

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ
ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗНОСА ГРЕБНЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

К. С. ПЕТРОВ, Е. В. КОНДРАТЕНКО, В. В. ПЕТРОВ*

*Омский государственный университет путей сообщения Омск, Россия,
omgups@omgups.ru

Аннотация. Рассмотрены два варианта устройства, содержащие по четыре или шесть малогабаритных магнитоиндукционных датчиков, закрепленных на подошве рельса. Устройство предназначено для диагностирования формы гребня колесных пар в процессе движения подвижного состава над датчиками по прямолинейному рельсовому пути. Предложен алгоритм вычисления параметров профиля гребней колесных пар, позволяющий идентифицировать координаты центра и радиус гребня, форма которого описывается уравнением второго порядка, т.е. модель вершины гребня имеет форму полукруга, соответствующего стандартному профилю колеса. Кроме того, реализован алгоритм тестирования адекватности полученной параметрической модели. Предложен алгоритм идентификации износа вертикального подреза гребней колесных пар на основе использования подходов, аналогичных методам инструментального контроля, с применением стандартных шаблонов, которые разработаны в соответствии со стандартом „Колеса цельнокатаные“. Предложенная математическая модель, описывающая процесс износа вертикального подреза гребня, позволяет автоматизировать диагностирование состояния профиля колесных пар при движении состава над трехточечной системой магнитоиндукционных датчиков и имитацию процедуры инструментального контроля параметров гребней колес. Алгоритмы, заложенные в предлагаемой математической модели и реализованные на основе микропроцессорного контроллера, позволяют автоматизировать процесс приборного контроля состояния гребней колес в режиме реального времени, вычислять и прогнозировать сроки технического обслуживания или необходимого ремонта колесных пар подвижного состава железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: математическая модель, форма вертикального подреза гребня, магнитоиндукционный датчик, алгоритм, диагностирование, подвижной состав, колесная пара, приборы, автоматизация

Ссылка для цитирования: Петров К. С., Кондратенко Е. В., Петров В. В. Разработка системы магнитоиндукционных датчиков для диагностирования износа гребней колесных пар подвижного состава // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 585—596. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-585-596.

**DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF MAGNETIC INDUCTION SENSORS
FOR DIAGNOSING WEAR OF THE ROLLING STOCK WHEELSET CREST**

K. S. Petrov, E. V. Kondratenko, V. V. Petrov*

*Omsk State Transport University, Omsk, Russia
omgups@omgups.ru

Abstract. Two variants of the device containing four or six small-sized magnetic induction sensors mounted on the sole of the rail are considered. The device is designed to diagnose the shape of the crest of rolling stock wheelsets during its movement over the sensors along a straight rail track. An algorithm for calculating the parameters of the profile of the wheelset ridge is proposed, which allows identifying the coordinates of the center and the radius of the ridge with the shape described by a second-order equation, i.e., the model of the crest tire has the shape of a semicircle corresponding to the standard wheel profile. In addition, an algorithm for testing the adequacy of the obtained parametric model is implemented. An algorithm for identifying the degree of wear of the

vertical undercutting of the ridges of the wheelsets is proposed based on the use of approaches similar to instrumental control methods, using standard templates specially developed in accordance with the State Standard "Solid Rolled Wheels". The proposed mathematical model describing the process of wear of the vertical undercutting of the ridge makes it possible to automate the procedure for diagnosing the state of the wheel pair profile during the movement of the train over the three-point system of magnetic induction sensors and simulating the procedure for instrumental control of the wheel crest parameters. The algorithms embedded in the proposed mathematical model and implemented on the basis of a microprocessor controller allow automating the process of instrument monitoring of the condition of wheel ridges in real time, calculating and predicting the timing of maintenance or necessary repair of wheel sets of railway transport rolling stock.

Keywords: mathematical model, shape of vertical crest undercut, magnetic induction sensor, algorithm, diagnostics, rolling stock, wheelset, instruments, automation

For citation: Petrov K. S., Kondratenko E. V., Petrov V. V. Development of a system of magnetic induction sensors for diagnosing wear of the rolling stock wheelset crest. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 585—596 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-585-596.

За последние несколько десятков лет в России произошли экономические и технические изменения в процессе эксплуатации колесных пар на железной дороге: переход на подшипники качения, увеличение осевой нагрузки, применение композиционных тормозных колодок, железобетонных шпал и т.д. Все перечисленные факторы спровоцировали увеличение износа колес и рельсов, а также снижение усталостной прочности колес и контактно-усталостной прочности поверхности обода.

Ежегодно на железных дорогах России отцепляют большое количество единиц подвижного состава из-за неисправности колесной пары. На некоторых участках сети железных дорог интенсивность изнашивания возросла в 3—6 раз по сравнению с нормами эксплуатации подвижного состава.

Образование дефектов на поверхности катания колесных пар влечет за собой отказ в эксплуатации единицы подвижного состава, что увеличивает их простой и ведет к экономическим издержкам. Следовательно, локализуя возникающие дефекты железнодорожных колес, возможно повысить надежность безопасной эксплуатации подвижного состава.

Анализ неисправностей подвижного состава (на примере грузовых вагонов в текущем отцепочном ремонте — ТР-2) показывает, что наиболее распространенной причиной отцепки вагонов являются дефекты колесной пары (рис. 1).

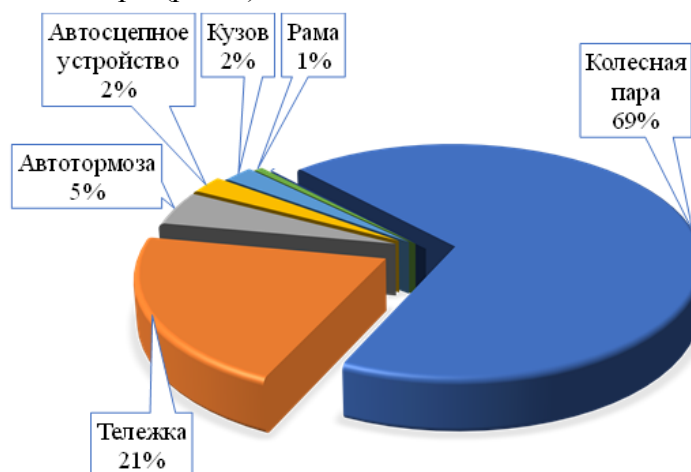


Рис. 1

На основе отчета о работе приборов безопасности, используемых на пункте технического обслуживания вагонов (ПТО) ст. Инская Западно-Сибирской железной дороги, за 2016—2021 гг. был проведен анализ, позволяющий оценить долю неисправных колесных пар d в проконтролированных вагонах (рис. 2).

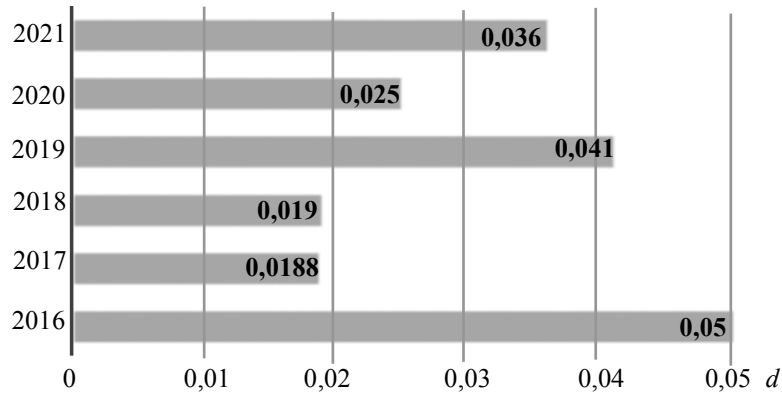


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что за последние пять лет доля всех отцепов подвижного состава снижается. Эта тенденция обусловлена внедрением современных методов увеличения ресурса колесных пар путем использования цельнокатаных колес нового поколения с S-образным диском, кассетных подшипников, а также повышения уровня точности применяемых диагностических комплексов подвижного состава в ходе движения (КТИ, КТСМ и др.).

На рис. 3 проиллюстрировано процентное соотношение отцепов вагонов по показаниям приборов технического диагностирования за 2016—2021 гг. на ПТО ст. Инская Западно-Сибирской железной дороги. Согласно рисунку, можно выделить пять групп неисправности:

- утончение гребня (менее 25 мм);
- дефекты поверхности катания колеса (ползун, прокат, выщербина и т.д.);
- сдвиг (сползание) буксового узла (более 2 мм);
- утончение обода колеса (менее 22 мм);
- разница в толщине гребней колес в одной колесной паре (более 4 мм).

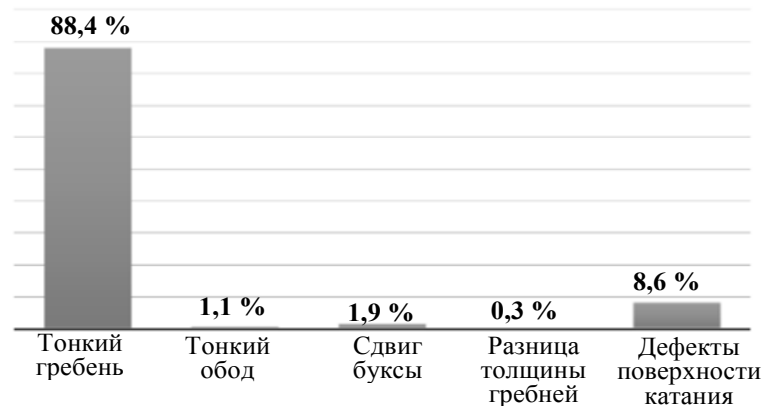


Рис. 3

Анализ неисправностей цельнокатаного колеса в эксплуатации (рис. 3) свидетельствует о высоком уровне дефектообразования гребня. Повышенный износ главным образом возникает вследствие постоянного взаимодействия гребня с рельсом при извилистом движении на ровных участках железнодорожного пути и прохождении колесной пары кривых, особенно малого радиуса скругления. Доля отцепления вагонов вследствие износа гребня колеса, согласно статистике ПТО ст. Инская, представлена на рис. 4.

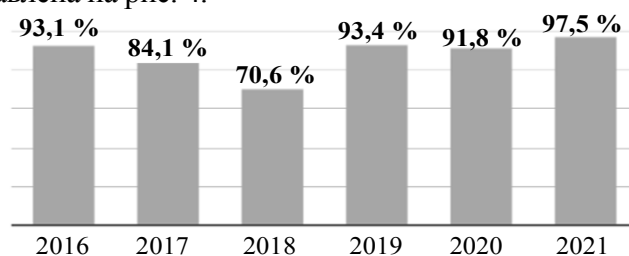


Рис. 4

Отклонение толщины гребня от номинальных значений приводит к дополнительному дефектообразованию рельсового пути и подвижного состава, например, ослаблению креплений частей стрелочного перевода на шпалах, раннему износу гребня колеса. Утончение гребня колеса способствует возникновению трещин и сколов, что повышает вероятность схода подвижного состава в ходе эксплуатации.

По данным приборов технического диагностирования, расположенных на ПТО ст. Инская Западно-Сибирской железной дороги, проанализирована зависимость доли зарегистрированных случаев утончения гребня колеса от месяца года — выявлена корреляция повышенного дефектообразования и среднесуточной температуры окружающей среды (рис. 5).

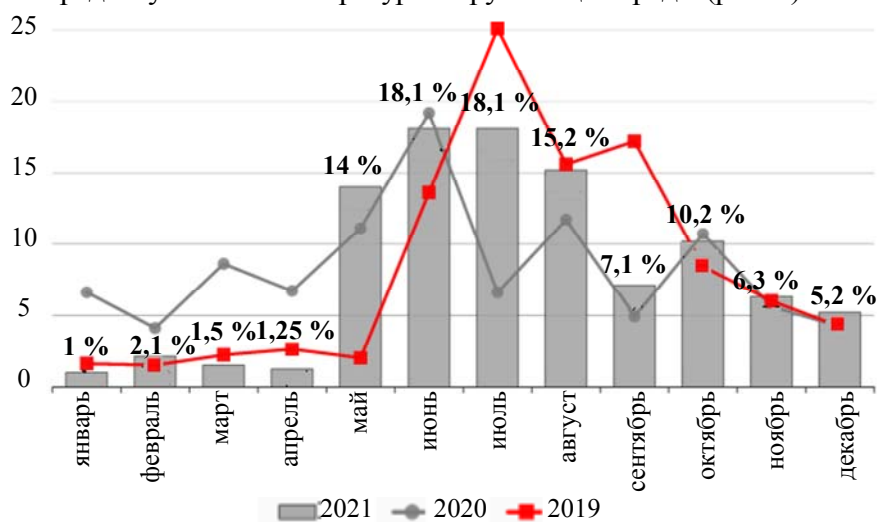


Рис. 5

Из рис. 5 видно, что наибольшая интенсивность истирания гребня приходится на летние месяцы, когда средняя температура окружающей среды выше 25 °С. Это связано с повышенным уровнем образования абразивных веществ (таких как песок, пыль, мелкие части перевозимых грузов) в системе взаимодействия колесо—рельс. В весенний и осенний периоды сокращение износа гребня сопряжено с увеличением уровня осадков — своего рода смазочного материала, снижающего силы трения между колесом и рельсом.

Автоматизация процесса диагностирования состояния колесных пар на основе современной микропроцессорной техники позволяет существенно повысить оперативность принятия решения о соответствии их эксплуатационным требованиям и является важным этапом в технологическом процессе обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта [1]. Наиболее надежные системы автоматизации контроля профиля гребней колесных пар подвижного состава основаны на применении системы магнитоиндукционных датчиков, закрепленных на подошве рельса с внутренней стороны прямолинейного участка железнодорожного пути [2, 3]. При этом следует учитывать, что основным достоинством магнитоиндукционных датчиков (по сравнению с оптическими и лазерными) является высокая надежность их работы в сложных погодных условиях и незначительные энергетические и эксплуатационные затраты.

Для активного внедрения современных цифровых и компьютерных технологий на железнодорожном транспорте необходимы специальные математические модели, обеспечивающие решение поставленных задач в области автоматизации и прогнозирования [4]. Основная задача настоящей работы состоит в создании линейной математической модели, описывающей изменение формы вертикального подреза гребней колесных пар для автоматизации диагностирования их износа в процессе движения состава по рельсовому пути и разработке алгоритма идентификации формы гребней колесных пар, аналогичного алгоритму метода инструментального контроля, основанного на применении шаблонов.

В [5] предлагается использовать амплитудные значения сигналов датчиков для оценки толщины гребня колеса и его смещения относительно головки рельса, основанные на эквивалентной прямоугольной форме модели гребня. Недостаток такой двухточечной модели заключается в том, что расстояние между поверхностью гребня колеса, имеющей эквивалентную прямоугольную форму, и плоскостью датчиков считается постоянным, а измеряется только смещение гребня колеса относительно датчиков, что вызывает дополнительную методическую погрешность, которая приводит к нелинейности реальной функции чувствительности датчика. Для устранения этого недостатка предлагается использовать трехточечную систему магнитоиндукционных датчиков, установив два дополнительных датчика. Таким образом, в этой системе используется подход, аналогичный [6]: реализуется астигматическая модель второго порядка, которая позволяет идентифицировать объект, описываемый уравнением второй степени (в этом случае модель вершины гребня имеет форму полукруга).

Типичная схема расположения магнитоиндукционных датчиков для реализации двухточечной системы, содержащей четыре информационных датчика (Д1—Д4) и два датчика Дч, Дн (для фиксации четного и нечетного направления приближения состава), представлена на рис. 6, а. Схема расположения магнитоиндукционных датчиков для реализации трехточечной системы, содержащей шесть датчиков (Д1—Д6), представлена на рис. 6, б.

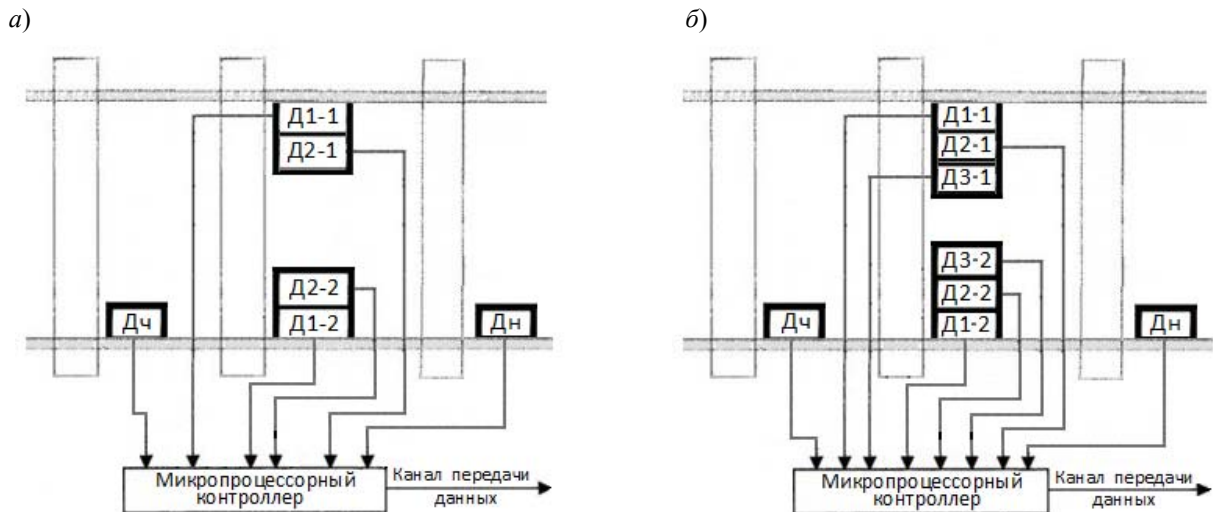


Рис. 6

В [7] предлагается использовать энергию импульсов на выходе магнитоиндукционных датчиков повышенной мощности Дч и Дн для зарядки аккумуляторной батареи, питающей микропроцессорный контроллер, входящий в состав системы. Это обеспечивает энергетическую независимость всей системы от внешних источников питания и снижение эксплуатационных затрат по принципу „установил и забыл“.

Первым признаком износа деталей, входящих в конструкцию тележки подвижного состава, является смещение гребня колеса относительно головки рельса, а перекос оси колесной пары и износ гребня (уменьшение его толщины) — это уже крайнее (предельное) техническое состояние колесной пары и тележки в целом. Поэтому для обеспечения возможности прогнозирования сроков технического обслуживания подвижного состава и износа деталей тележки необходимо оценивать не только смещение гребня в горизонтальном (по оси x) и вертикальном (по оси y) направлениях, но еще его толщину и форму, что позволяет реализовать трехточечную модель.

Предлагаемая математическая модель предполагает применение шаблонов в процессе инструментального контроля на пунктах технического обслуживания подвижного состава, она соответствует методике, утвержденной в ОАО „РЖД“ [8]. На рис. 7 представлены фрагмент профиля гребня колеса (а; звездочкой обозначены справочные размеры) и тестового шаблона (б)

для контроля его состояния, соответствующие ГОСТ „Колеса цельнокатаные“^{с*}.

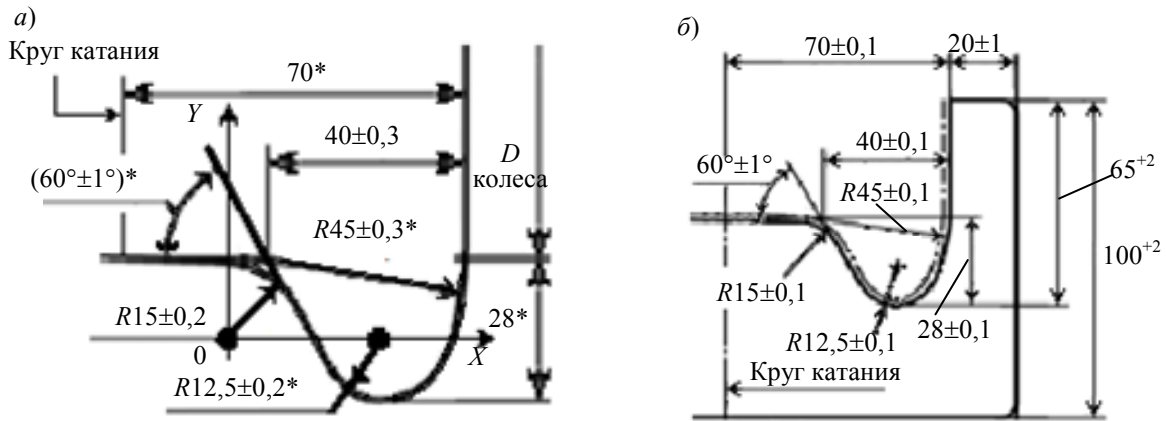


Рис. 7

Эквивалентная геометрическая схема взаимного расположения гребня колеса и трех датчиков Д1, Д2, Д3 в прямоугольной системе координат, используемая в процессе разработки математической модели, приведена на рис. 8.

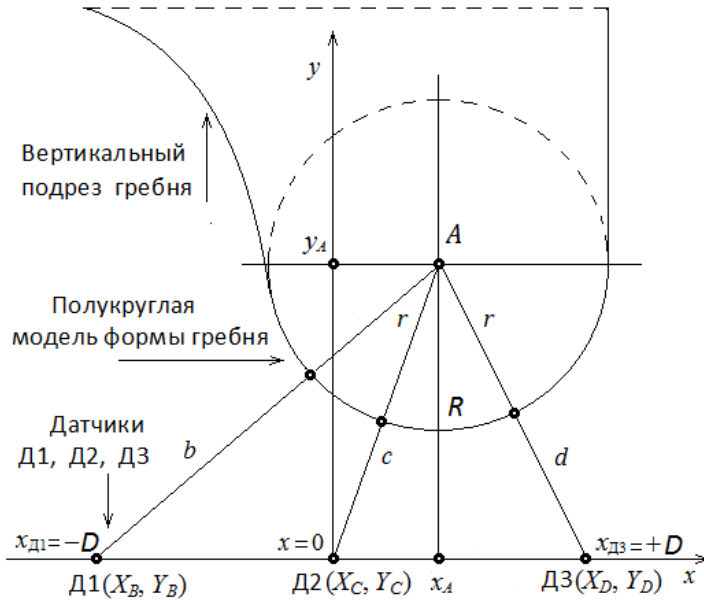


Рис. 8

Эквивалентный радиус гребня колеса [9] с применением трехточечной модели системы датчиков находится как:

$$r = \frac{2D^2 + 2c^2 - d^2 - b^2}{2b + 2d - 4c}; \tag{1}$$

координата x_A эквивалентной окружности гребня колеса в данной трехточечной модели:

$$x_A = \frac{(b+r)^2 - (d+r)^2}{4D}. \tag{2}$$

Вторая координата центра эквивалентной окружности гребня вычисляется согласно выражению

* ГОСТ 10791-11. Колеса цельнокатаные. М.: Стандартинформ, 2011. 32 с.

$$y_A = \sqrt{(c+r)^2 - x_A^2}. \tag{3}$$

Для тестирования алгоритма (1)—(3) вычисления радиуса гребня (r) и координат центра эквивалентной окружности гребня $A(x_A, y_A)$ предварительно необходимо найти значения b, c, d при заданных постоянных координатах датчиков Д1 (X_B, Y_B), Д2 (X_C, Y_C), Д3 (X_D, Y_D) и попарно варьируемых соответствующих параметрах окружности (R, X_A, Y_A) в пределах рабочего диапазона изменения этих величин:

$$\begin{cases} b = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2} - R; \\ c = \sqrt{(X_A - X_C)^2 + (Y_A - Y_C)^2} - R; \\ d = \sqrt{(X_A - X_D)^2 + (Y_A - Y_D)^2} - R. \end{cases} \tag{4}$$

Значения b, c, d , вычисленные по формулам (4), необходимо подставить в выражения (1)—(3) для нахождения параметров (r, x_A, y_A). Так как алгебраические преобразования после указанных подстановок весьма громоздки, то вместо дальнейшего аналитического исследования модели проще воспользоваться численными методами (в любой доступной среде программирования). В результате получим тождественные функциональные зависимости в пределах допустимого диапазона изменения этих величин:

$$\begin{cases} r(X_A, Y_A) = R(X_A, Y_A); \\ x_A(R, Y_A) = X_A(R, Y_A); \\ y_A(R, X_A) = Y_A(R, X_A). \end{cases} \tag{5}$$

Результат тестирования (5) подтверждает корректность алгоритма при вычислении параметров гребня колеса на основе импульсных сигналов, поступающих от системы трех магнитоиндукционных датчиков, находящихся на расстоянии D друг от друга (см. рис. 8).

Согласно классификатору неисправностей колесных пар [8] и методике диагностирования состояния профиля колес [10], износ вертикального подреза гребня контролируется с помощью шаблона, применение которого продемонстрировано на рис. 9 (a — размеры шаблона, учитываемые в модели; b — пример взаимного расположения предельного износа гребня колеса и шаблона для моделирования системы).

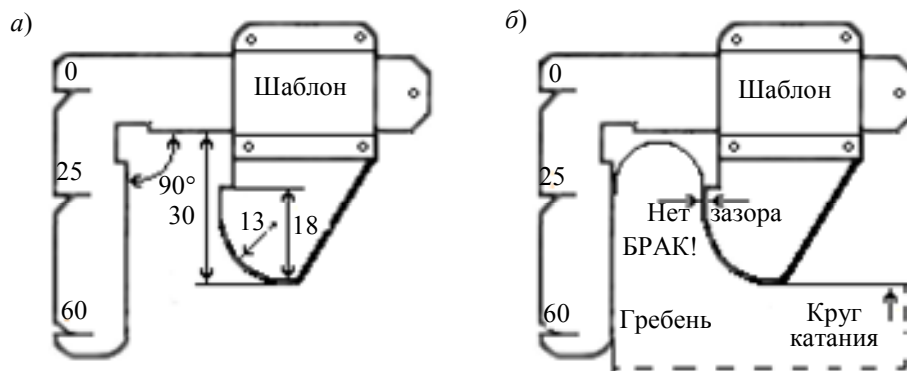


Рис. 9

Эквивалентная геометрическая схема модели взаимного расположения гребня колеса и тестового шаблона R_h круговой формы (для оценки степени износа вертикального подреза гребня колеса) изображены на рис. 10 в принятой прямоугольной системе координат.

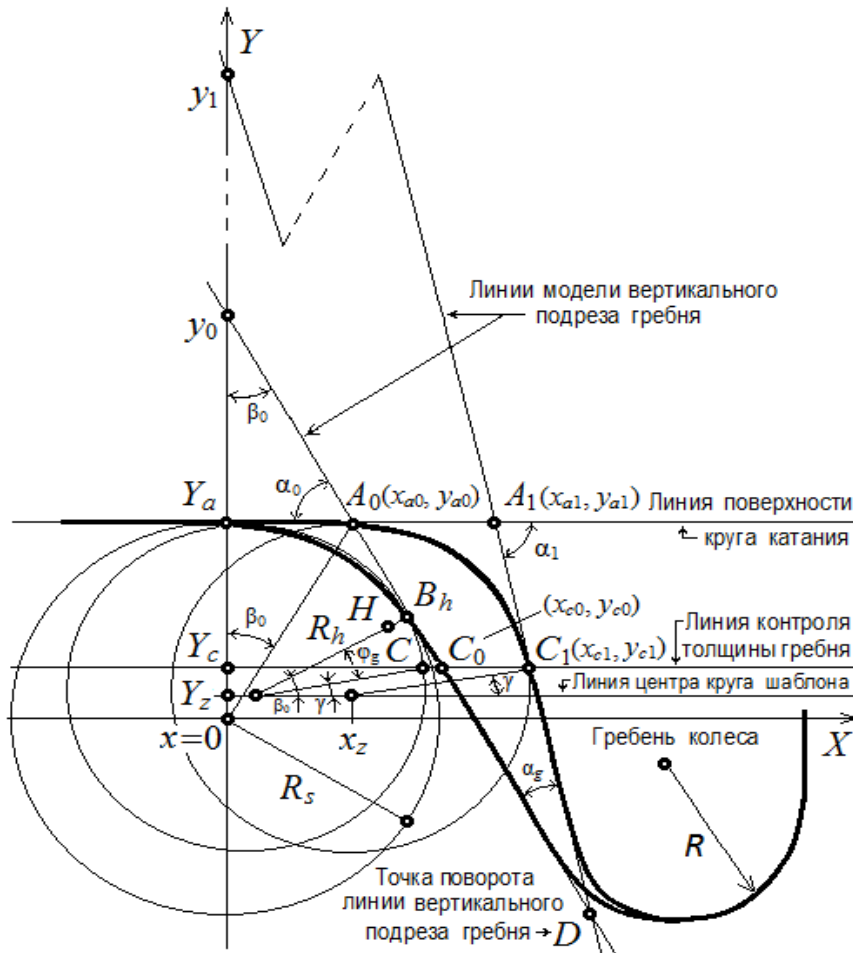


Рис. 10

Применение модели рассмотрим на примере стандартного профиля обода колеса. Для разработки модели воспользуемся методами аналитической геометрии. За начало системы координат принят центр окружности R_s , который определяет форму вертикального подреза при нормативном состоянии стандартного профиля колеса, совпадающего с шаблоном, предназначенным для инструментального контроля профиля, соответствующего ГОСТ „Колеса цельнокатаные“. Назначение постоянных параметров модели, изображенной на схеме (см. рис. 10) в принятой системе координат, описано в таблице.

Угол между линией наклона вертикального подреза A_0C_0 и осью Y при нормативном состоянии гребня и $\alpha_0 = 60^\circ$, соответствующего ГОСТ, определяется как

$$\beta_0 = \frac{\pi}{2} - \text{abs}(\alpha_0). \tag{6}$$

Координата x_{a0} точки A_0 пересечения прямой A_0C_0 с образующей линией поверхности катания (т.е. $y_{a0} = Y_a$) в принятой системе координат определяется как

$$x_{a0} = R_s \cdot \text{tg}\beta_0. \tag{7}$$

Коэффициент наклона прямой A_0C_0 к образующей линии поверхности катания (Y_a):

$$K_0 = \text{tg}\alpha_0. \tag{8}$$

Координата точки пересечения прямой A_0C_0 с осью Y при $y_{a0} = Y_a$ и $y_{c0} = Y_c$ (см. таблицу):

$$y_0 = y_{c0} - K_0 x_{c0}. \tag{9}$$

**Назначение исходных данных (констант),
обозначенных на эквивалентной геометрической схеме модели в принятой системе координат**

Обозначение	Значение	Исходные параметры модели в принятой прямоугольной системе координат
R_s	15 мм	Радиус окружности с координатами центра: $x = 0, y = 0$ (нормативное состояние вертикального подреза гребня колеса, соответствующего шаблону профиля)
R_h	13 мм	Радиус окружности с координатами центра: $x = x_z, y = Y_z$ (нормативное состояние параметров гребня, соответствующего шаблону для контроля вертикального подреза гребня)
α_0	-60°	Угол наклона линии вертикального подреза гребня, соответствующий параметрам стандартного профиля колеса при отсутствии износа
R	12,5 мм	Радиус окружности, описывающей форму вершины гребня колеса в нормативном состоянии стандартного профиля колеса при отсутствии износа
x_{c0}	14,66 мм	Координата точки C_0 пересечения линии контроля толщины гребня и линии вертикального подреза гребня, соответствующего параметрам профиля колеса при отсутствии износа (при этом $y_{c0} = Y_c$)
x_{c1}	21,66 мм	Координата точки C_1 пересечения линии контроля толщины гребня и линии вертикального подреза гребня, соответствующего состоянию предельного износа гребня колеса и запрету эксплуатации колесной пары (процесс износа толщины гребня определяется переменной x_g , которая изменяется при моделировании в диапазоне от x_{c0} до x_{c1})
Y_a	15 мм	Координата линии поверхности круга катания, по которой смещается шаблон, при инструментальном контроле состояния вертикального подреза гребня (примерно 28 мм от вершины гребня)
Y_c	5 мм	Координата линии контроля толщины гребня, которая используется при инструментальном контроле состояния вертикального подреза гребня (в стандарте указано 18 мм от вершины гребня)
Y_z	2 мм	Координата линии смещения центра эквивалентной окружности шаблона в процессе износа вертикального подреза гребня

Смещение центра эквивалентной окружности x_z шаблона R_h вдоль оси X в состоянии предельного износа вертикального подреза гребня находим при $y_z = Y_z$ из уравнения:

$$(x - x_z)^2 + (y - y_z)^2 = R_h^2. \quad (10)$$

Таким образом, смещение центра эквивалентной окружности шаблона R_h по линии Y_z :

$$x_z = x_{c1} - \sqrt{R_h^2 + (y_{c1} - y_z)^2}. \quad (11)$$

Коэффициент наклона радиуса окружности шаблона в точке C_1 (точка касания отрезка A_1C_1 и радиуса окружности R_h):

$$K_r = \frac{y_{c1} - y_z}{x_{c1} - x_z}. \quad (12)$$

Коэффициент наклона прямой A_1C_1 к оси X определим как перпендикуляр к радиусу в точке касания C_1 :

$$K_1 = -\frac{1}{K_r}. \quad (13)$$

Таким образом, коэффициент наклона прямой A_1C_1 к оси X , который соответствует предельному износу вертикального подреза гребня:

$$K_1 = -\frac{x_{c1} - x_z}{y_{c1} - y_z}. \quad (14)$$

Точка пересечения прямой A_1C_1 с осью Y при $y_{c1} = Y_c$ (см. таблицу):

$$y_1 = y_{c1} - K_1 x_{c1}. \quad (15)$$

Угол наклона γ радиуса окружности шаблона R_h в точке C_1 равен углу наклона γ в точке C , поскольку происходит параллельное смещение центра окружности R_h шаблона (по

линии Y_z) и точки C вдоль оси X (по линии Y_c) в процессе инструментального контроля степени износа вертикального подреза гребня, что наглядно видно (см. рис. 5):

$$\gamma = \text{tg}^{-1} K_r. \quad (16)$$

Точку пересечения прямых A_0C_0 и A_1C_1 (точку D) найдем из системы уравнений

$$\begin{cases} y = K_0x + y_0; \\ y = K_1x + y_1. \end{cases} \quad (17)$$

В результате координата x_d точки D (пересечения двух прямых A_0C_0 и A_1C_1)

$$x_d = \frac{y_1 - y_0}{K_0 - K_1}. \quad (18)$$

Координата y_d точки D (пересечения двух прямых A_0C_0 и A_1C_1):

$$y_d = K_0x_d + y_0. \quad (19)$$

Уравнение прямой, проходящей через виртуальную точку D (при изменении толщины гребня x_g в пределах от x_{c0} до x_{c1} при $y_g = Y_c$), можно найти из соотношения:

$$\frac{y - y_d}{y_g - y_d} = -\frac{x - x_d}{x_g - x_d}. \quad (20)$$

В результате уравнение любой прямой, проходящей через точку D

$$y = K_gx + y_d - K_gx_d, \quad (21)$$

где K_g — коэффициент наклона пучка любых прямых, проходящих через виртуальную точку D , который зависит от значения x_g :

$$K_g = \frac{y_g - y_d}{x_g - x_d}. \quad (22)$$

Изменение угла наклона линии износа вертикального подреза гребня α_g от K_g составляет:

$$\alpha_g = \text{tg}^{-1} K_g. \quad (23)$$

Функция изменения угла α_g (наклона линии, определяющей степень вертикального износа гребня) от толщины гребня, представлена на рис. 11, а.

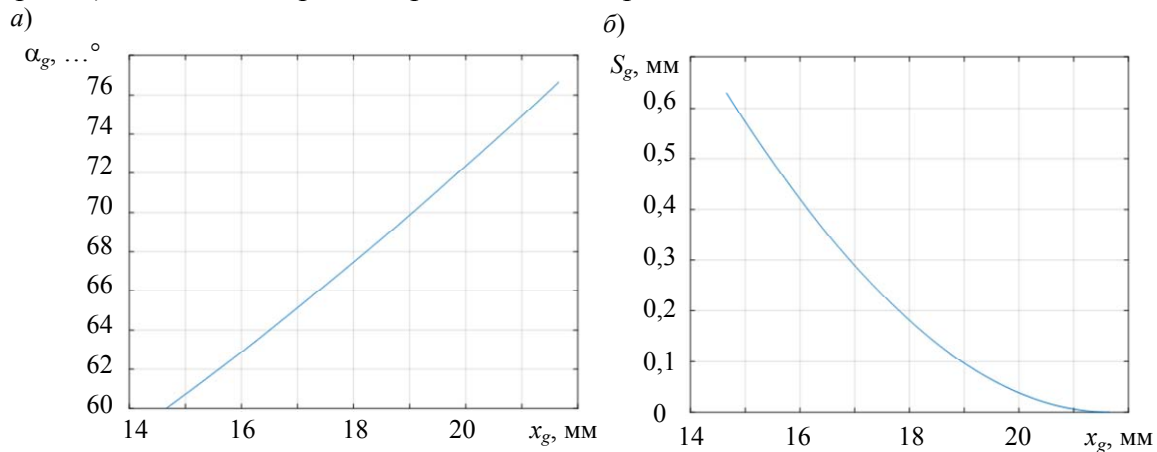


Рис. 11

Изменение угла наклона радиуса R_h (перпендикулярного линии A_0C_0) к оси X , в зависимости от α_g (см. рис. 9) описывается выражением:

$$\varphi_g = \frac{\pi}{2} - \text{abs}(\alpha_g) - \gamma. \quad (24)$$

Зазор между краем шаблона и поверхностью вертикального подреза гребня, с учетом (16) и (24) в зависимости от α_g , составит:

$$S_g = R_h \frac{1 - \cos \varphi_g}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_g \right)}. \quad (25)$$

Полученная с помощью выражений модели (1)—(25) функция изменения зазора между краем шаблона и поверхностью вертикального подреза гребня S_g от изменения толщины гребня x_g в пределах от x_{c0} до x_{c1} , представлена на рис. 11, б в принятой системе координат.

Таким образом, функция изменения угла наклона линии износа вертикального подреза гребня от толщины гребня близка к линейной и в процессе эксплуатации колесной пары может достигать 75° . Скорость уменьшения зазора между краем шаблона и поверхностью вертикального подреза гребня снижается по мере износа гребня.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Предложенная математическая модель процесса износа вертикального подреза гребня позволяет на основе трехточечной системы магнитоиндукционных датчиков и имитационной модели инструментального контроля параметров гребней колес автоматизировать процедуру диагностирования состояния профиля колесных пар в процессе движения состава по прямолинейному рельсовому пути.

2. Алгоритм, используемый в математической модели и реализованный на основе микропроцессорного контроллера, позволяет автоматически в режиме реального времени осуществлять приборный контроль состояния гребней колес и прогнозировать сроки технического обслуживания или ремонта колесных пар подвижного состава железнодорожного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байбаков А. Н., Кучинский К. И., Патерикин В. И., Плотников С. В., Сотников В. В. Опыт разработки и эксплуатации лазерных автоматизированных диагностических комплексов для бесконтактного контроля параметров колес грузовых вагонов // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 61—64.
2. Педали и датчики [Электронный ресурс]: <http://scbist.com/spravochnik/1/pedali_datchiki1.htm>. (дата обращения: 25.03.2022).
3. Петров К. С., Окишев А. С., Петров В. В. Математическая модель выходного сигнала магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе стигматического подхода // Известия Транссиба. 2020. № 2(42). С. 131—140.
4. Орлова А. М., Саидова А. В. Прогноз износа профилей колес с использованием динамических моделей // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 3(46). С. 51—53.
5. Пат. РФ 193429, МПК В61К 9/12. Устройство для определения положения колесных пар подвижного состава относительно прямолинейного рельсового пути / Е. В. Кондратенко, В. В. Петров, К. С. Петров. Заяв. № 2019118943, 17.06.2019. Опубл. 29.10.2019.
6. Петров К. С., Петров В. В. Астигматическая модель сигнала магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе дискретного подхода // Известия Транссиба. 2021. № 2(46). С. 125—135.
7. Пат. РФ 192859, В61К 9/12. Устройство контроля технического состояния тележек подвижного состава / Е. В. Кондратенко, В. В. Петров, К. С. Петров. Заяв. № 2019118942, 17.06.2019. Опубл. 03.10.2019.
8. Классификатор неисправностей вагонных колесных пар и их элементов [Электронный ресурс]: <<http://www.rcit.su/techinfo51.html>>. (дата обращения: 25.03.2022).
9. Петров К. С., Окишев А. С., Петров В. В. Применение трехточечной системы индукционных датчиков для оценки параметров профиля гребня колес подвижного состава на основе модели эквивалентной круговой формы // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: матер. науч. конф. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2022. С. 385—391.
10. Матяш Ю. И., Брылова Т. Б., Кирпиченко Е. М., Кондратенко Е. В. Визуальный метод неразрушающего контроля деталей железнодорожного подвижного состава: учеб.-метод. пос. для выполнения лабораторных работ. Ч. 1. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. 37 с.

- Сведения об авторах**
- Константин Сергеевич Петров** — студент; Омский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматизации и систем управления
- Евгений Владимирович Кондратенко** — канд. техн. наук; Омский государственный университет путей сообщения, кафедра вагонов и вагонного хозяйства
- Владимир Владимирович Петров** — канд. техн. наук; Омский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматизации и систем управления; старший научный сотрудник, E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Поступила в редакцию 20.04.22; одобрена после рецензирования 24.05.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

1. Baibakov A.N., Kuchinskii K.I., Paterikin V.I., Plotnikov S.V., Sotnikov V.V. *Measurement Techniques*, 2010, no. 4, pp. 444–448.
2. http://scbist.com/spravochnik/1/pedali_datchiki1.htm. (in Russ.)
3. Petrov K.S., Okishev A.S., Petrov V.V. *Izvestiya Transsiba*, 2020, no. 2(42), pp. 131–140. (in Russ.)
4. Orlova A.M., Saidova A.V. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2013, no. 3(46), pp. 51–53. (in Russ.)
5. Patent RU 193429, B61K 9/12, *Ustroystvo dlya opredeleniya polozheniya kolesnykh par podvizhnogo sostava otnositel'no pryamolineynogo rel'sovogo puti* (Device for Determining the Position of Rolling Stock Wheelsets Relative to a Straight Track), Kondratenko E.V., Petrov V.V., Petrov K.S., Patent application no. 2019118943, Priority 17.06.2019, Published 29.10.2019. (in Russ.)
6. Petrov K.S., Petrov V.V. *Izvestiya Transsiba*, 2021, no. 2(46), pp. 125–135. (in Russ.)
7. Patent RU 192859, B61K 9/12, *Ustroystvo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya telezhek podvizhnogo sostava* (Device for Monitoring the Technical Condition of Rolling Stock Bogies), Kondratenko E.V., Petrov V.V., Petrov K.S., Patent application no. 2019118942, Priority 17.06.2019, Published 03.10.2019. (in Russ.)
8. <http://www.rcit.su/techinfo51.html>. (in Russ.)
9. Petrov K.S., Okishev A.S., Petrov V.V. *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte* (Innovative Projects and Technologies in Education, Industry and Transport), Materials of a Scientific Conference, Omsk, 2022, pp. 385–391. (in Russ.)
10. Matyash Yu.I., Brylova T.B., Kirpichenko E.M., Kondratenko E.V. *Vizual'nyy metod nerazrushayushchego kontrolya detaley zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Visual Method of Non-Destructive Testing of Parts of Railway Rolling Stock), Part 1, Omsk, 2018, 37 p. (in Russ.)

Data on authors

- Konstantin S. Petrov** — Student; Omsk State Transport University, Department of Automation and Control Systems
- Evgeny V. Kondratenko** — PhD; Omsk State Transport University, Department of Carriages and Carriage Facilities
- Vladimir V. Petrov** — PhD; Omsk State Transport University, Department of Automation and Control Systems; Senior Scientist; E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Received 20.04.22; approved after reviewing 24.05.22; accepted for publication 21.06.22.