

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-68-76

УДК 629.114.2

Э. И. ЯСЮКОВИЧ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО КУРСОВОГО ДВИЖЕНИЯ ТРЕХОСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Аннотация

Разработаны имитационная математическая модель курсового движения трехосной колесной машины с учетом вертикальной динамики и программное обеспечение для оценки влияния положения линии мгновенных центров поворота управляемых колес на ее курсовую устойчивость и управляемость.

Ключевые слова:

трехосная колесная машина, имитационная математическая модель, линия мгновенных центров поворота управляемых колес, вертикальная динамика, курсовая устойчивость, управляемость.

Для цитирования:

Ясюкович, Э. И. Имитационное моделирование управляемого курсового движения трехосных колесных машин / Э. И. Ясюкович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 68–76.

Введение

Эффективность управляемого движения, курсовая устойчивость и управляемость многоосных грузовых колесных машин существенно зависят от их массогеометрических параметров, упругодиссипативных характеристик подвески и шин, а также от положения линии мгновенных центров поворота их управляемых колес [1–3].

В работе для оценки влияния положения указанной линии на перечисленные показатели разработаны имитационная математическая модель и соответствующее программное обеспечение (ПО). Разработанное ПО позволяет выполнять расчетные исследования управляемого курсового движения грузовых трехосных колесных машин по недеформируемой опорной поверхности со случайным макро- и микропрофилем, а также оценить влияние основных массогеометрических параметров, упругодиссипативных характеристик подвески и шин на курсовую устойчивость и управляемость названных машин.

Основная часть

Возникающие при курсовом движении колесных машин боковые реакции опорной поверхности на их шины зависят от кривизны траектории движения и вертикальных реакций дороги. Поэтому разрабатываемые имитационные математические модели курсового движения названных машин должны содержать не только уравнения курсового движения, но и уравнения вертикальной динамики подрессоренной и непрорессоренных масс, необходимые для определения боковых составляющих указанных вертикальных реакций.

При управляемом курсовом движении колесных машин без бокового проскальзывания шин нормали к их вертикальным плоскостям должны пересекаться в одной точке на линии мгновенных центров поворота – точке O (рис. 1).

Указанная линия перпендикулярна центральной продольной оси остова колесной машины, а эффективность ее управляемого курсового движения зависит от положения указанной линии, которая определяется соотношением

углов поворота управляемых колес ее передней, средней и задней осей при

выполнении криволинейного движения.

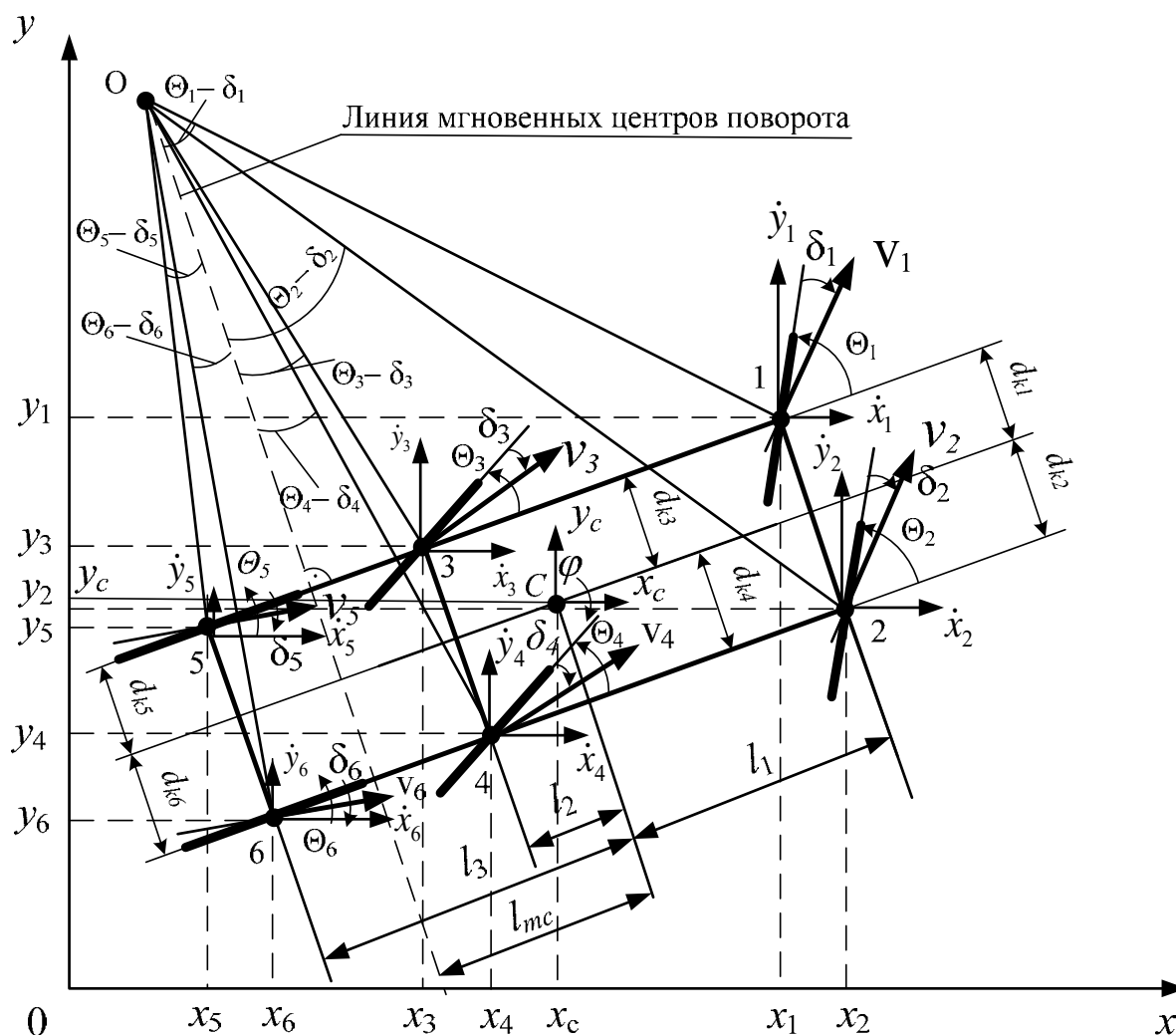


Рис. 1. Расчетная схема курсового движения трехосной колесной машины

В расчетной схеме (см. рис. 1) используются следующие независимые обобщенные координаты: x_c, y_c, z_c – перемещения центра масс колесной машины по продольной Ox , поперечной Oy и вертикальной Oz осям; $z_1 \dots z_6$ – вертикальные перемещения центров неподрессоренных масс (колес); φ, Ψ, Φ – курсовой угол, углы бокового крена и тангажа остова; $\lambda_1 \dots \lambda_6$ – углы увода шин колес.

Параметры l_1, l_2, l_3, l_{mc} – это массогеометрические параметры, определяющие расстояния от центра масс ко-

лесной машины до центров ее передней, средней, задней осей и до точки проекции нормали из точки O на продольную ось колесной машины; $\Theta_1 \dots \Theta_6$ – углы поворота управляемых колес вокруг их вертикальных осей; $d_{k1}, d_{k2}, d_{k3}, d_{k4}, d_{k5}, d_{k6}$ – левая и правая половины ширины колеи передней, средней и задней осей; $v_1 \dots v_6$ – линейные продольные скорости перемещения центров колес.

Поскольку разрабатываемая математическая модель содержит два компонента – курсовое движение и вертикальная динамика, то для вывода ди-

намических уравнений ее курсового движения использовалась также расчетная

схема вертикальной динамики (рис. 2).

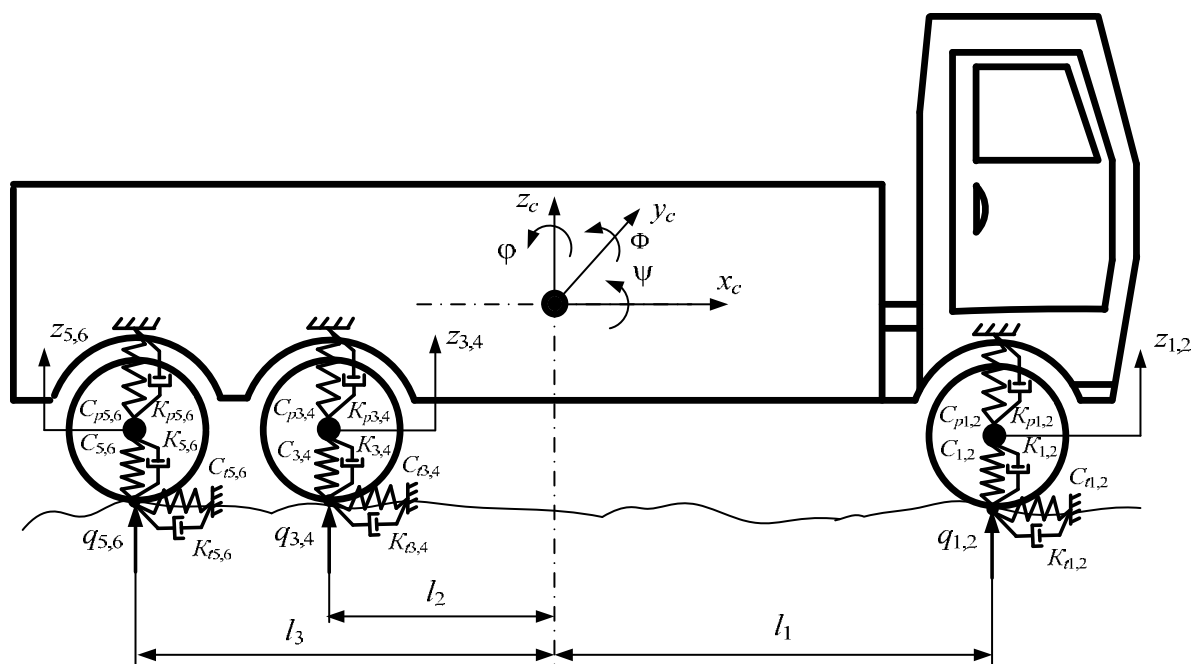


Рис. 2. Расчетная схема вертикальной динамики трехосной колесной машины

Приведенные на рис. 2 обозначения соответствуют упругим и диссипативным характеристикам шин: $C_1 \dots C_6$ – нормальные жесткости шин; $C_{t1} \dots C_{t6}$ – тангенциальные жесткости шин; $C_{p1} \dots C_{p6}$ – жесткости элементов подвески; $k_1 \dots k_6$ – нормальные демпфирования шин; $k_{t1} \dots k_{t6}$ – тангенциальные демпфирования шин; $k_{p1} \dots k_{p6}$ – демпфирования элементов подвески.

В обозначениях параметров и обобщенных координат расчетных схем нечетные индексы относятся к левому борту машины, а четные – к правому.

Приведенная на рис. 1 расчетная схема использовалась для вывода уравнений курсового движения и кинематических связей шин колес с опорной поверхностью, а расчетная схема, представленная на рис. 2, – для вывода уравнений вертикальной динамики и вычисления нормальных реакций опорной поверхности и упругих сил в амортизаторах колесной машины, а также для вывода динамических уравнений про-

дольно- и поперечно-угловых перемещений ее подрессоренной массы.

Для вычисления боковых реакций опорной поверхности на шины колес колесной машины были получены уравнения их кинематических связей с поверхностью дороги, разработанные на основе расчетной схемы ее курсового движения, представленной на рис. 1.

При движении колесной машины по реальным дорогам ее остов совершает продольно-поперечные и вертикальные колебания, в результате чего изменяются сцепления шин ее колес с опорной поверхностью. Указанные сцепления влияют на боковые скольжения шин, особенно при криволинейном движении. Поэтому, как отмечалось выше, для повышения точности имитационного моделирования управляемого курсового движения колесной машины ее математическая модель, кроме уравнений курсового движения, содержит уравнения вертикальной динамики.

Таким образом, разработанная ма-

тематическая модель курсового движения трехосной колесной машины разработана с учетом продольно-поперечных, вертикальных и угловых колебаний ее остова, а также вертикальных колебаний колес.

Технология разработки таких имитационных моделей подробно рассмотрена в [4, 5].

Разработанная имитационная математическая модель курсового движения трехосной колесной машины со всеми управляемыми колесами представлена в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

Разработанная имитационная математическая модель курсового движения трехосной колесной машины со всеми управляемыми колесами представлена в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
 \ddot{x}_c &= \left\{ -\sum_{i=1}^3 \{Y_i \sin(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + (P_{ki} - P_{ii}) \cos(\varphi + \Theta_i - \delta_i)\} - \right. \\
 &\quad \left. - \sum_{i=5}^6 \{Y_i \sin(\varphi - \Theta_i + \delta_i) + (P_{ki} - P_{ii}) \cos(\varphi - \Theta_i + \delta_i)\} \right\} / m; \\
 \ddot{y}_c &= \left\{ \sum_{i=1}^3 \{Y_i \cos(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + (P_{ki} - P_{ii}) \sin(\varphi + \Theta_i - \delta_i)\} + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{i=5}^6 \{Y_i \cos(\varphi - \Theta_i + \delta_i) + (P_{ki} - P_{ii}) \sin(\varphi - \Theta_i + \delta_i)\} \right\} / m; \\
 \ddot{\varphi} &= \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^2 \{Y_i [l_i \cos(\Theta_i - \delta_i) \mp d_i \sin(\Theta_i - \delta_i)] + \\
 &\quad + (P_{ki} + P_{ii}) [l_j \sin(\Theta_i - \delta_i) \pm d_i \cos(\Theta_i - \delta_i)] \} / J_z; \\
 \ddot{z}_c &= \sum_{i=1}^6 P_{ni} / m; \quad \ddot{z}_i = (P_i - P_{ni}) / m_i, \quad i = 1 \dots 6; \\
 \ddot{\psi} &= \left(\sum_{i=1}^6 \mp P_i d_i - F_c h_c \right) / j_x; \quad \ddot{\Phi} = \sum_{i=1}^3 (P_{i1} l_i + P_{i2} l_i) / J_y; \\
 \dot{\delta}_i \{ &\dot{x}_c \cos(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + \dot{y}_c \sin(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + \ddot{\varphi} [l_j \sin(\Theta_i - \delta_i) \mp \\
 &\mp d_i \cos(\Theta_i - \delta_i)] \} = \ddot{x}_c \sin(\varphi + \Theta_i - \delta_i) - \ddot{y}_c \cos(\varphi + \Theta_i - \delta_i) - \\
 &- \ddot{\varphi} [l_i \cos(\Theta_i - \delta_i) \pm d_i \sin(\Theta_i - \delta_i)] - \dot{\varphi}^2 [l_j \sin(\Theta_i - \delta_i) \mp \\
 &\mp d_i \cos(\Theta_i - \delta_i)] + (\dot{\varphi} + \dot{\Theta}_i) [\dot{x}_c \cos(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + \\
 &+ \dot{y}_c \sin(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + \ddot{\varphi} [l_i \sin(\Theta_i - \delta_i) \mp d_i \cos(\Theta_i - \delta_i)]], \quad i = 1, 6.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Индекс j в последнем уравнении системы (1) принимает следующие значения: при $i = 1$ и $i = 2$ индекс $j = 1$; при $i = 3$ и $i = 4$ индекс $j = 2$; при $i = 5$ и $i = 6$ индекс $j = 3$.

Центробежная сила, действующая относительно продольной оси, проходящей через центр масс автомобиля, вычислялась по формуле

$$F_c = m v_c^2 / r_{tr},$$

где v_c , r_{tr} – продольная скорость и радиус криволинейной траектории движения колесной машины.

Приведенная система дифференциальных уравнений (1) объединяет уравнения курсового движения – первое–третье уравнения, вертикальной

динамики – четвертое-пятое; продольно- и поперечно-угловых колебаний подрессоренной массы – шестое и седьмое, а также уравнения кинематических связей шин колес машины с опорной поверхностью – последнее уравнение, используемое для вычисления углов увода шин каждого колеса.

Для вычисления действующих в пятнах контактов шин колес с опорной поверхностью боковых реакций Y_i опорной поверхности, определяющих характер курсового движения колесной машины, использовалась формула

$$Y_i = k_{u_i} \delta_i, \quad i = 1 \dots 6, \quad (2)$$

где k_{u_i} – коэффициент сопротивления боковому уводу шины i -го колеса.

Значения коэффициентов k_{u_i} зависят от нормальных и тангенциальных сил, приложенных к колесам, давления воздуха в шинах, характеристик дорожной поверхности и т. д. [1, 3].

При моделировании курсового движения колесной машины на протяжении длительного времени значения коэффициентов k_{u_i} необходимо уточнять на каждом шаге интегрирования уравнений движения.

Полученная математическая модель имитационного движения курсового движения колесной машины разработана для случая отсутствия отрыва шин ее колес от дорожной поверхности и их бокового проскальзывания при движении по криволинейной траектории.

Разработанный алгоритм решения поставленной задачи предусматривает ввод массогеометрических параметров колесной машины, упругодиссипативных характеристик ее элементов и значений начальных условий интегрирования.

Интегрирование системы дифференциальных уравнений (1) выполнялось с учетом вычисляемых ординат неровностей микропрофиля опорной поверхности, а также задаваемого закона изменения скорости угла поворота ру-

левого колеса, определяющего траекторию движения колесной машины.

В процессе численного интегрирования уравнений движения колесной машины создается файл результатов моделирования, на основе которого формируются графические зависимости процессов ее управляемого курсового движения.

Файл результатов расчетных исследований представляется в виде строк, в каждой из которых содержатся такие параметры, как время интегрирования, ординаты и скорости изменения неровностей микропрофиля дороги, значения обобщенных координат динамических уравнений и их скоростей, а также значения углов увода шин колес, реакции опорной поверхности на шины колес и другие параметры.

Алгоритм предусматривает также управление продольной скоростью движения колесной машины при выполнении маневров, а также фиксацию момента начала бокового скольжения ее колес, если оно имеет место.

Расчетные исследования проводились на дорогах с различными параметрами микропрофиля на протяжении времени моделирования 400 с и более.

По получаемым результатам строились графические зависимости изменения во времени параметров курсового движения колесной машины, а также круговые траектории перемещения ее центра масс. На рис. 3 приведен вариант результатов имитационного моделирования курсового движения по круговой траектории со скоростью 90 км/ч по горизонтальной дороге со случайным микропрофилем на интервале времени от 0 до 55 с, т. е. зависимости от времени: 1–3 – продольного и поперечного перемещения координат центра масс колесной машины и изменения ее курсового угла; 4–9 – углов поворота управляемых колес; 10–15 – углов увода шин.

Из приведенного рисунка видно, что в течение времени моделирования

колесная машина совершила более двух оборотов (линия 3) и выдерживала заданную круговую траекторию движения радиусом 5,9 м (см. рис. 3).

Каждый оборот движения совершался за 27,5 с. После совершения каждого оборота значение обобщенной координаты φ обнулялось. Как видно из рис. 3, в процессе моделирования линейные координаты перемещения центра масс колесной машины x_c и y_c опи-

сывают синусоиды с периодом 27,5 с. Углы поворота управляемых колес (линии 4–9) изменялись в соответствии с принятыми законами их изменения, а углы увода шин после входа колесной машины в режим движения по круговой траектории через 6 с стабилизировались (линии 10–15).

На рис. 4 приведена фазовая траектория движения колесной машины по круговой траектории.

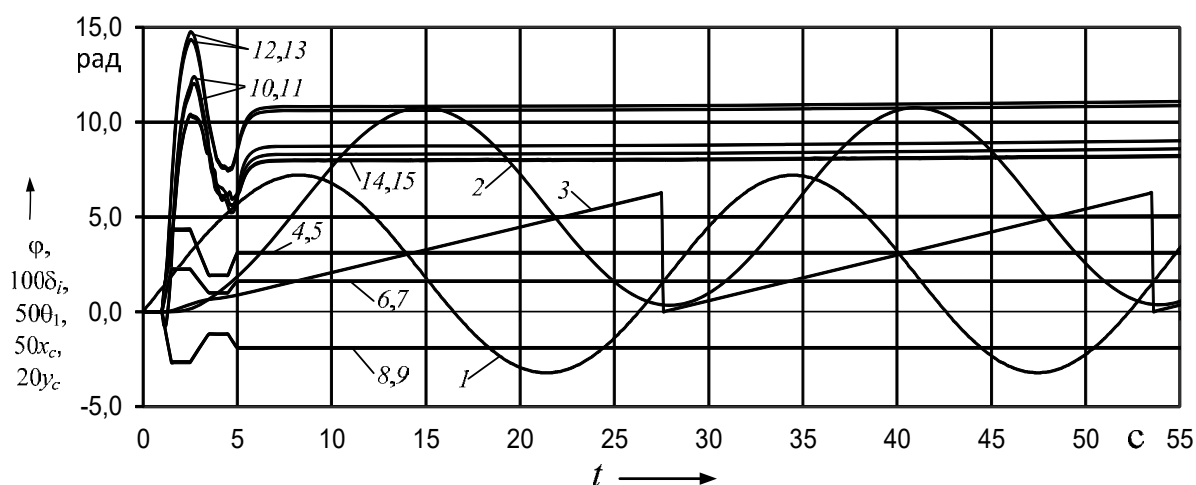


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования управляемого курсового движения колесной машины со скоростью 90 км/ч по круговой траектории

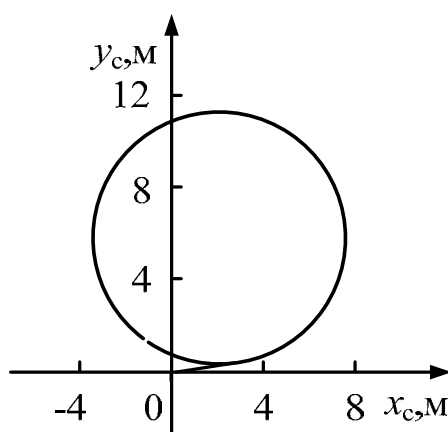


Рис. 4. Фазовая траектория в координатах XOY перемещения центра масс колесной машины при движении ее по кругу

Из приведенного рисунка видно, что движение колесной машины проис-

ходило строго по окружности без бокового скольжения шин ее колес.

На рис. 5 приведены фазовые траектории курсового движения центра масс колесной машины в координатах XOY с различными значениями расстояний от передней и средней осей до линии ее мгновенных центров поворота. Из рисунка видно, что с уменьшением расстояния от передней оси l_1 и увели-

чением его от средней оси l_2 до линии мгновенных центров поворота диаметр траектории движения колесной машины уменьшается. При этом при проведении расчетных экспериментов расстояние $(l_1 + l_2)$ между передней и средней осями не изменялось.

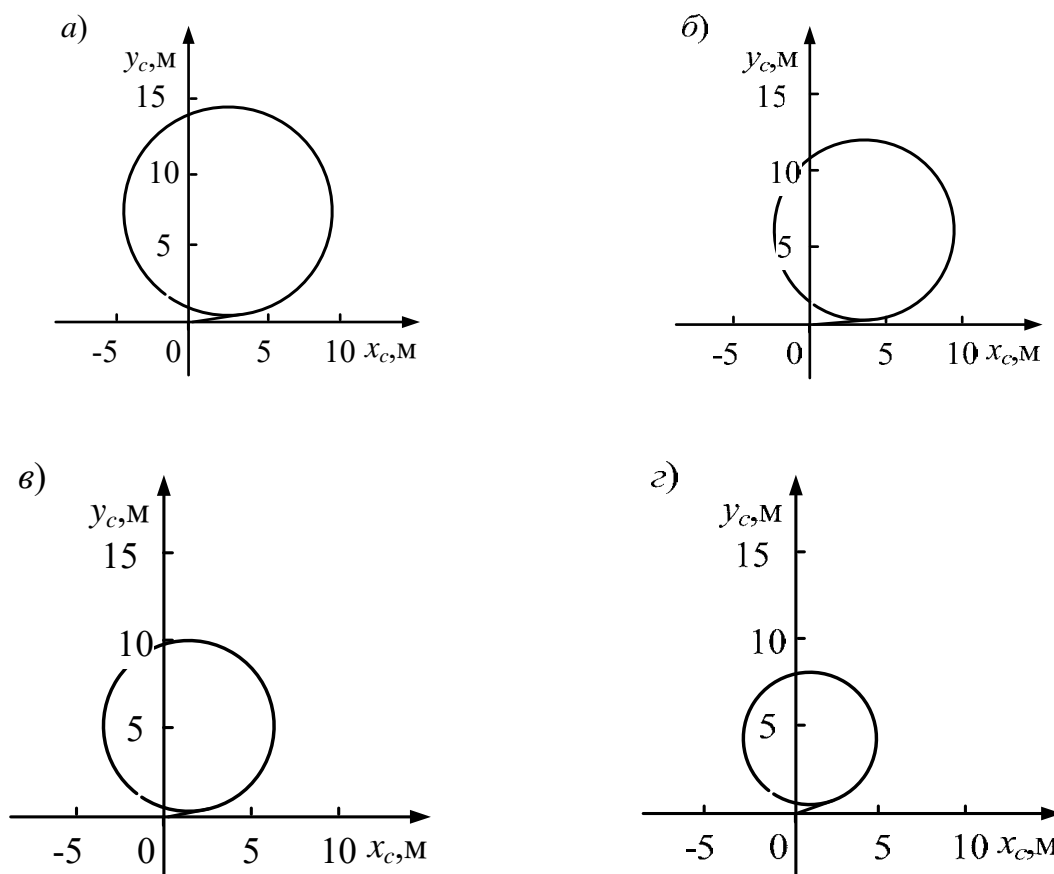


Рис. 5. Фазовые траектории в координатах XOY перемещения центра масс колесной машины при движении ее по кругу при различных значениях расстояний от линии мгновенных центров поворота до передней l_1 и средней l_2 осей: $l_1 = 9$ м, $l_2 = 3$ м (а); $l_1 = 8$ м, $l_2 = 4$ м (б); $l_1 = 7$ м, $l_2 = 5$ м (в); $l_1 = 6$ м, $l_2 = 6$ м (г)

Как видно из приведенных на рис. 5 траекторий движения, смещение линии мгновенных центров поворота колесной машины к среднему мосту приводит к уменьшению радиуса окружности кругового движения ее центра масс.

Результаты имитационного моделирования вертикальной динамики колесной машины при совершении маневра «Смена полосы движения» на дороге

со случайным микропрофилем представлены на рис. 6, на котором отображены графические зависимости от времени следующих ее независимых координат: 1 – вертикальные перемещения центра масс; 2–4 – вертикальные перемещения центров колес левого борта; 5–7 – вертикальные перемещения центров колес правого борта; 8, 9 – поперечно- и продольно-угловые перемещения поддресоренной массы.

Анализ результатов моделирования (см. рис. 6) показывает, что первую секунду колесная машина, движущаяся со скоростью 72 км/ч, перемещалась прямолинейно по оси Ox . Начиная со второй секунды, она начала поворачиваться против часовой стрелки, выполняя маневр «Смена полосы движения»,

и вертикальные перемещения центров масс колес ее левого борта перемещались вверх (графики 2–4), а правого – вниз (графики 5–7).

На рис. 7 приведена траектория курсового движения колесной машины при совершении маневра «Смена полосы движения».

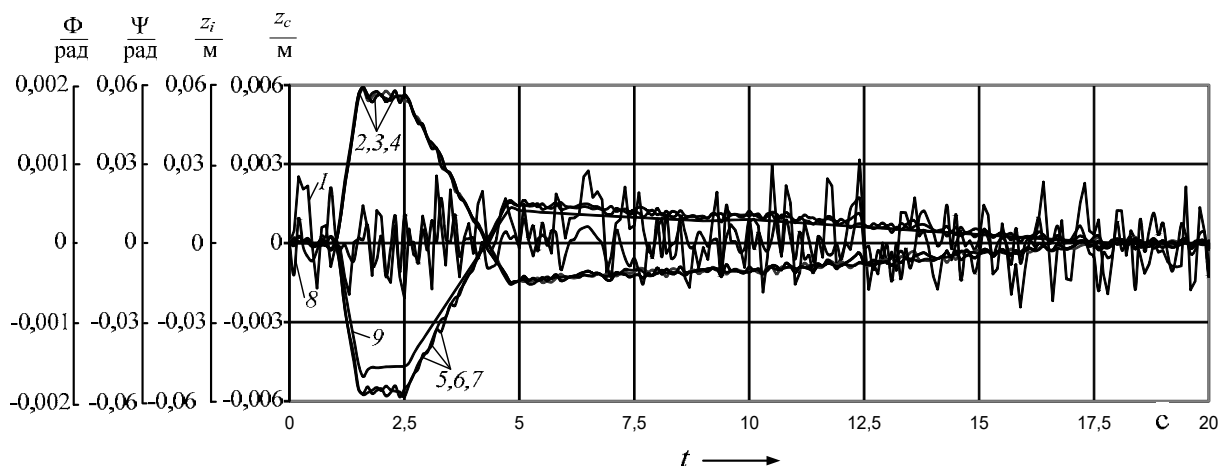


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования вертикальной динамики движения трехосной колесной машины при движении ее по траектории «Смена полосы движения» со скоростью 72 км/ч по дороге со случайным микропрофилем

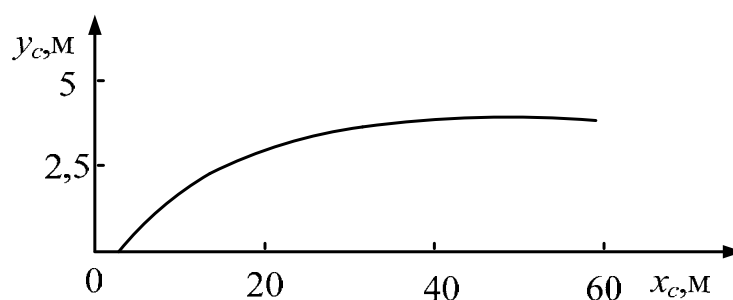


Рис. 7. Траектория движения колесной машины при совершении маневра «Смена полосы движения»

Приведенные на рис. 3–7 результаты имитационного моделирования курсового движения трехосных колесных машин подтверждают работоспособность разработанной математической модели и программного обеспечения, позволяющего моделировать их

движение по любым траекториям на дорогах различных категорий.

Выводы

Разработана имитационная математическая модель, которая может эф-

фактивно использоваться для оценки влияния положения линии мгновенных центров поворота управляемых колес трехосной колесной машины, ее массо-геометрических параметров и упруго-диссипативных свойств подвески и шин на курсовую устойчивость и управляемость.

Проведены расчетные исследования и получены достоверные результаты в виде различных траекторий управляемого курсового движения по неде-

формируемой опорной поверхности со случайным микропрофилем при совершении маневров по круговой траектории и траектории «Смена полосы движения».

Получены результаты, позволяющие оценить влияние расстояний от линии мгновенных центров поворота до передней и средней осей колесной машины на радиус кривизны ее траектории движения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов, А. А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей / А. А. Антонов. – Москва: Машиностроение, 1979. – 216 с.: ил.
2. Литвинов, А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А. С. Литвинов. – Москва: Машиностроение, 1971. – 416 с.: ил.
3. Динамика колесных машин : монография / И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – 462 с.: ил.
4. Ясюкович, Э. И. Имитационное моделирование курсового движения трехосного автомобиля со всеми управляемыми колесами / Э. И. Ясюкович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 60–67.
5. Ясюкович, Э. И. Разработка методики виртуальных испытаний курсовой устойчивости трехосных автомобилей / Э. И. Ясюкович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 59–69.

Статья сдана в редакцию 15 января 2024 года

Контакты:

ed50m@mail.ru (Ясюкович Эдвард Игнатьевич).

E. I. YASYUKOVICH

SIMULATION MODELING OF STEERABLE DIRECTIONAL MOVEMENT OF THREE-AXLE WHEELED VEHICLES

Abstract

A simulation mathematical model for the directional movement of a three-axle wheeled vehicle with regard to vertical dynamics has been developed, as well as software evaluating how the position of the line of instantaneous centers of rotation of vehicles' steered wheels affects vehicle directional stability and steerability.

Keywords:

three-axle wheeled vehicle, simulation mathematical model, line of instantaneous centers of rotation of steered wheels, vertical dynamics, directional stability, steerability.

For citation:

Yasyukovich, E. I. Simulation modeling of steerable directional movement of three-axle wheeled vehicles / E. I. Yasyukovich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 68–76.