

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 53.082.53 : 531.7 : 681.786

**МЕТОД ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
РАДИУСА КОЛЕСА ПРИ КАЧЕНИИ ЕГО ПО РЕЛЬСУ****Ю. Н. Дубнищев^{1,2,3}, П. Я. Белоусов^{1,2,3}, О. П. Белоусова²,
В. В. Сотников^{1,2,3}**

¹ Учреждение Российской академии наук
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

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

³ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

Обсуждается оптический метод измерения геометрического радиуса и скорости проскальзывания колеса при качении его по рельсу.

Ключевые слова: радиус колеса, скорость проскальзывания, лазерный доплеровский измеритель скорости, контроль колёс железнодорожного транспорта.

Введение. Проблема дистанционного измерения геометрических параметров вращающихся тел актуальна в различных прикладных задачах промышленного производства и на транспорте. Например, в работе [1] описан способ определения крутящего момента вращающегося цилиндрического вала с помощью лазерного доплеровского измерения и интегрирования разности угловых скоростей в двух различных сечениях. В [2] рассмотрена система, выполняющая измерение геометрических параметров колёс движущегося поезда методом многоракурсного фотографирования с короткой экспозицией и с последующей обработкой полученных изображений. Такого рода технологии обычно используются в специальных депо в статическом режиме либо при малых скоростях движения и не применяются на штатных скоростях движения железнодорожного состава в реальных условиях эксплуатации. Другая система, получившая название «Комплекс» [3], обеспечивает автоматический контроль геометрических параметров колёсных пар, основанный на применении лазерных триангуляторов и принципа самосканирования. При этом скорость проскальзывания колеса относительно железнодорожного полотна не измеряется. В [4] показано, что радиус колеса и скорость проскальзывания могут определяться путём измерения компонент скорости поверхности катания, параллельных рельсу и на известных расстояниях от него. Этот способ применим для колёс, радиус которых по всей поверхности катания одинаков, но для железнодорожных колёс неприемлем.

В данной работе рассматривается новый метод, изложенный в [5], который позволяет дистанционно измерять радиус и скорость проскальзывания колеса при качении его

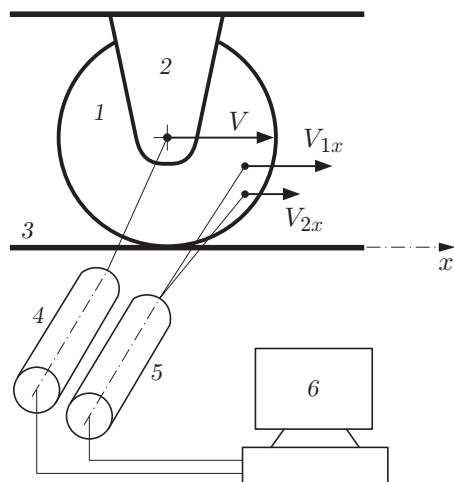


Рис. 1

по рельсу. Контроль скорости проскальзывания колеса позволяет оптимизировать вращающий момент, адаптируя энергетические параметры к условиям движения и состоянию колёс. Дистанционность измерений проще всего обеспечивается оптическими (лазерными) технологиями, хотя по необходимости может использоваться излучение в других спектральных диапазонах.

Описание метода. Обсуждаемый способ дистанционного контроля радиуса колеса и скорости проскальзывания иллюстрируют рис. 1 и 2.

На рис. 1 введены обозначения: 1 — колесо, 2 — опора оси колеса, 3 — рельс, 4 — измеритель скорости движения опоры (оси) колеса V , 5 — измеритель скоростей V_{1x} и V_{2x} в двух точках поверхности колеса с известным относительным положением. Выходы измерителей подключены к компьютеру 6. Колесо катится по направляющей (рельсу) вдоль оси x . Скорость движения оси колеса V и x -составляющие скорости движения его поверх-

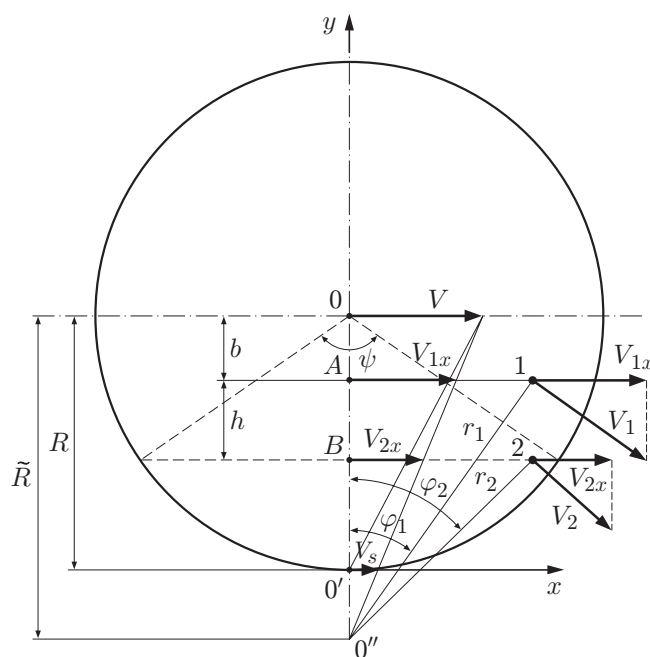


Рис. 2

ности в двух точках измеряются оптическими методами с помощью, например, лазерных доплеровских измерителей скорости [6].

Контур колеса на рис. 2 изображён в виде окружности с центром O , O' — точка касания колеса с поверхностью рельса. В ситуации, когда проскальзывание отсутствует, O' отображает в лабораторной системе отсчёта мгновенный центр (ось), относительно которого вращается колесо при качении по рельсу. Если же колесо катится с проскальзыванием, угловая скорость его уменьшается и мгновенная ось вращения смещается в положение O'' . На рисунке введена ортогональная система координат: ось x направлена вдоль поверхности рельса, ось y проходит через точки O и O' .

Пусть в точках 1 и 2 одновременно измеряются локальные линейные скорости V_{1x} и V_{2x} , параллельные оси x . Проекция расстояния между точками 1 и 2 на ось y равна h . Для измеряемых скоростей V_{1x} и V_{2x} согласно рисунку имеем

$$V_{1x} = \tilde{\Omega} r_1 \cos \varphi_1, \quad (1)$$

$$V_{2x} = \tilde{\Omega} r_2 \cos \varphi_2, \quad (2)$$

где $\tilde{\Omega}$ — мгновенная угловая скорость относительно мгновенной оси вращения O'' ; r_1 и r_2 — мгновенные радиусы вращения точек 1 и 2 относительно центра вращения O'' ; φ_1 и φ_2 — углы между радиусами вращения r_1 , r_2 и осью y . Вычитая из (1) выражение (2), находим разность линейных скоростей в точках 1 и 2:

$$V_{1x} - V_{2x} = \tilde{\Omega}(r_1 \cos \varphi_1 - r_2 \cos \varphi_2) = \tilde{\Omega} h.$$

Следовательно,

$$V_{1x} - V_{2x} = \tilde{\Omega} h.$$

Отсюда находим мгновенную угловую скорость:

$$\tilde{\Omega} = \frac{V_{1x} - V_{2x}}{h}. \quad (3)$$

Линейная скорость V движения центра вращения колеса O параллельна оси x и совпадает со скоростью движения буксы колеса. Скорость V равна произведению угловой скорости $\tilde{\Omega}$ на мгновенный радиус $\tilde{R} = O''O$. При наличии проскальзывания

$$V = \tilde{\Omega} \tilde{R}. \quad (4)$$

Если же проскальзывание отсутствует,

$$V = \Omega R, \quad (5)$$

где R — реальный геометрический радиус колеса; Ω — угловая скорость.

Угловые скорости $\tilde{\Omega}$ и Ω связаны соотношением

$$\tilde{\Omega} = \Omega \mp \Omega_s, \quad (6)$$

где Ω_s — изменение угловой скорости вращения колеса, вызванное проскальзыванием; знак « $-$ » выбирается для колеса при проскальзывании или в режиме торможения; « $+$ » соответствует ситуации, когда на ось колеса действует активный вращающий момент.

Если проскальзывание отсутствует, $\Omega_s = 0$ и $\tilde{\Omega} = \Omega$. Как видно из рис. 2, радиус колеса

$$R = 0'B + BA + A0 = 0'B + h + b. \quad (7)$$

Расстояние $0'B$ равно расстоянию от точки 2 до поверхности рельса. Оно является известным и определяется при позиционировании зондирующего светового поля лазерного доплеровского измерителя скорости V_{2x} на поверхности колеса. Величина отрезка $b = 0A$ находится из соотношения, следующего из подобия треугольников, ограниченных сторонами $0''0$ и V , $0''A$ и V_{1x} :

$$\tilde{\Omega} = \frac{V - V_{1x}}{b},$$

откуда

$$b = \frac{V - V_{1x}}{\tilde{\Omega}}. \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражение для мгновенной угловой скорости из (3), получаем

$$b = h \frac{V - V_{1x}}{V_{1x} - V_{2x}}. \quad (9)$$

Из (7) с использованием (9) находим геометрический радиус колеса:

$$\begin{aligned} R &= 0'B + h + \frac{V - V_{1x}}{\tilde{\Omega}} = 0'B + h + h \frac{V - V_{1x}}{V_{1x} - V_{2x}} = \\ &= 0'B + h \frac{V - V_{2x}}{V_{1x} - V_{2x}} = 0'B + \frac{V - V_{2x}}{\tilde{\Omega}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Учитывая связь полярного угла с угловой скоростью,

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\Omega}(\xi) \sigma(t - \xi) d\xi,$$

где $\sigma(t)$ — функция Хевисайда, измеренный радиус колеса можно представить как функцию полярного угла, непрерывную ($R(t) = \Phi[\varphi(t)]$) или дискретизированную ($R(t_i) = \Phi[\varphi(t_i)]$). Скорость проскальзывания V_s находится по формуле

$$V_s = \tilde{\Omega}(\tilde{R} - R). \quad (11)$$

Как следует из (10), метод измерения геометрического радиуса R нечувствителен к прогибу рельса. Действительно, запишем (10) с учётом $V_{2x} = (0'B + 0'0'')\tilde{\Omega}$ в виде

$$R = 0'B + \frac{V - (0'B + 0'0'')\tilde{\Omega}}{\tilde{\Omega}} = \frac{V}{\tilde{\Omega}} - 0'0'' = \tilde{R} - 0'0''.$$

Отсюда следует, что результат измерений не зависит от смещений колеса по оси y под действием, например, силы тяжести.

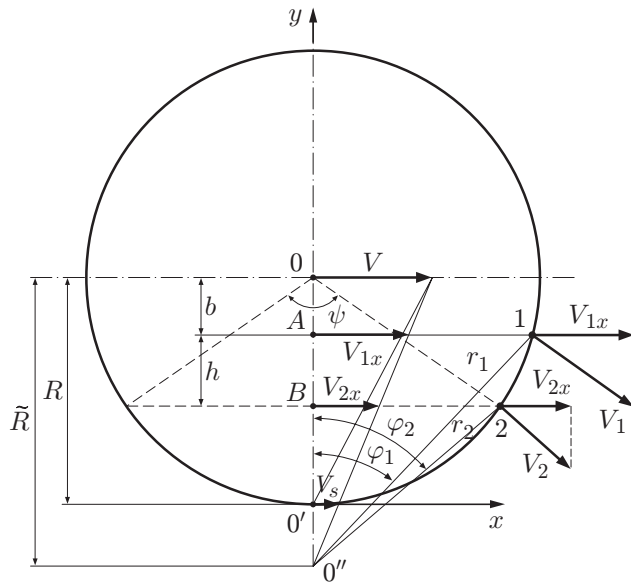


Рис. 3

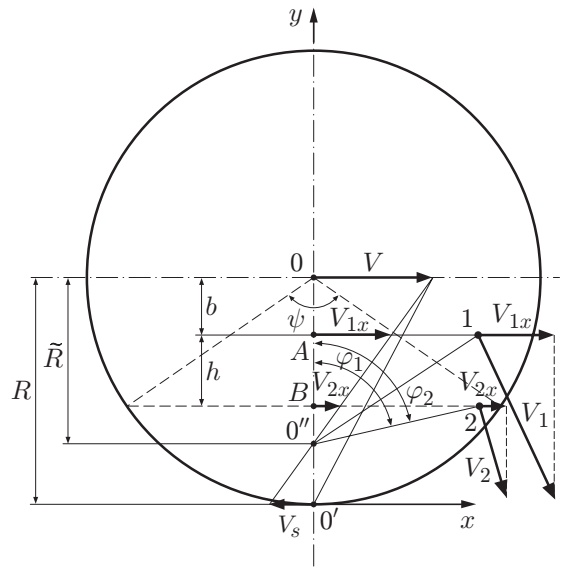


Рис. 4

Рис. 3 поясняет измерения в случае, когда локальные скорости V_{1x} и V_{2x} находятся на поверхности катания колеса. (Обозначения и пояснения полностью совпадают с описанием схемы, показанной на рис. 2.)

Ситуация, когда в лабораторной системе отсчёта определяются радиус и скорость проскальзывания колеса, к которому приложен крутящий момент, отображена на рис. 4. Как видно из рисунка, значение измеряемого радиуса колеса больше или равно значению мгновенного радиуса вращения ($R \geq \tilde{R}$) и скорость проскальзывания меняет знак. При этом мгновенный центр вращения оказывается смещённым по оси y внутрь круга, ограниченного контуром колеса. (Обозначения и пояснения метода те же, что и для рис. 2.)

Измерения радиуса колеса и скорости проскальзывания в системе отсчёта, движущейся относительно рельса со скоростью V , показаны на рис. 5. В такой системе отсчёта удобно контролировать скорость проскальзывания и геометрический радиус в целях оптимизации управления крутящим моментом (например, ведущих колёс локомотива).

Величины V'_{1x} и V'_{2x} получаются путём галилеевых преобразований:

$$\begin{aligned} V'_{1x} &= V_{1x} - V; \\ V'_{2x} &= V_{2x} - V. \end{aligned} \tag{12}$$

Измеряются горизонтальные компоненты V'_{1x} и V'_{2x} мгновенных скоростей поверхности обода V_1 и V_2 в точках 1 и 2. Радиус колеса в этой системе отсчёта определяется выражением (10), в котором в соответствии с преобразованиями (12) делается подстановка:

$$\begin{aligned} V_{1x} &= V'_{1x} + V; \\ V_{2x} &= V'_{2x} + V. \end{aligned} \tag{13}$$

В результате выражение (10) для текущего значения радиуса после подстановки V_{1x} и V_{2x}

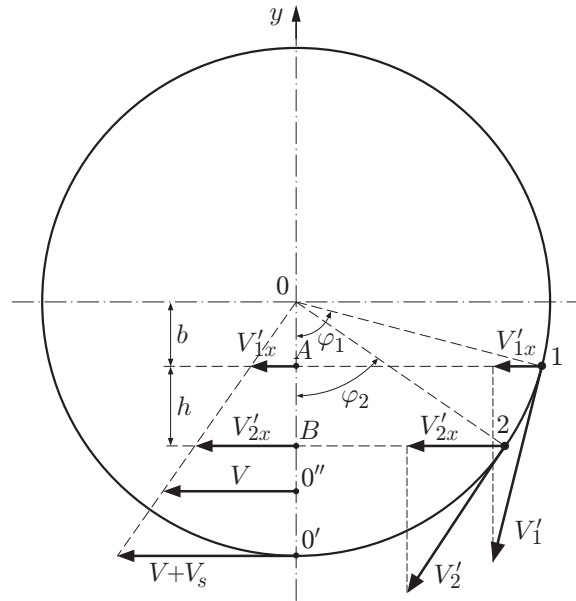


Рис. 5

из (13) принимает вид

$$R = 0'B + h - h \frac{V'_{1x}}{V'_{1x} - V'_{2x}} = 0'B - h \frac{V'_{2x}}{V'_{1x} - V'_{2x}} = 0'B + h \frac{V'_{2x}}{V'_{2x} - V'_{1x}} = 0'B + \frac{V'_{2x}}{\tilde{\Omega}}. \quad (14)$$

Для скорости проскальзывания остаётся справедливой формула (11), где

$$\tilde{\Omega} = (V'_{2x} - V'_{1x})/h; \quad \tilde{R} = V/\tilde{\Omega}.$$

Как видно из рис. 1–3, для колеса в случае проскальзывания мгновенный радиус вращения $\tilde{R} = 0''$ больше геометрического радиуса колеса $R = 0'0'$:

$$\tilde{R} > R.$$

Это соотношение справедливо в ситуации торможения. В случае, когда к колесу приложен крутящий момент (например, если это ведущее колесо локомотива), мгновенный радиус вращения меньше геометрического радиуса:

$$\tilde{R} < R,$$

что следует из рис. 4 и 5. При отсутствии проскальзывания ($V_s = 0$) радиус вращения и геометрический радиус колеса одинаковы: $\tilde{R} = R$.

Выражение (10) описывает радиус колеса $R(\tilde{\Omega})$ в пределах поворота колеса на угол ψ (см. рис. 2–4), определяемый временным интервалом τ , в течение которого зондирующее поле лазерного измерителя скоростей V_{1x} , V_{2x} и их разности $V_{1x} - V_{2x}$ находится в пределах поверхности катящегося колеса:

$$\psi = \tilde{\Omega}\tau.$$

Для определения геометрического радиуса и скорости проскальзывания колеса (в пределах полного его оборота) в устройстве, показанном на рис. 1, можно использовать несколько измерителей 5, позиционированных вдоль рельса на известных расстояниях

друг от друга. Расстояние между соседними измерителями и их число выбираются из необходимости нахождения локальных скоростей V_{1x} и V_{2x} на пространственном интервале, соответствующем полному обороту колеса. Расстояние L между соседними измерителями оценивается согласно рис. 2 и 4 как $L \leq R\psi$, и их число должно удовлетворять условию

$$NR\psi \geq 2\pi R.$$

Выполнение этого условия обеспечивает измерение $\tilde{\Omega}$ и $R(\tilde{\Omega})$ при движении колеса на пространственном интервале, не меньшем длины окружности, ограничивающей контур колеса.

При определении локальных скоростей V_{1x} и V_{2x} на поверхности обода колеса в лабораторной системе отсчёта (см. рис. 3) или в движущейся системе отсчёта (см. рис. 5) достаточно одного измерителя разности скоростей V_{1x} и V_{2x} , ориентированного вдоль рельсового полотна (см. рис. 5) или под небольшим известным углом к его направлению (см. рис. 3).

Быстродействие, обеспечиваемое изложенным выше методом, ограничивается только частотной полосой фотоприёмника, регистрирующего оптический сигнал. Оптический сигнал преобразуется в электрический, фильтруется, оцифровывается, вводится в ЭВМ и обрабатывается по заданной программе. Современная фотоприёмная элементарная база позволяет применительно к железнодорожному транспорту осуществлять контроль геометрического радиуса и скорости проскальзывания колеса на любых скоростях движения. Точность измерений определяется погрешностью измерителя скорости (в лазерных доплеровских технологиях [6] она составляет $\sim 0,1\%$), размером сечения зондирующего поля ($\sim 0,1$ мм при использовании лазеров) и погрешностью задания расстояний h и $0'B$ (см. рис. 2). Эти расстояния также задаются с погрешностью $\sim 0,1$ мм. Информация о скорости закодирована в частоте оптического сигнала, что обеспечивает повышенную помехоустойчивость, характерную для частотных измерений. Измерения могут выполняться как в лабораторной, так и в движущейся системе отсчёта, связанной с подвеской колёс. Для контроля радиуса колеса в пределах полного оборота необходимо использовать несколько измерителей. Реализация предложенного способа на железнодорожном транспорте позволит оперативно выявлять дефектные колёса, тем самым повышая безопасность. Кроме того, контроль скорости проскальзывания и радиуса ведущих колёс локомотива даёт возможность оптимально управлять крутящим моментом, что повышает энергосбережение при эксплуатации.

Заключение. В данной работе предложен метод оптического контроля геометрического радиуса колеса и скорости его проскальзывания при качении по рельсу с использованием лазерных доплеровских технологий. Метод заключается в бесконтактном измерении линейных скоростей движения оси колеса и различных точек на его боковой поверхности в направлении, параллельном направляющей, по которой катится колесо. Радиус колеса как функция полярного угла и скорость проскальзывания определяются из линейных преобразований измеренных значений компонент скорости. Возможная область применения метода — контроль колёс движущегося железнодорожного состава. Измерения могут выполняться как в лабораторной системе отсчёта, так и в системе отсчёта вагона (локомотива) в целях выявления дефектных колёс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meng Z., Liu B. Research on the laser Doppler torque sensor // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2006. 48, N 1. P. 202–206.

2. **Pat. 5808906 USA.** Installation and process for measuring rolling parameters by means of artificial vision on railway vehicles /A. L. Sanchez-Revuelta, G. C.-J. Gomez. Publ. Sep. 15, 1998.
3. **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.
4. **Белоусова О. П., Белоусов П. Я.** Измерение радиуса и скорости проскальзывания катящегося колеса лазерным доплеровским анемометром // Автометрия. 2011. 47, № 2. С. 111–121.
5. **Пат. 2418264 РФ.** Способ диагностики параметров колёс движущегося железнодорожного состава /П. Я. Белоусов, О. П. Белоусова, Ю. Н. Дубнищев, В. В. Сотников. Опубл. 10.05.2011, Бюл. № 13.
6. **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 28 декабря 2010 г.
