\begin{cases} R\omega = V - V_{\text{пр}}, \\ h\omega = V_{hx} - V_{\text{пр}}. \end{cases}$$

Изменение угловой скорости вращения колеса при постоянной скорости движения объекта связано с непостоянством радиуса колеса и его проскальзыванием.

Если известна линейная скорость объекта, на котором смонтировано колесо, и нет проскальзывания ($V_{\text{пр}} = 0$), то угловая скорость колеса и его радиус легко могут быть вычислены из вышеуказанных уравнений. Для этого достаточно измерить горизонтальную проекцию скорости \mathbf{V}_{hx} элемента обода вращающегося колеса, расположенного на известной высоте h от опорной точки обода. В общем случае скорость проскальзывания, радиус колеса и угловая скорость неизвестны. Тогда определения скорости объекта и скорости в одной точке на ободу колеса становится недостаточно.

Рассмотрим способы косвенного измерения текущего радиуса катящегося колеса и скорости проскальзывания более подробно (рис. 1). Ось колеса O движется с линейной скоростью \mathbf{V} ; \mathbf{R} — текущий радиус колеса; h — вертикальная координата точки обода колеса, где проводятся измерения; \mathbf{l} — вектор, направленный из точки C в точку A и совпадающий с хордой l ; φ — угол между хордой CA и опорной плоскостью; \mathbf{V}_h — вектор линейной скорости точки A при движении колеса; \mathbf{V}_{hx} — проекция линейной скорости, направленная вдоль \mathbf{V} .

Будем считать колесо бесконечно тонким. В этом случае все точки лежат в одной плоскости, совпадающей с плоскостью колеса. Тогда $\boldsymbol{\omega} \perp \mathbf{R}$. Если колесо катится без проскальзывания, то угловая скорость его вращения определяется выражением

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{\mathbf{R} \times \mathbf{V}}{R^2},$$

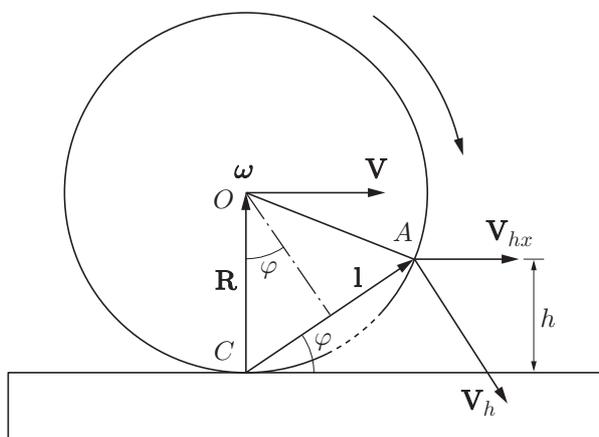


Рис. 1. Схема движения элементов обода катящегося колеса

а модуль угловой скорости ω находится из отношения V/R . Вектор линейной скорости \mathbf{V}_h можно записать в виде

$$\mathbf{V}_h = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{l}. \quad (1)$$

Поскольку $\boldsymbol{\omega} \perp \mathbf{l}$, то $V_h = Vl/R$. Горизонтальная компонента вектора скорости \mathbf{V}_{hx} может быть вычислена по формуле

$$V_{hx}(h) = V_h \sin \varphi = \frac{lV}{R} \sin \varphi. \quad (2)$$

Величину l выразим приближённо через R :

$$l \approx 2R \sin \varphi. \quad (3)$$

Величины l и h связаны соотношением

$$h = l \sin \varphi, \quad (4)$$

отсюда

$$V_{hx}(h) = \frac{Vh}{R}. \quad (5)$$

Если измерить V_{hx} , то (при отсутствии проскальзывания и при известных значениях h и V) можно найти значение R из формулы (5)

$$R = \frac{Vh}{V_{hx}(h)}. \quad (6)$$

Допустим, что проскальзыванием колеса пренебрегать нельзя. Тогда с учётом скорости проскальзывания ($V_{\text{пр}} \neq 0$)

$$\omega = (V - V_{\text{пр}})/R. \quad (7)$$

Горизонтальную компоненту вектора скорости на ободу колеса на высоте h от поверхности качения зададим в виде

$$V_{hx}(h) = \omega h + V_{\text{пр}} = \frac{(V - V_{\text{пр}})h}{R} + V_{\text{пр}} = \frac{Vh}{R} + V_{\text{пр}} \left(1 - \frac{h}{R}\right). \quad (8)$$

Отсюда видно, что, измеряя $V_{hx}(h)$, невозможно вычислить текущее значение R , поскольку мы не знаем $V_{\text{пр}}$. В таком случае определим $V_{hx}(h)$ для двух значений h (h_1 и h_2) одновременно, используя два отдельных измерительных устройства, и запишем систему уравнений

$$\begin{cases} V_{hx}(h_1) = \frac{Vh_1}{R} + V_{\text{пр}} \left(1 - \frac{h_1}{R}\right), \\ V_{hx}(h_2) = \frac{Vh_2}{R} + V_{\text{пр}} \left(1 - \frac{h_2}{R}\right). \end{cases} \quad (9)$$

Решая эту систему относительно $V_{\text{пр}}$ и R , будем иметь

$$R = \frac{V(h_2 - h_1) + V_2 h_1 - V_1 h_2}{V_2 - V_1} = \frac{V \Delta h + V_2 h_1 - V_1 h_2}{\Delta V}, \quad (10)$$

$$V_{\text{пр}} = \frac{V_1 h_2 - V_2 h_1}{\Delta h}. \quad (11)$$

Здесь $V_1 = V_{hx}(h_1)$; $V_2 = V_{hx}(h_2)$; $\Delta h = h_2 - h_1$; $\Delta V = V_2 - V_1$.

При $V_{\text{пр}} = 0$ выражение (10) упрощается до

$$R = \frac{V \Delta h}{\Delta V}. \quad (12)$$

Таким образом, получив результаты измерения V_1 и V_2 в двух точках на высоте h_1 и h_2 , найдём текущие значения R и $V_{\text{пр}}$ в точке C .

Выражение для вычисления скорости проскальзывания (11) не позволяет оценить погрешность измерения, поскольку определяет лишь одно значение косвенно полученной величины. В таком случае при нахождении погрешности измеренное среднее значение радиуса ($R_{\text{ср}}$) может быть подставлено в уравнения (8) и (9). Тогда

$$\begin{cases} V_1 = \frac{V h_1}{R_{\text{ср}}} + V_{\text{пр}1} \left(1 - \frac{h_1}{R_{\text{ср}}}\right), \\ V_2 = \frac{V h_2}{R_{\text{ср}}} + V_{\text{пр}2} \left(1 - \frac{h_2}{R_{\text{ср}}}\right). \end{cases} \quad (13)$$

Скорость проскальзывания, вычисленная из этих уравнений, даёт возможность оценить погрешность путём сравнения $V_{\text{пр}1}$ и $V_{\text{пр}2}$. Средняя скорость в каждый момент времени получается усреднением результатов двух измерений:

$$V_{\text{пр.ср}} = \frac{1}{2}(V_{\text{пр}1} + V_{\text{пр}2}). \quad (14)$$

Относительная погрешность измерения $V_{\text{пр}}$ оценивается как

$$\frac{\Delta V_{\text{пр}}}{V_{\text{пр}}} = \frac{V_{\text{пр}2} - V_{\text{пр}1}}{V_{\text{пр}2} + V_{\text{пр}1}}. \quad (15)$$

Описание эксперимента. Схема измерения угловой скорости вращения колеса, скорости проскальзывания и радиуса колеса при известной скорости движения оси колеса V приведена на рис. 2, a, b . Скорость V измеряется отдельным каналом, где зондирующий лазерный световой пучок направляется на светорассеивающую поверхность, жёстко связанную с осью колеса либо с движущимся объектом, на котором смонтировано колесо. Электрический сигнал, частота которого пропорциональна линейной скорости объекта, подаётся в измерительный блок системы обработки сигналов. Такая организация схемы позволяет измерять радиус колеса и скорость проскальзывания при переменной скорости оси колеса. Для определения компоненты скорости шероховатой поверхности Z вдоль оси зондирующего лазерного пучка применялся ЛДА с опорным пучком [4].

В эксперименте использовано колесо, диаметр которого составлял $199,95 \pm 0,12$ мм. Оно было свободно насажено на ось, совершавшую поступательное движение во время поступательно-вращательного движения колеса. Скорость оси находилась путём измерения скорости светорассеивающего объекта, жёстко связанного с осью колеса и скользящего по опорной поверхности. Таким образом, в устройстве использовались три канала, осуществляющие измерение скорости в двух точках на ободу колеса и в точке на светорассеивающей поверхности, жёстко связанной с осью колеса. Точки на ободу колеса располагались на высоте $h_1 = 75$ мм и $h_2 = 80,5$ мм от опорной поверхности качения. Расстояние

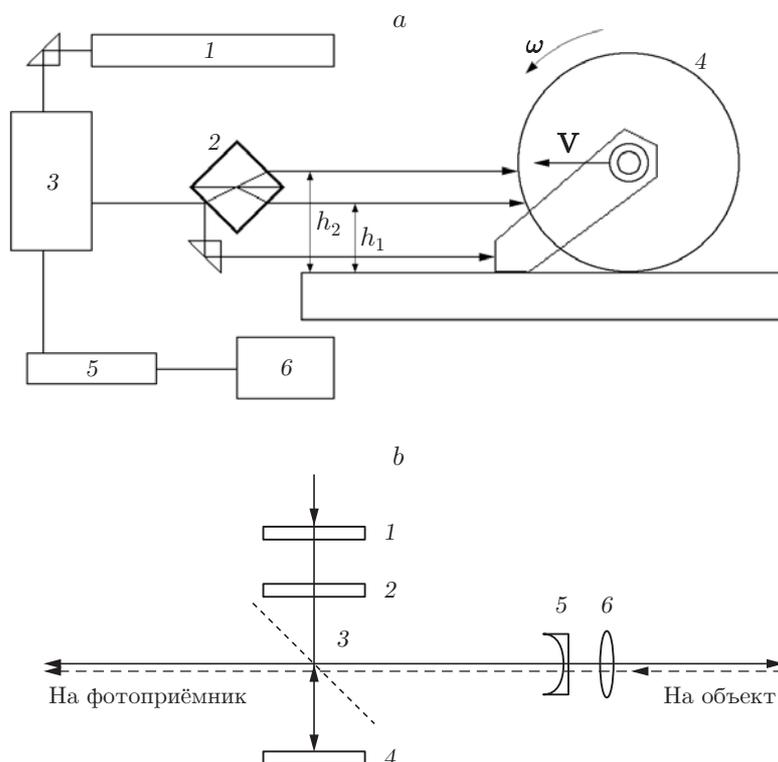


Рис. 2. Измерительное устройство: *a* — схема измерителя радиуса и скорости прокатывающегося колеса (1 — лазер, 2 — блок расщепления, 3 — интерферометр, 4 — катящееся колесо, 5 — фотоприёмник, 6 — блок обработки сигнала с фотоэлектронного умножителя); *b* — схема двухлучевого интерферометра (1 — поляризационный фильтр, 2 — фазовая пластинка ($\lambda/4$), 3 — полупрозрачное зеркало, 4 — плотное зеркало, 5, 6 — линзы формирователя зондирующего пучка)

между точками составляло $\Delta h = 5,5$ мм. Колесо прокатывалось на расстоянии 2 м от измерительного устройства.

Сигнал с фотоприёмника, содержащий информацию о V , V_1 и V_2 , поступал на вход 8-разрядного АЦП с частотой дискретизации 96 кГц и записывался в полосе частот 48 кГц. При измерении частоты доплеровского сигнала использовались анализатор спектра и регистратор быстропротекающих процессов на базе ультрабыстродействующей платы сбора данных (ЛА-БПн2-8РС1) производства ЗАО «Руднев—Шиляев» (Москва).

Графическая оболочка программы для управления устройствами аналого-цифрового ввода—вывода ISVI (ОАО «Инструментальные системы», Москва) позволяла проводить диагностику временной динамики максимума спектрального распределения доплеровского сигнала в заранее заданной полосе частот и формировать таблицы данных. Относительная систематическая погрешность ($\delta_{\text{сист}}$) определения максимума спектрального распределения для синусоидального сигнала постоянной амплитуды длительностью 10 с составляла менее $1,7 \cdot 10^{-5}$, а случайная ($\delta_{\text{сл}}$) — менее $3 \cdot 10^{-7}$. Записанный сигнал анализировался по частоте, и мгновенные значения частот (за длительность выборки 2,7 мс) представлялись в виде трёх таблиц данных, различающихся по частоте (максимальной, промежуточной и минимальной). Минимальную частоту имел сигнал, полученный из точки обода, находящейся на высоте 75 мм от опорной поверхности качения, промежуточную — сигнал из точки на высоте 80,5 мм. Максимальная частота определялась скоростью центра масс катящегося цилиндра, расположенного на высоте 100 мм от опорной поверхности. Значе-

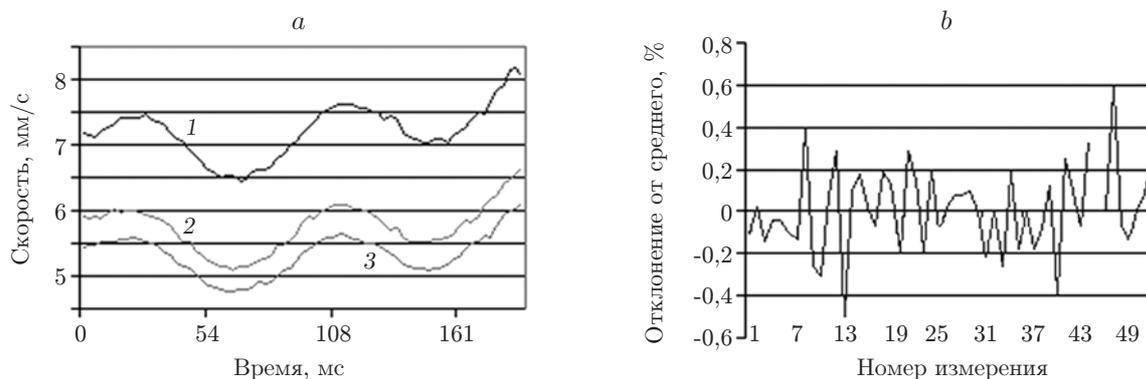


Рис. 3. Диаграммы изменения скорости и погрешности измерения: *a* — зависимость скорости колеса от времени (кривая 1 — скорость осевых точек колеса, кривые 2, 3 — скорости на ободе колеса); *b* — зависимость относительной погрешности измерения скорости от номера измерения

ния частот сигналов пересчитывались в значения скорости, локальные значения радиусов колеса и скорости проскальзывания.

На рис. 3, *a* приведена диаграмма, отражающая динамику изменения скорости в двух точках, расположенных на ободе колеса на разных высотах (h_1 — кривая 3 и h_2 — кривая 2), и в точке на рассеивающем свет объекте, жёстко связанной с осью колеса (кривая 1). Видно, что скорость в точках измерения не постоянна. Относительные изменения скоростей превышают 30 %. Столь значительные изменения могут быть связаны с низкочастотной (приблизительно 10 Гц) вибрацией колеса в процессе качения. На рис. 3, *b* приведена диаграмма изменения относительной погрешности измерения скорости на ободе колеса в точке, расположенной на высоте $h_1 = 75$ мм. Диаграмма получена путём вычитания среднего значения скорости по двум измерениям из текущего значения скорости. Относительное стандартное отклонение, вычисленное из данных этой диаграммы, равно $\sigma_{V1} = 0,2$ % (кривая 3), а кривых 1, 2 (см. рис. 3, *a*) составляет $\sigma_{V2} = 0,3$ % и $\sigma_V = 0,32$ %. Эти результаты согласуются, как будет показано далее, с относительной погрешностью измерения радиуса колеса ($\sigma_R = 0,35$ %). Оценки погрешностей для V , V_1 и V_2 показывают их зависимость от положения точки на ободе колеса, в которой проводится измерение (от величины h для выбранного радиуса колеса). В предложенной схеме, если не учитывать проскальзывание, результат измерения радиуса также будет зависеть от точки на ободе колеса, в которой оно проводится. Кроме того, возможен комплексный расчёт радиуса, куда входит разность высот положения зондирующих пучков на ободе колеса Δh . Эти три результата будут различаться как мгновенными и средними значениями радиуса, так и дисперсией. Учёт проскальзывания даёт возможность более точно вычислить радиус колеса, а также определить скорость проскальзывания. Если известен радиус колеса, а он известен с хорошей точностью после учёта проскальзывания, то результаты измерения скоростей V , V_1 и V_2 могут быть использованы для более точного определения скорости проскальзывания. Локальные (полученные в разных точках обода) и усреднённые по двум измерениям скорости проскальзывания могут быть применены для уточнённого расчёта радиуса и дисперсии радиуса. Таким образом, получится ещё пять значений радиусов колеса со своими стандартными отклонениями отдельных измерений. Насколько эффективны схемы определения радиуса колеса и стандартных отклонений при учёте проскальзывания и без его учёта, можно судить по данным таблицы.

В таблице приведены расчётные значения радиуса колеса для серий измерений с различной длительностью и погрешности измерений, обозначенные как σ — среднеквадра-

Число измерений	$R_{6п1}$, мм	$R_{6п2}$, мм	$R_{6п3}$, мм	$R_{ср4}$, мм	$R_{ср5}$, мм	$R_{ср6}$, мм	$R_{ср7}$, мм
51	94,42 $\sigma = 7,87$ $\sigma_{ср} = 1,10$ $\delta_0 = -5,56$	102,01 $\sigma = 1,23$ $\sigma_{ср} = 0,17$ $\delta_0 = 2,04$	101,40 $\sigma = 1,36$ $\sigma_{ср} = 0,19$ $\delta_0 = 1,43$	99,95 $\sigma = 2,20$ $\sigma_{ср} = 0,31$ $\delta_0 = -0,025$	99,93 $\sigma = 0,69$ $\sigma_{ср} = 0,10$ $\delta_0 = -0,045$	100,06 $\sigma = 0,48$ $\sigma_{ср} = 0,07$ $\delta_0 = 0,08$	99,96 $\sigma = 0,35$ $\sigma_{ср} = 0,05$ $\delta_0 = -0,015$
130	95,72 $\sigma = 8,21$ $\sigma_{ср} = 0,72$ $\delta_0 = -4,26$	101,07 $\sigma = 1,77$ $\sigma_{ср} = 0,16$ $\delta_0 = 1,1$	101,55 $\sigma = 1,71$ $\sigma_{ср} = 0,15$ $\delta_0 = 1,58$	100,07 $\sigma = 2,60$ $\sigma_{ср} = 0,23$ $\delta_0 = 0,095$	99,93 $\sigma = 0,72$ $\sigma_{ср} = 0,06$ $\delta_0 = -0,045$	100,06 $\sigma = 0,50$ $\sigma_{ср} = 0,04$ $\delta_0 = 0,08$	99,96 $\sigma = 0,36$ $\sigma_{ср} = 0,03$ $\delta_0 = -0,015$
350	95,20 $\sigma = 8,30$ $\sigma_{ср} = 0,44$ $\delta_0 = -4,78$	101,22 $\sigma = 1,39$ $\sigma_{ср} = 0,07$ $\delta_0 = 1,25$	101,76 $\sigma = 1,43$ $\sigma_{ср} = 0,08$ $\delta_0 = 1,79$	100,03 $\sigma = 2,30$ $\sigma_{ср} = 0,12$ $\delta_0 = 0,055$	99,95 $\sigma = 0,63$ $\sigma_{ср} = 0,034$ $\delta_0 = -0,025$	100,05 $\sigma = 0,44$ $\sigma_{ср} = 0,024$ $\delta_0 = 0,075$	99,97 $\sigma = 0,32$ $\sigma_{ср} = 0,017$ $\delta_0 = -0,005$

тичная погрешность отдельного измерения (стандартное отклонение) R : $\sigma = \sqrt{D(R)}$, $\sigma_{ср}$ — среднеквадратичная погрешность среднего арифметического $R_{ср}$ для серии из n измерений (стандартное отклонение среднего значения радиуса):

$$\sigma_{ср} = \sqrt{D\left(\sum_{i=1}^n R_i/n\right)}$$

и $\delta_0 = R_{ср} - R_{шт}$. Здесь D — дисперсия измеряемой величины, а $R_{шт}$ — среднее значение радиуса колеса, измеренное штангенциркулем.

Измерения проводились с интервалом времени 2,7 мс, поэтому длительность серии из 51 измерения составила ≈ 140 мс. При средней скорости поступательного движения оси колеса 7,2 мм/с перемещение колеса составило ≈ 1 мм.

В первой колонке таблицы представлено число измерений, по которым проводилось усреднение. В колонках для радиусов R_1 — R_7 приведены значения вычисленных средних радиусов колеса без учёта и с учётом проскальзывания. При нахождении средних величин брались 51, 130 и 350 измерений. Радиус $R_{6п1}$ вычислен по формуле (12), а $R_{6п2}$ и $R_{6п3}$ — по формуле (9) при $V_{пр} = 0$. Видно, что без учёта проскальзывания колеса систематическая ошибка косвенного измерения радиуса может достигать $[(\delta_0 + 0,06)/R_{шт}] \cdot 100\% = 5,56\%$. Радиус $R_{ср4}$ определён с учётом проскальзывания по формуле (10). Согласно таблице $R_{ср4}$ отклоняется от значения радиуса, измеренного штангенциркулем, на величину, меньшую 0,1 мм ($\delta_0 < 0,1$ мм). В процентном отношении $(\delta_0/R_{шт}) \cdot 100\% < 0,1\%$. Стандартное отклонение $R_{ср4}$ в 3 раза меньше стандартного отклонения $R_{6п1}$ и почти в 2 раза больше стандартного отклонения $R_{6п2}$. Можно сделать вывод, что учёт проскальзывания позволяет радикально уменьшить систематическую ошибку измерения радиуса. Отклонение измеренного среднего значения радиуса от $R_{шт}$ уменьшается более чем в 10 раз (от 11,6 до 222 раз). Случайная же ошибка не только не уменьшилась, но и увеличилась почти в 2 раза. Это объясняется большой погрешностью определения скорости проскальзывания, которую можно уменьшить, если в одно из уравнений формулы (9) вместо R подставить $R_{ср4}$. При этом количество случайных величин уменьшится. Решив систему уравнений относительно R и $V_{пр}$, есть возможность получить уточнённое значение радиуса с меньшей дисперсией. Таких радиусов два. В таблице они обозначены как $R_{ср5}$ и $R_{ср6}$.

Данные радиусы вычислены по формуле (8) с учётом того, что для каждого измерения применено $V_{\text{пр}}$, полученное из уравнений (13). Стандартное отклонение σ результатов измерения от средних значений в этом случае в 2–3 раза меньше отклонения для $R_{\text{бп2}}$ и $R_{\text{бп3}}$ и более чем в 5 раз меньше отклонения для $R_{\text{ср4}}$. Величины δ_0 для $R_{\text{ср5}}$ и $R_{\text{ср6}}$ (систематические погрешности) остались столь же малыми ($\delta_0 < 0,1$ мм), как и для $R_{\text{ср4}}$. Как видим, прогноз оправдался. Учёт скорости проскальзывания с уменьшением числа случайных величин при вычислении $V_{\text{пр}}$ привёл к значительному (в 2–3 раза) снижению случайной ошибки измерения радиуса колеса (на фоне десятикратного снижения систематической погрешности) вследствие того, что дисперсия $V_{\text{пр}}$ играет здесь определяющую роль. Если заменить в системе линейных уравнений (9) случайную величину $V_{\text{пр}}$ средней величиной $V_{\text{пр.ср}}$, то случайная погрешность измерения радиуса будет определяться только вариациями скорости и $V_{\text{пр.ср}}$, которые значительно меньше вариаций $V_{\text{пр}}$. Таким образом, есть возможность уменьшить случайную погрешность измерения радиуса. Решая уравнения (9), получим два значения радиусов R_7 и R_8 . Среднее значение одного из них ($R_{\text{ср7}}$), имеющего меньшее σ (по сравнению с R_8), внесено в таблицу.

Радиус $R_{\text{ср7}}$ вычислен по формуле (8) с использованием средней скорости проскальзывания, определяемой формулой (14). При этом σ значительно уменьшилась (до значений 0,35, 0,36 и 0,32 мм для $n = 51, 130$ и 350). Соответствующие случайные погрешности средних значений $\sigma_{\text{ср}}$ уменьшились до 0,05, 0,03 и 0,017 мм. Систематические отклонения $R_{\text{ср7}}$ от значений, измеренных штангенциркулем, также существенно уменьшились. Результаты, представленные в таблице, позволяют сделать заключение: чем точнее измерена скорость проскальзывания и учтена при расчёте текущего радиуса, тем меньше систематические и случайные погрешности измерения радиуса. Шестикратное измерение диаметра колеса штангенциркулем с учётом его погрешности 0,1 мм даёт величину $2R_{\text{ср}} = 199,95 \pm 0,12$ мм. Систематическая погрешность $R_{\text{ср7}}$ за 51 измерение с учётом погрешности штангенциркуля составила $\Delta_{\text{сист.}} = 99,96 \pm 0,05 - 99,975 \pm 0,06 = -0,015 \pm 0,11$.

Анализируя данные таблицы, мы видим, что учёт влияния проскальзывания при расчёте радиуса колеса по формулам (10)–(13) даёт возможность с высокой точностью определить текущий радиус обода движущегося колеса. За время, соответствующее 51 измерению, произведено измерение радиуса на $1/628$ доле длины обода колеса. Таким образом, открывается возможность проводить точные измерения среднего радиуса вращающегося колеса с шагом $0,6^\circ$ и получать зависимость радиуса от угла. Погрешность измерения среднего радиуса в нашем случае составляет 0,05 мм. Для её уменьшения может быть увеличено время усреднения. Это возможно, если вариации радиуса колеса малы на рассматриваемом участке обода. Из таблицы видно, что увеличение количества измерений не приводит к существенному изменению величины стандартного отклонения σ . Стандартные отклонения средних значений радиуса $\sigma_{\text{ср}}$ уменьшаются с увеличением количества усредняемых данных как \sqrt{n} . Результаты подтверждают тот факт, что, используя итеративный метод нахождения радиуса колеса и скорости проскальзывания, можно уменьшить погрешность их определения. На первом этапе радиус колеса и скорость проскальзывания вычисляются из системы уравнений (9). После этого радиус колеса можно считать постоянной величиной. Тогда уравнения (9) переходят в (13), которые используются для более точного определения скорости проскальзывания и оценки погрешности её измерения. На втором этапе уточнённое значение скорости проскальзывания для каждого измерения подставляется в уравнение (8). Погрешность вычисления радиуса при этом уменьшается, что позволяет сократить время осреднения результатов измерения и получить более детальную диаграмму изменения радиуса колеса в зависимости от угла поворота. Это отражено в последних трёх колонках таблицы. Представленные результаты показывают, что за полный оборот колеса может быть произведено 90 измерений с относительной погрешностью 0,017 % при использовании формул (9) и (14). Здесь могут быть обнаружены зависящие

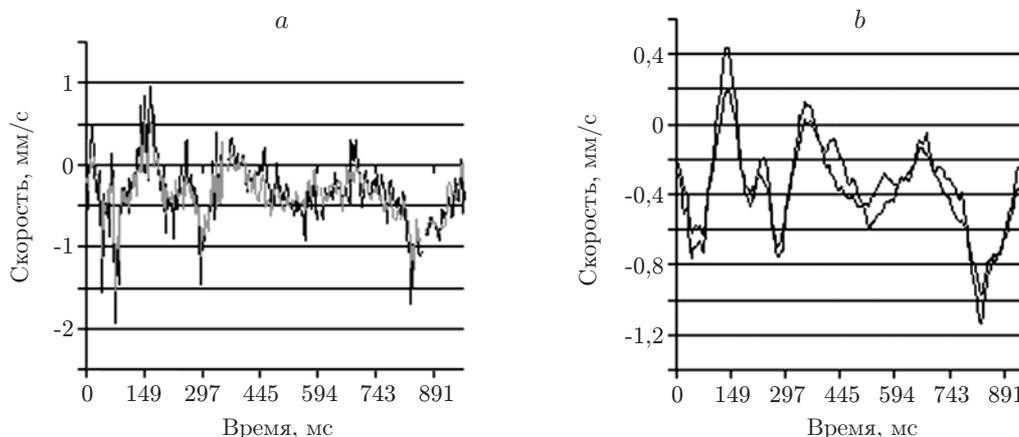


Рис. 4. Зависимость скорости проскальзывания от времени. Кривые соответствуют измерениям, выполненным в двух точках обода, расположенных на высоте $h_1 = 75,0$ мм и $h_2 = 80,5$ мм: a — результаты измерения за 2,7 мс, b — осреднение по 16 измерениям

от угла отклонения измеренных значений R , составляющие тысячные доли от радиуса колеса.

На рис. 4, a, b приведены диаграммы зависимости скорости проскальзывания от времени, вычисленные по формулам (13). На рис. 4, b диаграммы усреднены по 16 измерениям. Средняя скорость проскальзывания составляет величину порядка $-0,45$ мм/с.

Отклонение скорости проскальзывания от среднего значения, вычисленного по диаграммам рис. 4, приведено на рис. 5. Видно, что ошибка измерения может достигать $0,12$ мм/с и это составляет 25 % от средней скорости проскальзывания. Эта скорость знакопеременная, что связано с процедурой подталкивания катящегося колеса во избежание остановки. Большая погрешность при измерении скорости проскальзывания связана с малой величиной этой скорости (≈ 6 % от средней скорости оси колеса). Полученные результаты показывают, что есть хорошие перспективы использования приведённого здесь метода для контроля проскальзывания железнодорожных колёс, что было проверено на колёсной паре с диаметром колеса 870 мм. Для этого проведено измерение горизонтальной проекции скорости на обод катящегося колеса. Скорость измерялась одновременно в трёх точках, расположенных на высоте 45, 54,5 и 60 мм от опорной поверхности. Измеритель-

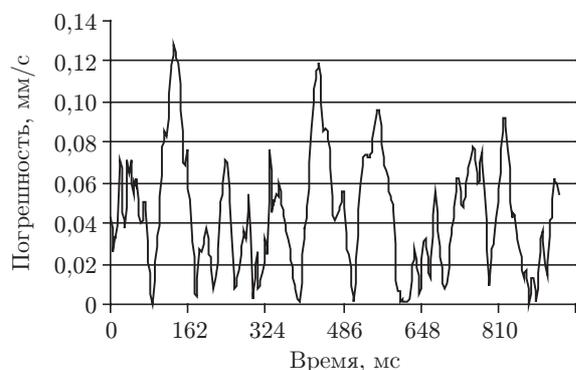


Рис. 5. Диаграмма погрешности измерения скорости проскальзывания

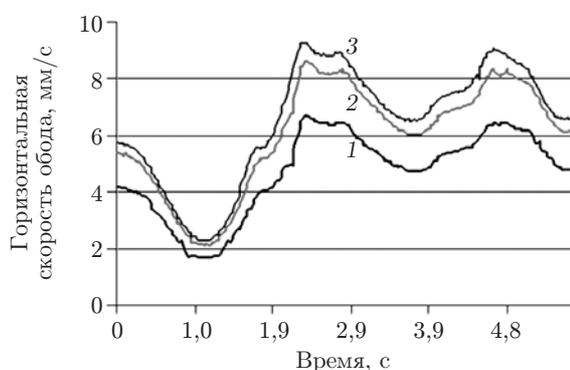


Рис. 6. Горизонтальная скорость обода железнодорожного колеса, измеренная на высоте 45 (кривая 1), 54,5 (2) и 60 мм (3)

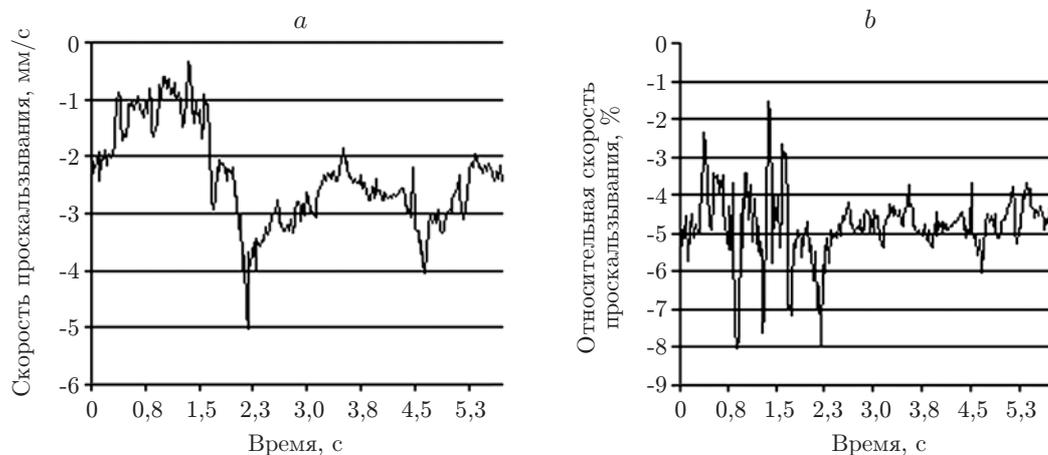


Рис. 7. Зависимость скорости проскальзывания от времени: абсолютная (а), относительная (b)

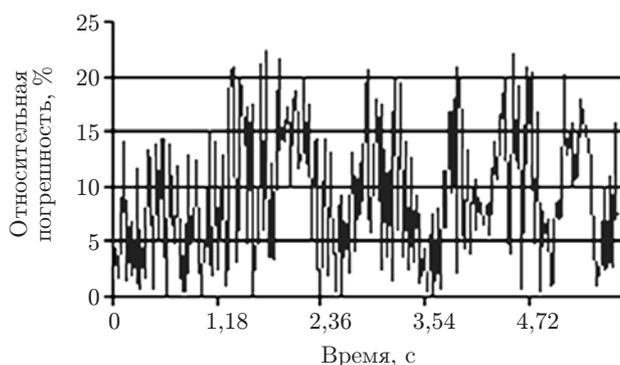


Рис. 8. Зависимость относительной погрешности измерения скорости проскальзывания $(\Delta V_{\text{пр}}/V_{\text{пр}}) \cdot 100\%$ от времени

ное устройство располагалось на расстоянии 2 м от колёсной пары. Результат измерения скорости обода железнодорожного колеса представлен на рис. 6. Диаграмма её изменения в зависимости от времени приведена на рис. 7, а, b. Отмечаем, что проскальзывание не меняет знак и достигает $-3 \dots -4$ мм/с. При этом скорость оси колеса составляет ≈ 60 мм/с, а среднее относительное проскальзывание — величину $(V_{\text{пр}}/V) \cdot 100 \approx 5\%$. Определение скорости обода колеса в трёх точках позволяет найти относительную погрешность измерения скорости проскальзывания. Изменение её от времени приведено на рис. 8. Из рисунка видно, что относительная ошибка измерения скорости проскальзывания достигает 20 %.

Заключение. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что лазерные доплеровские методы могут быть использованы для высокоточных измерений радиусов колёс движущихся транспортных средств. Усреднение результатов измерения радиуса за время поворота колеса на $0,6^\circ$ позволило определить его текущий радиус с относительной погрешностью 0,05 %, а за время поворота на 4° — с погрешностью 0,02 %. В данной работе показано, что существующее при движении колеса проскальзывание может быть измерено и учтено при расчёте текущего значения радиуса. В проведённых экспериментах средняя скорость проскальзывания составила 5,0–6,25 %. Относительная погрешность измерения скорости проскальзывания железнодорожного колеса равна 22 %. Итеративный способ уточнения текущей скорости проскальзывания позволяет существенно (в 5–6 раз) снизить погрешность измерения радиуса. Использование предложенного

метода для измерения проскальзывания показало его принципиальную пригодность при диагностике движения железнодорожного транспорта. С учётом его высоких скоростей эта задача потребует создания специализированной доплеровской аппаратуры высокого быстродействия и точности.

Авторы выражают благодарность С. В. Плотникову, предоставившему диагностический стенд с железнодорожными колёсными парами для проведения экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пат. 2098755 РФ.** Способ измерения линейных размеров и формы металлургических изделий /П. Я. Белоусов, Ю. Н. Дубнищев, В. Г. Меледин. Опубл. 10.12.1997, Бюл. № 34.
2. **Байбаков А. Н., Гуренко В. М., Патерикин В. И. и др.** Автоматический контроль геометрических параметров колесных пар во время движения поезда // *Автометрия*. 2004. **40**, № 5. С. 94–103.
3. **Pat. 5808906 US.** Installation and process for measuring rolling parameters by means of artificial vision on wheels of railway vehicles /A. L. Sanchez-Revuelta. 15 September, 1998.
4. **Дубнищев Ю. Н., Арбузов В. А., Белоусов П. П., Белоусов П. Я.** Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сибирское университетское издательство. 2003. 418 с.

Поступила в редакцию 21 июня 2010 г.
