



ОСНОВЫ УСТОЙЧИВОСТИ МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ С УЧЕТОМ КИНЕМАТИКИ УПРУГОГО КОЛЕСА ПРИ ДВИЖЕНИИ

Э. С. Савенко¹, А. Ю. Машура², В. Д. Шаповалов³, Д. В. Мазур⁴, С. В. Удовенко⁵

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

Российская Федерация, Донецкая Народная Республика,

286123, г. о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.

E-mail: ¹ e.s.savenko@donnasa.ru, ² mashura.a.yu-aah-24a@donnasa.ru, ³ shapoval.v.d-aah-25a@donnasa.ru,

⁴ mazur.d.v-aah-25b@donnasa.ru, ⁵ udovenko.s.v-aah-25b@donnasa.ru

Получена 16 ноября 2023; принята 24 ноября 2023.

Аннотация. В статье изложены основы кинематики упругого колеса мобильного транспортного средства в задачах устойчивости. Рассматривается кинематика упругого колеса, которое снабжено упругими шинами и жестко посажено на общую ось, вместе с которой свободно вращается в подшипниках тяги с определённой угловой скоростью, и перекачивается по плоскости. Тяга движется с заданной скоростью прямолинейно и расстояние её от горизонтальной плоскости постоянно. Из-за податливостей шин колес ось колеса поворачивается относительно продольной оси, совпадающей с направлением оси тяги, и поворачивается на угол вокруг оси колеса, что, в свою очередь, вынуждает колесо поворачиваться в целом вокруг вертикальной оси. Соотношения, полученные из расчётной схемы и вышеописанного физического процесса, позволили получить функциональные зависимости между кинематическими параметрами движущегося упругого колеса, которые положены в основу системы уравнений Лагранжа или Эйлера, для решения важных для практики задач устойчивости движения.

Ключевые слова: скат, кинематика, колесо, шины, подшипники, тяги, устойчивость, динамика, прицеп, плоскость качения, координаты, матрица, транспортное средство, движение, угловая скорость.

FUNDAMENTALS OF STABILITY OF A MOBILE VEHICLE FOR TRANSPORTING GOODS, TAKING INTO ACCOUNT THE KINEMATICS OF AN ELASTIC WHEEL WHEN MOVING

Eduard Savenko¹, Andrey Mashura², Vladimir Shapovalov³, Vladimir Mazur⁴,
Sergey Udovenko⁵

FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture»,

Russian Federation, 286123, Makeevka, Derzhavin st., 2.

E-mail: ¹ e.s.savenko@donnasa.ru, ² mashura.a.yu-aah-24a@donnasa.ru, ³ shapoval.v.d-aah-25a@donnasa.ru,

⁴ mazur.d.v-aah-25b@donnasa.ru, ⁵ udovenko.s.v-aah-25b@donnasa.ru

Received 16 November 2023; accepted 24 November 2023.

Abstract. The article outlines the basics of the kinematics of the elastic wheel of a mobile vehicle in stability problems. We consider the kinematics of an elastic wheel, which is equipped with elastic tires and is rigidly mounted on a common axis, with which it rotates freely in traction bearings at a certain angular velocity and rolls along the plane. The rod moves at a given speed in a straight line and its distance from the horizontal plane is constant. Due to the compliance of the wheel tires, the wheel axis rotates relative to the longitudinal axis, coinciding with the direction of the traction axis, and rotates at an angle around the wheel axis, which, in turn, forces the wheel to rotate as a whole around a vertical axis. The relationships obtained from the



calculation scheme and the above-described physical process made it possible to obtain functional relationships between the kinematic parameters of a moving elastic wheel, which form the basis of the system of Lagrange or Euler equations for solving problems of motion stability that are important for practice.

Keywords: ramp, kinematics, wheel, tires, bearings, rods, stability, dynamics, trailer, rolling plane, coordinates, matrix, vehicle, motion, angular velocity.

Введение

Основными задачами автомобилестроения – являются повышение надежности и безопасности автомобилей, сокращение трудоемкости технического обслуживания, повышение топливной экономичности и экологичности транспортных средств. При функциональном проектировании автотранспортных средств одной из ключевых задач является определение физики процессов движения и управления автомобилем, взаимодействия с внешней средой, изучение характеристик его механизмов и систем [1–4]. Эксплуатационные свойства автомобиля связанные с движением, и к ним предъявляют специфические требования, к отдельным системам и узлам, непосредственно связаны с конструкцией узлов и систем автомобиля, поэтому на начальном этапе проектирования особое внимание уделяют анализу конструктивных решений и их влиянию на показатели эксплуатационных свойств. К ним выделяют: тягово-скоростные, топливная экономичность, тормозные свойства, управляемость и маневренность, устойчивость, проходимость, плавность хода [5–7].

Актуальность работы

С момента появления автомобильного транспорта, в машиностроительной области, возникла задача обоснования природы сил сцепления системы «колесо – поверхность дороги». Данная проблема была рассмотрена специалистами в области механики, триботехники и математики, которые искали ответ в виде решения контактных задач, позволяющих определить устойчивость мобильного транспортного средства для перевозки грузов с учетом кинематики упругого колеса при движении [8, 9].

Цель и задачи исследования

Целью работы является решение задач установления связи угловых скоростей тяги при заданных

значениях параметров и при условии отсутствия тангенциальных скольжений колес.

Задачи работы – определить устойчивость мобильного транспортного средства для перевозки грузов с учетом кинематики упругого колеса при движении.

Основная часть

В статье представлена математическая модель взаимодействия колеса и поверхности дороги с учетом кинематики упругого колеса, которое снабжено упругими шинами и жестко посажено на общую ось, вместе с которой свободно вращается в подшипниках тяги с определённой угловой скоростью и перекачивается по плоскости. Тяга движется с заданной скоростью прямолинейно и расстояние её от горизонтальной плоскости постоянно. Из-за податливостей шин колес ось колеса поворачивается относительно продольной оси, совпадающей с направлением оси тяги, и поворачивается на угол вокруг оси колеса, что, в свою очередь, вынуждает колесо поворачиваться в целом вокруг вертикальной оси [10–14].

Рассмотрим кинематическую схему. На рисунке 1 изображен скат, колеса которого снабжены упругими шинами (например, пневмобаллонами) и жестко посажены на общую ось C_1C_2 , вместе с которой свободно вращаются в подшипниках тяги DC с угловой скоростью ϕ и перекачиваются по плоскости.

Точка D тяги движется с заданной \vec{V}_D скоростью, прямолинейно и отстоит от горизонтальной плоскости на постоянном расстоянии h . Из-за податливостей шин колес ось ската поворачивается относительно продольной оси, совпадающей с направлением оси тяги DC на угол α и поворачивается на угол β вокруг оси ската, что в свою очередь вынуждает скат поворачиваться в целом вокруг вертикальной оси на угол γ .

Вопрос состоит в том, чтобы установить связь угловых скоростей $\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$, $\dot{\gamma}$; $\dot{\phi}$ со скоростью точки D тяги V_D при заданных значениях параметров

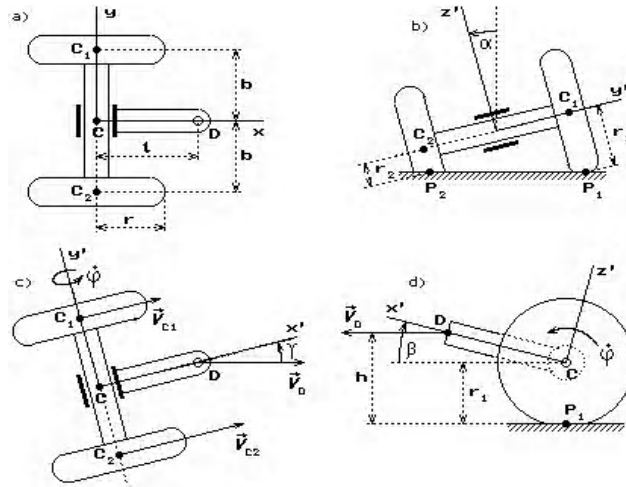


Рисунок 1 – Колесный скат с упругими шинами.

r, b, l, h и при условии отсутствия тангенциальных скольжений колес. Такого рода задачи возникают при изучении динамики различных транспортных средств, в том числе прицепов, широко используемых в настоящее время для перевозки грузов. Рассматривая тягу вместе со скатом как единое твердое тело, отвлекаясь пока от того обстоятельства, что фактически данная система представляет собой композицию двух взаимно подвижных тел, введем систему углов Крылова: α – крен, β – тангаж, γ – рысканье.

На представленном рисунке эти углы изображены, так сказать, в их «проекциях» на соответствующие координатные плоскости подвижной системы $x'y'z'$. Начало этой системы совместим с точкой C тяги, являющейся также общей и для оси ската. Подвижную ось x' направим вдоль тяги DC , ось y' – вдоль оси ската, z' – перпендикулярно тяге DC , чтобы система $x'y'z'$ являлась правой. На рис. 1, а – изображен скат в исходном, невозмущенном состоянии; показаны также две оси неподвижной системы координат x и y (ось z направлена перпендикулярно плоскости рисунка). Начало координат находится на плоскости качения.

В данном состоянии неподвижные оси x, y параллельны соответствующим осям x', y' , а ось z совпадает с z' . В силу принятых оговорок точка D тяги движется прямолинейно вдоль оси x , то есть расстояние от этой точки до плоскости сохраняется постоянным, равным h .

Таким образом, в неподвижной системе точка D имеет координаты $x_D(t), 0, h$ (здесь $x_D(t)$ – некоторая функция от времени и в данной задаче не играет существенной роли).

Введем в рассмотрение радиус-векторы \vec{r}_{Ck} ($k = 1, 2$), направленные от точки C к точкам C_k , и радиус-вектор \vec{r}_D , направленный из точки C в точку D . Очевидно, (рис. 1, а, с) в подвижной системе $x'y'z'$ эти векторы представляются в виде:

$$\vec{r}_{Ck} = \pm b \vec{j}', \quad \vec{r}_D = l \vec{i}' \quad (1)$$

где \vec{i}', \vec{j}' – орты соответствующих осей x, y . Здесь и далее верхний знак (в данном случае «плюс») соответствует $k = 1$, а нижний – $k = 2$.

Эти же векторы в проекциях на неподвижные оси представим в виде:

$$\begin{aligned} \vec{r}_{Ck} &= r_{Ckx} \vec{i} + r_{Cky} \vec{j} + r_{Ckz} \vec{k}, \\ \vec{r}_D &= r_{Dx} \vec{i} + r_{Dy} \vec{j} + r_{Dz} \vec{k}, \end{aligned} \quad (2)$$

причем проекции $r_{Ckx}, r_{Cky}, r_{Ckz}$ и r_{Dx}, r_{Dy}, r_{Dz} определяются с помощью известных формул преобразований и с учетом формулы (1):

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} r_{Ckx} \\ r_{Cky} \\ r_{Ckz} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \pm b \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} r_{Dx} \\ r_{Dy} \\ r_{Dz} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

Матрица направляющих косинусов A_{ij} для углов Крылова в силу принятых на рисунке 1, d углов имеет вид, который представлен в формуле (4).

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta \\ \cos \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где i нумерует строки, а j - столбцы приведенной матрицы.

Несложные вычисления согласно формул (3), и с учетом формулы (4) приводят к выражениям:

$$\left. \begin{aligned} r_{Ckx} &= \pm b A_{12}, & r_{Cky} &= \pm b A_{22}, & r_{Ckz} &= \pm b A_{32}, \\ r_{Dx} &= l A_{11}, & r_{Dy} &= l A_{21}, & r_{Dz} &= l A_{31}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Определим также координаты всех поименованных точек, используя формулы преобразования проекций векторов, которые с учетом формул (5) записываются в виде:

$$\begin{pmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_{Dx} \\ r_{Dy} \\ r_{Dz} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x_{Ck} \\ y_{Ck} \\ z_{Ck} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_{Ckx} \\ r_{Cky} \\ r_{Ckz} \end{pmatrix}.$$

Как было оговорено выше, $x_D = x_D(t)$, $y_D = 0$, $z_D = h$, и поэтому с помощью полученных соотношений будем иметь:

$$\begin{pmatrix} x_{Ck} \\ y_{Ck} \\ z_{Ck} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_D \\ 0 \\ h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_{Ckx} - r_{Dx} \\ r_{Cky} - r_{Dy} \\ r_{Ckz} - r_{Dz} \end{pmatrix}.$$

Из этих выражений особый интерес представляет z_{Ck} , так как это фактически является расстоянием от точек C_k до плоскости качения. Следовательно, как видно из рис 1, б,

$$z_{Ck} = r_k \cos \alpha,$$

где r_k - «радиус качения» k -го колеса.

Отсюда находим с учетом формул (5) и (6) значение:

$$r_k = \frac{h \pm b A_{32} - l A_{31}}{\cos \alpha}. \quad (7)$$

Скорости точек C_k и D в проекциях на неподвижные оси по формуле $\vec{v} = \vec{V}_C + \vec{\Omega} \times \vec{r}'$, в которой вектор \vec{r}' по сути дела есть векторы \vec{r}_{Ck} или \vec{r}_D , представленные своими проекциями на подвижные (1) и неподвижные (2) оси координат. Если использовать их проекции на неподвижные оси, то есть (5), то и вектор $\vec{\Omega}$ нужно представлять в проекциях на эти же оси. Поэтому воспользуемся для записи вектора $\vec{\Omega}$ выражениями:

$$\begin{aligned} \Omega_x &= \dot{\alpha} - \dot{\gamma} \sin \beta, & \Omega_y &= -\dot{\beta} \cos \alpha - \dot{\gamma} \sin \alpha \cos \beta, \\ \Omega_z &= -\dot{\beta} \sin \alpha + \dot{\gamma} \cos \alpha \cos \beta. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда в матричной форме получим:

$$\begin{pmatrix} V_{Ckx} \\ V_{Cky} \\ V_{Ckz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{Cx} \\ V_{Cy} \\ V_{Cz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{Ckx} \\ r_{Cky} \\ r_{Ckz} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} V_{Dx} \\ V_{Dy} \\ V_{Dz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{Cx} \\ V_{Cy} \\ V_{Cz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{Dx} \\ r_{Dy} \\ r_{Dz} \end{pmatrix}.$$

Во втором из этих матричных равенств учтем, что согласно с условиями задачи:

$$V_{Dx} = V_D, \quad V_{Dy} = 0, \quad V_{Dz} = 0,$$

и поэтому:

$$\begin{pmatrix} V_{Ckx} \\ V_{Cky} \\ V_{Ckz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_D \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{Ckx} - r_{Dx} \\ r_{Cky} - r_{Dy} \\ r_{Ckz} - r_{Dz} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Теперь рассмотрим вращение колес ската в подвижной системе координат $x'y'z'$. Очевидно, в этой системе колеса имеют лишь одну степень свободы - поворот вокруг оси y' на угол φ . То есть, в данном случае, имеем чистое вращение тела в неинерциальной системе координат.

Абсолютная скорость точек этого тела (скорость в проекциях на неподвижные оси) определяется формулой:

$$\vec{v} = \vec{V}_C + (\vec{\Omega} + \vec{j}'\dot{\varphi}) \times \vec{r}', \quad (10)$$

где \vec{r}' - радиус-вектор произвольной точки вращающихся колес.

С помощью формулы (10) запишем выражения для абсолютных скоростей точек контакта колес с плоскостью качения (точки P_k на рис. 1, б), подставив сюда вместо \vec{V}_C вектор \vec{V}_{Ck} , проекции которого определены соотношением (9), а вместо \vec{r}' - вектор \vec{r}_{Pk} , направленный из точки C_k в точку P_k .

Но для этого сперва учтем, что:

$$\vec{j}' = A_{12} \vec{i} + A_{22} \vec{j} + A_{32} \vec{k}, \quad (11)$$

а радиус-вектор $\vec{r}' = \vec{r}_{Pk}$ в неподвижных координатах представляется в записи:

$$\vec{r}_{Pk} = r_{Pkx} \vec{i} + r_{Pky} \vec{j} + r_{P kz} \vec{k}, \quad (12)$$

где обозначено:

$$\begin{aligned} r_{Pkx} &= -r_k \sin \alpha \sin \gamma, & r_{Pky} &= r_k \sin \alpha \cos \gamma, \\ r_{P kz} &= -r_k \cos \alpha. \end{aligned} \quad (13)$$

Подставляя выражения (12), (11) и (9) в (10), получим:

$$\begin{pmatrix} V_{Pkx} \\ V_{Pky} \\ V_{P kz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_D \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{Ckx} - r_{Dx} + r_{Pkx} \\ r_{Cky} - r_{Dy} + r_{Pky} \\ r_{Ckz} - r_{Dz} + r_{Pkz} \end{pmatrix} + \dot{\varphi} \begin{pmatrix} 0 & -A_{32} & A_{22} \\ A_{32} & 0 & -A_{12} \\ -A_{22} & A_{12} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{Pkx} \\ r_{Pky} \\ r_{Pkz} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

Так как достоверно известно, что проекция скорости точки P_k на вертикальную ось z тождественно равна нулю (плоскость качения считается недеформируемой), то из формулы (14) следуют два равенства:

$$\Omega_x (r_{Cky} - r_{Dy} + r_{Pky}) - \Omega_y (r_{Ckx} - r_{Dx} + r_{Pkx}) = \dot{\varphi} (A_{22} r_{Pkx} - A_{12} r_{Pky}) \quad (k = 1, 2). \quad (15)$$

Далее, представим компоненты скорости точек контакта V_{Pkx} и V_{Pky} в форме разложений по двум направлениям – параллельно плоскости соответствующего колеса и в перпендикулярном направлении. Обозначим эти составляющие соответственно символами V_{ik} (тангенциальная скорость) и V_{lk} (боковая или латеральная скорость).

Из рис. 1 легко установить, что:

$$\begin{aligned} V_{ik} &= V_{Pkx} \cos \gamma + V_{Pky} \sin \gamma, \\ V_{lk} &= -V_{Pkx} \sin \gamma + V_{Pky} \cos \gamma \end{aligned} \quad (16)$$

(здесь положительные направления V_{ik} и V_{lk} совпадают с направлениями соответственно осей x' и y'). Подставляя V_{Pkx} и V_{Pky} , вычисленные с помощью (15), в (16), получим формулы – (17), (18), (19).

$$\left. \begin{aligned} V_{ik} &= [V_D + \Omega_y (r_{Ckz} - r_{Dz} + r_{Pkz}) - \Omega_z (r_{Cky} - r_{Dy} + r_{Pky}) + \\ &\quad + \dot{\varphi} (A_{22} r_{Pkz} - A_{32} r_{Pky})] \cos \gamma + \\ &+ [\Omega_z (r_{Ckx} - r_{Dx} + r_{Pkx}) - \Omega_x (r_{Ckz} - r_{Dz} + r_{Pkz}) + \dot{\varphi} (A_{32} r_{Pkx} - A_{12} r_{Pkz})] \sin \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} V_{lk} &= -[V_D + \Omega_y (r_{Ckz} - r_{Dz} + r_{Pkz}) - \Omega_z (r_{Cky} - r_{Dy} + r_{Pky}) + \\ &\quad + \dot{\varphi} (A_{22} r_{Pkz} - A_{32} r_{Pky})] \sin \gamma + \\ &+ [\Omega_z (r_{Ckx} - r_{Dx} + r_{Pkx}) - \Omega_x (r_{Ckz} - r_{Dz} + r_{Pkz}) + \dot{\varphi} (A_{32} r_{Pkx} - A_{12} r_{Pkz})] \cos \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} &[V_D + \Omega_y (r_{Ckz} - r_{Dz} + r_{Pkz}) - \Omega_z (r_{Cky} - r_{Dy} + r_{Pky}) + \\ &\quad + \dot{\varphi} (A_{22} r_{Pkz} - A_{32} r_{Pky})] \cos \gamma + \\ &+ [\Omega_z (r_{Ckx} - r_{Dx} + r_{Pkx}) - \Omega_x (r_{Ckz} - r_{Dz} + r_{Pkz}) + \dot{\varphi} (A_{32} r_{Pkx} - A_{12} r_{Pkz})] \sin \gamma = 0 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Для отсутствия тангенциального скольжения колес необходимо и достаточно равенство нулю тангенциальной скорости, то есть $V_{ik} = 0$. Это означает, что через точки проходит мгновенная ось вращения ската. Итак, два уравнения, полученные с помощью (17), совместно с двумя уравнениями (15) дают возможность однозначного представления четырех переменных $\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\varphi}$ в форме линейной зависимости от скорости V_D . В этом случае латеральные (боковые) скорости V_{l1} и V_{l2} , вычисляемые по формулам (18), оказываются одинаковыми ($V_{l1} = V_{l2}$) и не равными нулю. Это означает, что при отсутствии тангенциальных скольжений скат неизбежно испытывает боковое скольжение.

Полученные соотношения (17), (18) и (19) используются при записи уравнений динамики, рассматриваемой системы в форме уравнений Лагранжа или Эйлера, для решения важных для практики задач устойчивости движения [15,16].

Выводы

- Данная работа содержит новые результаты и может быть с успехом использована при расчетах и проектировании кинематики упругого колеса;
- уравнений динамики изучаемой системы в форме уравнений Лагранжа или Эйлера рассматривает решение важных практических задач устойчивости движения.

Литература

1. Маркина, А. А. Теория движения колесных машин : учебное пособие / А. А. Маркина, В. В. Давыдова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2021. – 216 с. – Текст : непосредственный.
2. Хусаинов, А. Ш. Эксплуатационные свойства автомобиля : учебное пособие для студентов : [по направлениям подготовки «Наземные транспортно-технологические комплексы» по профилю 190100.62 -Автомобиле- и тракторостроение] / А. Ш. Хусаинов ; Ульяновский государственный технический университет, кафедра «Автомобили». – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 109 с. – Текст : непосредственный.
3. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля : учебное пособие для студентов : [по специальности 190201(150100)-Автомобиле- и тракторостроение] / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – 478 с. – Текст : непосредственный.
4. Акулова, А. А. Основы конструкции автомобилей : учебное пособие для студентов : [по направлениям подготовки 23.03.02 – Наземные транспортно-технологические машины, 23.03.03 – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 23.05.02 – Транспортные средства специального назначения] / А. А. Акулова, Ю. Н. Строганов ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2017. – 168 с. – Текст : непосредственный.
5. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон, В. Э. Наумова, А. А. Спектора. – Москва : Мир, 1989. – 509 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ Р 52051-2003. Механические транспортные средства и прицепы. Классификация и определения = Power-driven vehicles and trailers. Classification and definitions : Государственный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утверждено и введено в действие Постановлением Государства России от 7 мая 2003 г. № 139-ст : введен впервые : дата введения 2004-01-01 / разработан Всероссийским научно-исследовательским институтом стандартизации и сертификации в машиностроении (ВНИИНМАШ). – Москва : Стандартинформ, 2003 г. – 15 с. – Текст : непосредственный.
7. Ляпушин, Н. Н. Модель физических процессов в пятне контакта при движении колеса по рельсу со скольжением / Н. Н. Ляпушин, А. Н. Савоськин. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта : научно-технический и производственный журнал. – 2008. – № 1. – С. 33–42.
8. Максак, В. И. Предварительное смещение и жёсткость механического контакта / В. И. Максак. – Москва : Наука, 1975. – 60 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Markina, A. A.; Davydova, V. V. Theory of movement of wheeled vehicles : textbook / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural Federal University the first President of Russia B. N. Yeltsin. – Ekaterinburg : Ural University Publishing House, 2021. – 216 p. – Text : direct. (in Russian)
2. Khusainov, A. Sh. Operational properties of a car : a textbook for students : [in the areas of training «Ground transport and technological complexes» in profile 190100.62 -Automobile- and tractor engineering] / Ulyanovsk State Technical University, Department of Automobiles. – Ulyanovsk : Ulyanovsk State Technical University, 2011. – 109 p. – Text : direct. (in Russian)
3. Tarasik, V. P. Theory of car motion : a textbook for students : [in specialty 190201(150100)-Automobile- and tractor engineering] / St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2006. – 478 p. – Text : direct. (in Russian)
4. Akulova, A. A.; Stroganov, Yu. N. Fundamentals of automobile design : a textbook for students : [in areas of training 23.03.02 – Ground transport-technological machines, 23.03.03 – Operation of transport-technological machines and complexes, 23.05.03 – Special vehicles appointments] / Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. – Ekaterinburg: Ural University Publishing House, 2017. – 168 p. – Text : direct. (in Russian)
5. Johnson, K.; Naumova, V. E.; Spector, A. A. Mechanics of contact interaction. – Moscow : Mir, 1989. – 509 p. – Text : direct. (in Russian)
6. GOST R 52051-2003. Power-driven vehicles and trailers. Classification and definitions : State standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Resolution of the State Standard of Russia dated May 7, 2003 № 139-st : introduced for the first time: date of introduction 2004-01-01 / developed by the All-Russian Scientific Research Institute of Standardization and certification in mechanical engineering (VNIINMASH). – Moscow : Standardinform, 2003. – 15 p. – Text : direct. (in Russian)
7. Lyapushin, N. N.; Savoskin, A. N. Model of physical processes in the contact patch when a wheel moves along a sliding rail. – Text : direct. – In: *Science and technology of transport: scientific, technical and production journal*. – 2008. – № 1. – P. 33–42. (in Russian)
8. Maksak, V. I. Preliminary displacement and rigidity of mechanical contact. – Moscow : Nauka, 1975. – 60 p. – Text : direct. (in Russian)
9. Goryacheva, I. G. Mechanics of frictional interaction. – Moscow : Nauka, 2001. – 478 p. – Text : direct. (in Russian)
10. Bazhenov, E. E.; Chuprov, I. V. Fundamentals of the theory of operational properties of cars and tractors: textbook / Ministry of Education and Science of Russia, Federal State Budgetary Educational Institution of

9. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – Москва : Наука, 2001. – 478 с. – Текст : непосредственный.
10. Баженов, Е. Е. Основы теории эксплуатационных свойств автомобилей и тракторов : учебное пособие / Е. Е. Баженов, И. В. Чупров ; Минобрнауки России, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет». – Екатеринбург : УГЛТУ, 2013. – 112 с. – Текст : непосредственный.
11. Смирнов, Г. А. Теория движения колесных машин / Г. А. Смирнов. – Москва : Машиностроение, 1990. – 352. – Текст : непосредственный.
12. Раймпель, Й. Шасси автомобиля / Й. Раймпель. – Москва : Машиностроение, 1983. – 356 с. – Текст : непосредственный.
13. Раймпель, Й. Шасси автомобиля: Амортизаторы, шины и колеса / Й. Раймпель. – Москва : Машиностроение, 1986. – 320 с. – Текст : непосредственный.
14. Genta, G. The Automotive Chassis : Volume 1 : Components Design / G. Genta, L. Morello. – Springer Science and Business Media, 2008. – 627 p. – Text : direct.
- Higher Professional Education «Ural State Forestry University». – Ekaterinburg : UGFLTU, 2013. – 112 p. – Text : direct. (in Russian)
11. Smirnov, G. A. Theory of movement of wheeled vehicles. – Moscow : Mechanical Engineering, 1990. – 352. – Text : direct. (in Russian)
12. Reimpel, J. Car chassis. – Moscow : Mechanical Engineering, 1983. – 356 p. – Text : direct. (in Russian)
13. Reimpel, J. Car chassis: Shock absorbers, tires and wheels. – Moscow : Mechanical Engineering, 1986. – 320 p. – Text : direct. (in Russian)
14. Genta, G.; Morello L. The Automotive Chassis : Volume 1 : Components Design. – Springer Science and Business Media, 2008. – 627 p. – Text : direct.

Савенко Эдуард Станиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология ремонта автомобилей.

Машура Андрей Юрьевич – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология ремонта автомобилей.

Шаповалов Владимир Дмитриевич – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология ремонта автомобилей.

Мазур Владимир Дмитриевич – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология ремонта автомобилей.

Удовенко Сергей Викторович – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология ремонта автомобилей.

Savenko Eduard – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automotive Transport, Service and Operation FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: car repair technology.

Mashura Andrey – master's student of the Department of Automotive Transport, Service and Operation FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: car repair technology.

Shapovalov Vladimir – master's student of the Department of Automotive Transport, Service and Operation FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: car repair technology.

Mazur Vladimir – master’s student of the Department of Automotive Transport, Service and Operation FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: car repair technology.

Udovenko Sergey – master’s student of the Department of Automotive Transport, Service and Operation FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: car repair technology.