

**К АНАЛИТИЧЕСКОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ ПОВОРАЧИВАЕМОСТИ
ТРЕХКОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

МОЙСЯ Д. Л., БОБРОВ В. В.

**(Донецкая академия транспорта;
г. Донецк, Донецкая Народная Республика)**

Рассмотрены уточненные уравнения плоскопараллельного движения модели трехколесного микроавтомобиля с закрепленным рулевым управлением, получены значения углов поворота управляемого модуля, обеспечивающие движение по окружности с постоянным радиусом при вариации продольной скорости; определен градиент недостаточной поворачиваемости.

Ключевые слова: *трехколесный микроавтомобиль, управляемый модуль, градиент недостаточной поворачиваемости.*

Постановка проблемы. Криволинейное движение характеризуется поперечной составляющей скорости центра масс, радиусом поворота, углами поворота управляемых колес и интенсивностью изменения этих величин в случае произвольного (непостоянного) движения. Существенное уменьшение длины, ширины и увеличение угла поворота управляемого модуля, реализованное в трехколесном экипаже, позволяют значительно улучшить оценочные показатели маневренности. Однако, переход к такой схеме требует дополнительных исследований, связанных с учетом нелинейности сил отвода, изменением колесной базы в процессе управления и поворачиваемости самого экипажа.

Анализ существующих исследований. Одно из направлений исследования маневренности трехколесного экипажа связано с определением устойчивых круговых стационарных режимов [1; 2]. Наряду с численным интегрированием дифференциальных уравнений движения модели, что дает возможность проследить всю эволюцию изменения фазовых переменных, поперечного ускорения и радиуса кривизны при входе экипажа в поворот, возможен анализ стационарных режимов на основе итерационных численных методов. Это позволяет определить все множество возможных стационарных режимов и далее выделить среди них устойчивые, то есть реализованные на практике. Эти два подхода дополняют друг друга и могут гарантировать необходимую точность вычислений.

В научных публикациях, посвященных проблемам маневренности, наибольшее внимание уделяется проблемам маневренности автопоездов [3; 4], задача в этом случае сводится к выбору надлежащего управления, что обеспечивает

отслеживание траектории ведущего звена, отличающейся от траектории с минимально возможным радиусом, ведомыми звеньями. В связи с этим, требуют уточнения постановки задач по определению предельных маневренных свойств и поворачиваемости экипажа, что особенно актуально для трехколесного экипажа (учет нелинейных зависимостей сил отвода при наличии развала [5; 6], реального положения пятна контакта, изменчивости колесной базы, что обусловлено конструктивными особенностями компоновки микроавтомобиля).

Цель статьи. Определение градиента недостаточной поворачиваемости, относительно трехколесного экипажа с учетом наклона оси управляемого модуля.

Точность определения параметров кругового стационарного режима зависит от полноты и степени адекватности математической модели. На рисунке 1 изображена расчетная схема 3-колесного экипажа (один из геометрических параметров R_D определяет расстояние от центра поворота до точки D на продольной оси экипажа, второй L_{CD} – расстояние от центра масс C до точки D), учитывающий основные геометрические характеристики реального прототипа. Так при повороте управляемого модуля на угол ψ_0 , реализуется развал χ_0 – следствие продольного наклона передней стойки; в этом случае помимо силы увода, вызванной ненулевым углом увода, появляется составляющая, вызванная углом развала. Влияние пяточного момента на параметры стационарного режима не учтено, потому что по сравнению с моментом боковой силы относительно вертикальной он значительно меньше.

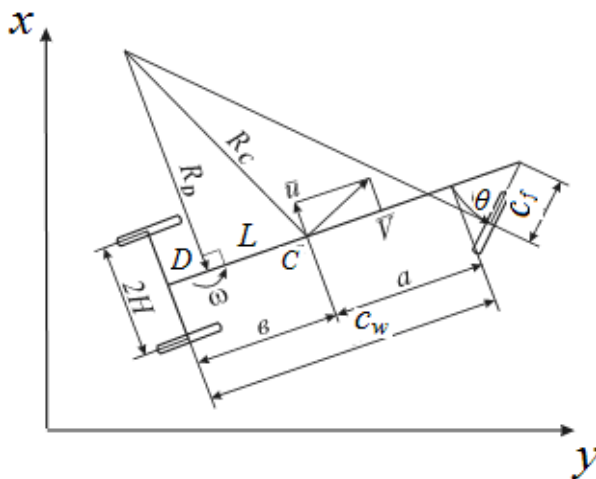


Рисунок 1. – Расчетная схема трехколесного экипажа

Геометрические и инерционно-массовые характеристики расчетной схемы трехколесного экипажа приведены в [1], на рисунке 1 обозначены только традиционные для плоской модели кинематические и геометрические характеристики:

a ; b – расстояние от центра масс экипажа до передней (управляемой) оси и соответственно к задней оси: $a = c_w - l_t$; $b = l_t$;

$2H$ – колея;

V – продольная составляющая скорости центра масс;
 u_c – поперечная составляющая скорости центра масс;
 ω – угловая скорость экипажа относительно вертикальной оси;
 θ – курсовой угол передней стойки относительно корпуса.

Определим скорость ЦМ автомобиля относительно полюса. За полюс выбирается центр задней оси экипажа. Скорость любой точки тела в плоскопараллельном движении состоит из скорости полюса (поступательное движение вместе с полюсом) и скорости точки относительно полюса (скорость вращательного движения вокруг полюса). Полюс имеет скорость $\{V, u\}$, скорость ЦМ $\{V, u + b\omega\}$.

Вместо линеаризованных выражений для курсового угла θ и угла развала χ в существующие уравнения движения [1] подставим их точные выражения $\theta = \arctg(\operatorname{tg}(\psi)\cos(\lambda))$, $\chi = \arcsin(\sin(\psi)\sin(\lambda))$.

Дифференциальные уравнения движения трехколесного экипажа:

– в поперечном направлении:

$$\begin{aligned}
 & m_t(U - V\omega) - m_t l_t \varepsilon_\Theta - m_f d \varepsilon_\psi + \alpha_f \left((u - c_w \omega + c_f \Psi) / V + \right. \\
 & \left. + \arctg(\operatorname{tg}(\psi)\cos(\lambda)) \right) + \alpha_{r1} u / (V - H\omega) + \alpha_{r2} u / (V + H\omega) + \\
 & + K_f \arcsin(\sin(\psi)\sin(\lambda)) = 0;
 \end{aligned} \tag{1}$$

– относительно вертикальной оси

$$\begin{aligned}
 & \left(m_r l_r^2 + R_{zz} + m_f (c_w + l_f)^2 + F_{zz} \right) \varepsilon_\Theta + \left(-F_{yz} \sin(\lambda) + m_f d (c_w + l_f) + \right. \\
 & \left. + F_{zz} \cos(\lambda) \right) \varepsilon_\psi - m_t l_t (U - V\omega) - C_f V \Psi \sin(\lambda) / R_k - M_\psi \cos(\lambda) - \\
 & - c_w \alpha_f \left((u - c_w \omega + c_f \Psi) / V + \arctg(\operatorname{tg}(\psi)\cos(\lambda)) \right) - \\
 & - c_w K_f \arcsin(\sin(\psi)\sin(\lambda)) = 0;
 \end{aligned} \tag{2}$$

– относительно оси управляемого модуля

$$\begin{aligned}
 & \left(-F_{yz} \sin(\lambda) + m_f d (c_w + l_f) + F_{zz} \cos(\lambda) \right) \varepsilon_\Theta + (m_f d^2 - 2F_{yz} \sin(\lambda)\cos(\lambda) + \\
 & + F_{yy} \sin(\lambda)^2 + F_{zz} \cos(\lambda)^2) \varepsilon_\psi - m_f (U - V\omega) d + C_f V \omega \sin(\lambda) / R_k + M_\psi + \\
 & + c_f \alpha_f \left((u - c_w \omega + c_f \Psi) / V + \arctg(\operatorname{tg}(\psi)\cos(\lambda)) \right) + \\
 & + c_f K_f \arcsin(\sin(\psi)\sin(\lambda)) - g v \sin(\lambda) \psi = 0.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Чтобы проанализировать маневренность и поворачиваемость экипажа на основе численного интегрирования, а именно получить значения параметров управления V и ψ , которые обеспечивают постоянство R_D при варьировании параметра продольной скорости, приведем уравнение движения к нормальному виду Коши (решим систему уравнений движения относительно старших производных):

$$\dot{u} = f_1(V, \psi, \omega, u);$$

$$\dot{\omega} = f_2(V, \psi, \omega, u). \quad (4)$$

Система (4) имеет только две фазовые переменные u, ω , поскольку управляемый модуль будем считать жестко «зафиксированным»: $\psi = \text{const}, \Psi = 0$.

Численное моделирование выполнено для трех фиксированных значений радиуса поворота и приведено в таблице $R_D = 8; 15; 25$ м, (V , м/с; ψ , рад):

Таблица. – Результаты численного моделирования движения микроавтомобиля

R_D , м	V_1 , м/с	a_{1yc} , м/с	ψ_1 , рад	V_2 , м/с	a_{2yc} , м/с	ψ_2 , рад	V_3 , м/с	a_{3yc} , м/с	ψ_3 , рад
8	1,5	0,28	0,250	3,5	1,53	0,258	5,5	3,78	0,265
15	1,5	0,15	0,134	3,5	0,82	0,138	5,5	2,02	0,142
25	3,5	0,49	0,083	5,5	0,49	0,086	9,5	3,61	0,096

Диаграмма поворачиваемости трехколесного экипажа построена с помощью метода наименьших квадратов. При этом K_u определено как тангенс наклона зависимости $\psi = f(a_{yc})$.

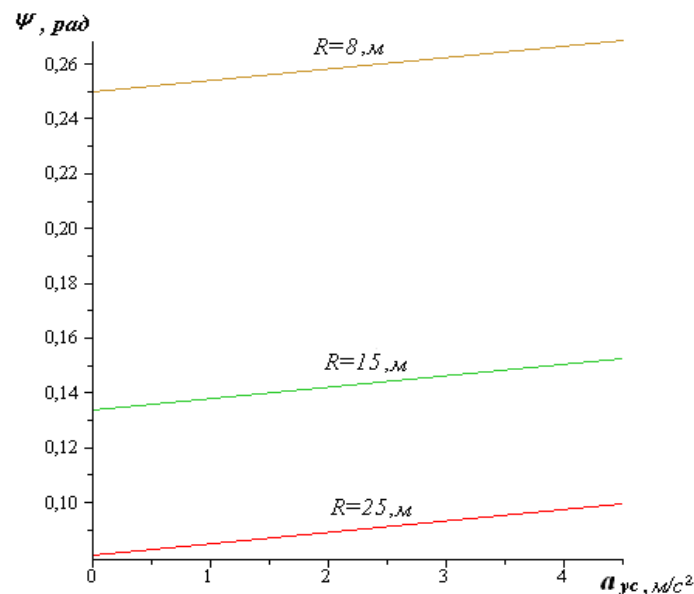


Рисунок 2. – Диаграмма поворачиваемости трехколесного экипажа при разных радиусах поворота

Сопоставление полученных результатов с традиционным [4], видом прямой поворачиваемости

$$\psi = c_w / R_D + K_u \alpha_{yc}; \quad K_u = (\bar{k}_2 - \bar{k}_1) / \bar{k}_1 \bar{k}_2 \quad (5)$$

указывает на необходимость коррекции общего вида градиента недостаточной поворачиваемости и угла Аккермана в выражении (5) для случая ненулевого угла наклона передней стойки.

Выводы. Во всех трех рассмотренных случаях $R_D = 8; 15; 25$ м градиент недостаточной поворачиваемости K_u имеет одно и тоже значение, а именно: $K_u = 0,004$, то есть конструктивные особенности модели, а именно наклон управляемой стойки, приводят к существенной количественной изменения градиента недостаточной поворачиваемости; величины углов Аккермана тоже претерпевают определенные изменения по сравнению с их классическим определением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сахно В. П. Вплив конструктивних параметрів триколісного екіпажа на його маневреність / В. П. Сахно, В. Г. Вербицький, В. О. Банніков – [Вісник центрального наукового центру транспортної академії наук., окремих випуск] – Автошляховик України – Випуск 12 – червень – 2009. – С. 178–183.
2. Лобас Л. Г. Неголономные модели колесных экипажей / Л. Г. Лобас – Киев : Наук. Думка, 1986. – 232 с.
3. Сахно В. П. К определению габаритной полосы движения неуправляемого автопоезда / В. П. Сахно, В. М. Поляков, А. М. Таранов // «Автомоб. транспорт» : Респ. міжвід. наук. техн. зб. – Вип. 25. Київ. – 1988. – С. 67–71.
4. Поляков В. М. Модульный автопоезд для дорожных экспериментальных исследований / В. М. Поляков, А. Н. Тимков, А. В. Горпинюк. – [Автомобильный транспорт] – Харьков : ХНАДУ, 2003. – № 13. – С. 68–70.
5. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А. С. Литвинов. – М. : Машиностроение, 1978. – 376 с.
6. Gillespie, Thomas D., Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc. 1992. – 470 p.