

ТРАНСПОРТ

УДК 629.017

**Подригало М.А., д.т.н., Бобошко А.А., к.т.н., Тарасов Ю.В., к.т.н.,
Байцур М.В., к.т.н., Клец Д.М.**

ХНАДУ, г. Харьков

УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМОБИЛЯ ПРИ МАЛЫХ СЛУЧАЙНЫХ ОТКЛОНЕНИЯХ УПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕС ОТ НЕЙТРАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Проведен анализ влияния начальной скорости поворота управляемых колес на устойчивость автомобиля против заноса. Получены зависимости для определения максимально допустимой скорости поворота управляемых колес, а также максимально допустимых скорости и ускорения машины. Получены критериальные выражения для полноприводных, заднеприводных и переднеприводных автомобилей.

Введение

При движении автомобиля водитель вынужден непрерывно воздействовать на рулевое колесо с целью сохранения заданного направления движения. Эти воздействия носят случайный и колебательный характер, т.е. процесс изменения положения управляемых колес является случайной функцией времени. Углы отклонений управляемых колес от нейтрального положения могут иметь незначительные величины, однако поворот колес может осуществляться со значительными ускорениями и скоростями.

Анализ последних достижений и публикаций

Результаты известных исследований [1] показали, что траектория движения автомобиля всегда является криволинейной с непрерывно изменяющейся кривизной. Воздействие водителя на органы управления поворотом происходит почти непрерывно и изменение углов поворота управляемых колес во времени носит колебательный характер. На наш взгляд, воздействие водителя на органы управления поворотом автомобиля происходит не только для того, чтобы изменить направление движения, но также и для того, чтобы сохранить заданное направление движения при случайных внешних воздействиях (возмущениях). Это позволило авторам работы [2] сделать вывод о том, что управляемыми параметрами, например, при торможении автомобиля, являются скорость и направление движения, а управляющими воздействиями — тормозные силы и углы поворота управляемых колес.

Для оценки устойчивости автомобиля против заноса необходимо знать величину боковой силы, действующей на заднюю ось. В работе [3] определены реакции на колесах автомобиля при движении на повороте без учета бокового увода шин. Аналогичная задача, но с учетом бокового увода шин, решена в работе [4].

Для автомобилей с жесткими колесами (без учета бокового увода шин) боковые реакции дороги на колесах передней и задней осей [3]:

$$R_{\delta_1} = m \sec \bar{\alpha} \left[\frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \left(\frac{dV_{x_1}}{dt} \operatorname{tg} \bar{\alpha} + V_{x_1} \sec^2 \bar{\alpha} \frac{d\bar{\alpha}}{dt} \right) + V_{x_1}^2 \frac{b}{L^2} \operatorname{tg} \bar{\alpha} \right] \mp R_{K_1} \operatorname{tg} \bar{\alpha}; \quad (1)$$

$$R_{\delta_2} = m \left[\frac{ab - i_z^2}{L^2} \left(\frac{dV_{x_1}}{dt} \operatorname{tg} \bar{\alpha} + V_{x_1} \sec^2 \bar{\alpha} \frac{d\bar{\alpha}}{dt} \right) + V_{x_1}^2 \frac{a}{L^2} \operatorname{tg} \bar{\alpha} \right], \quad (2)$$

где m — общая масса автомобиля; $\bar{\alpha}$ — средний угол поворота управляемых колес; a, b — расстояния от передней и задней осей до проекции центра масс автомобиля на горизонтальную плоскость; h — высота центра масс автомобиля; L — продольная колесная база автомобиля; V_{x_1} — компонента линейной скорости, направленной вдоль продольной оси автомобиля; R_{K_1} — касательная реакция на передних колесах автомобиля (берется со знаком «минус» при передних ведущих колесах и со знаком «плюс» — при ведомых).

Боковые реакции на колесах, определенные с учетом бокового увода шин [4],

$$R_{\delta_1} = \frac{mV_{x_1} \sec \bar{\alpha}}{\sqrt{1 + \frac{i_z^2}{L^2} (\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1)^2}} \left\{ \left[\sec^2 \bar{\alpha} \frac{d\bar{\alpha}}{dt} + \frac{d\delta_2}{dt} - \frac{d\delta_1}{dt} - \frac{\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1}{2 \left[1 + \frac{i_z^2}{L^2} (\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1)^2 \right]} \right] \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{b^2 + i_z^2}{L^2} - \frac{b}{L} \frac{\delta_2}{\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1} \right) + \frac{b}{L^2} \frac{V_{x_1} (\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1)}{\sqrt{1 + \frac{i_z^2}{L^2} (\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1)^2}} \right\} \mp R_{K_1} \operatorname{tg} \bar{\alpha}; \quad (3)$$

$$R_{\delta_2} = \frac{mV_{x_1}}{\sqrt{1 + \frac{i_z^2}{L^2} (\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1)^2}} \left\{ \left[\sec^2 \bar{\alpha} \frac{d\bar{\alpha}}{dt} + \frac{d\delta_2}{dt} - \frac{d\delta_1}{dt} - \frac{\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1}{2 \left[1 + \frac{i_z^2}{L^2} (\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1)^2 \right]} \right] \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{ab - i_z^2}{L^2} - \frac{a}{L} \frac{\delta_2}{\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1} \right) + \frac{a}{L^2} \frac{V_{x_1} (\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1)}{\sqrt{1 + \frac{i_z^2}{L^2} (\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1)^2}} \right\}, \quad (4)$$

где δ_1, δ_2 — углы увода колес передней и задней осей автомобиля, соответственно.

Определение величины боковой реакции на задних колесах позволяет оценить устойчивость автомобиля против заноса, а величины боковой реакции на передних колесах — управляемость машины.

Цель и постановка задач исследования

Целью исследования является оценка устойчивости автомобиля против заноса при малых случайных отклонениях управляемых колес от нейтрального положения.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующую задачу:

– произвести оценку устойчивости автомобиля против заноса при малых отклонениях управляемых колес от нейтрального положения.

Оценка устойчивости автомобиля против заноса при малых отклонениях управляемых колес от нейтрального положения

Угловая скорость поворота управляемых колес $d\bar{\alpha}/dt$ не может мгновенно возрасти от нуля до своего максимального значения. Поэтому в начальный момент времени ($t = 0$) ве-

личины $\bar{\alpha} = 0$; $d\bar{\alpha}/dt = 0$, а следовательно, и $R_{\delta_1} = 0$ и $R_{\delta_2} = 0$. Предположим, что увеличение угловой скорости от нуля до своего максимального значения происходит с большими угловыми ускорениями, что позволяет осуществить указанное за минимальный промежуток времени. При этом управляемые колеса не успевают повернуться на значительный угол. Принимая $\bar{\alpha} = 0$ в выражениях (1) и (2), а также в уравнениях (3) и (4) $\bar{\alpha} = 0$; $\delta_1 = 0$; $\delta_2 = 0$, получаем:

$$R_{\delta_1} = mV \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \frac{d\bar{\alpha}}{dt}; \quad (5)$$

$$R_{\delta_2} = mV \frac{ab - i_z^2}{L^2} \frac{d\bar{\alpha}}{dt}; \quad (6)$$

$$R_{\delta_1} = mV \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \left(\frac{d\bar{\alpha}}{dt} + \frac{d\delta_2}{dt} - \frac{d\delta_1}{dt} \right); \quad (7)$$

$$R_{\delta_2} = mV \frac{ab - i_z^2}{L^2} \left(\frac{d\bar{\alpha}}{dt} + \frac{d\delta_2}{dt} - \frac{d\delta_1}{dt} \right), \quad (8)$$

где V — линейная скорость автомобиля, $V = V_{x_1}$.

Сравнение выражений (5) и (7), (6) и (8) показывает, что в начальный момент времени учет бокового увода шин незначительно влияет на величины R_{δ_1} и R_{δ_2} . Поэтому для оценки устойчивости автомобиля против заноса при небольших отклонениях управляемых колес от нейтрального положения достаточно воспользоваться уравнениями (5) и (6).

Условием отсутствия бокового скольжения задней оси является

$$R_{\delta_2} \leq \sqrt{\varphi^2 R_{z_2}^2 - R_{k_2}^2}, \quad (9)$$

где φ — коэффициент сцепления колес с дорогой;

R_{z_2} — вертикальная реакция на колесах задней оси;

R_{k_2} — касательная реакция на колесах задней оси.

В общем случае для полноприводного автомобиля

$$R_{k_2} = (1 - K_R) R_K = (1 - K_R) \left(kFV^2 + m \frac{dV}{dt} \right), \quad (10)$$

где K_R — коэффициент распределения тяговой силы между осями полноприводного автомобиля

$$K_R = \frac{R_{k_1}}{R_{k_1} + R_{k_2}}; \quad (11)$$

kF — фактор аэродинамического сопротивления.

У переднеприводного автомобиля $K_R = 1$, а у заднеприводного $K_R = 0$.

Вертикальная реакция на задних колесах

$$R_{z_2} = mg \frac{a}{L} + kFV^2 \frac{h_w}{L} + m \frac{dV}{dt} \frac{h}{L}, \quad (12)$$

где g — ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

h_w — вертикальная координата центра аэродинамического давления.

Принимая $h_w \approx h$, получим

$$R_{z_2} = mg \left[\frac{a}{L} + \frac{h}{L} \left(\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \right) \right]. \quad (13)$$

После подстановки выражений (6), (10) и (13) в неравенство (9) получим условие ограничения максимальной угловой скорости поворота управляемых колес

$$\frac{d\bar{\alpha}}{dt} \leq \frac{gL^2}{V} \frac{\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}}{ab - i_z^2} \sqrt{\left(\frac{\varphi a/L}{\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}} + \varphi \frac{h}{L} \right)^2 - (1 - K_R)^2}. \quad (14)$$

Правая часть неравенства (14) имеет действительные значения в случае

$$\frac{dV}{dt} \leq \varphi g \left(\frac{a/L}{1 - \varphi \frac{h}{L} - K_R} - \frac{kF}{mg\varphi} V^2 \right). \quad (15)$$

Невыполнение условия (15) означает потенциальную неустойчивость автомобиля, т.е. определяет режимы движения последнего, при которых поворот рулевого колеса с любой угловой скоростью приводит к потере курсовой устойчивости. При равномерном движении автомобиля $\left(\frac{dV}{dt} \right) = 0$ условие (15) примет вид

$$V \leq \sqrt{\frac{mg\varphi}{kF} \frac{a/L}{1 - \varphi \frac{h}{L} - K_R}}. \quad (16)$$

При

$$1 - \varphi \frac{h}{L} - K_R \leq 0 \quad (17)$$

выражение (16) имеет мнимые или равные бесконечности корни, что свидетельствует об обеспечении устойчивости движения автомобиля на любой скорости. Это условие выполняется для переднеприводных автомобилей ($K_R = 1$) и не выполняется для заднеприводных ($K_R = 0$). Выполнение условия (16) обязательно приводит и к появлению в правой части неравенства (15) положительного числа, ограничивающего зону потенциальной неустойчивости автомобиля.

Для переднеприводного автомобиля ($K_R = 1$) выражение (14) примет вид

$$\frac{d\bar{\alpha}}{dt} \leq \frac{\varphi g L}{V} \frac{a + h \left(\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \right)}{ab - i_z^2}. \quad (18)$$

Правая часть выражения (18) обращается в бесконечность при $ab = i_z^2$. В остальных случаях существует некоторое предельное значение угловой скорости поворота управляемых колес.

Для заднеприводного автомобиля ($K_R = 0$) выражение (14) примет следующий вид

$$\frac{d\bar{\alpha}}{dt} \leq \frac{gL^2}{V} \frac{\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}}{ab - i_z^2} \sqrt{\left(\frac{\frac{\varphi a/L}{\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}} + \varphi \frac{h}{L}} \right)^2} - 1, \quad (19)$$

а выражения (15) и (16)

$$\frac{dV}{dt} \leq \varphi g \left(\frac{a/L}{1 - \varphi \frac{h}{L}} - \frac{kF}{mg\varphi} V^2 \right); \quad (20)$$

$$V \leq \sqrt{\frac{mg\varphi}{kF} \frac{a/L}{1 - \varphi \frac{h}{L}}}. \quad (21)$$

Отсутствие возможности корректировать направление движения автомобиля также приведет к нарушению устойчивости, поскольку водитель использует управляемые колеса для стабилизации курса направления движения. Поэтому рассмотрим возможность потери автомобилем управляемости при малых случайных отклонениях управляемых колес от нейтрального положения.

Условие отсутствия бокового скольжения передних колес

$$R_{\delta_1} \leq \sqrt{\varphi^2 R_{z_1}^2 - R_{k_1}^2}, \quad (22)$$

где R_{z_1} — вертикальная динамическая реакция на колесах передней оси,

$$R_{z_1} = mg \left[\frac{b}{L} + \frac{h}{L} \left(\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \right) \right]; \quad (23)$$

R_{k_1} — касательная реакция на колесах передней оси,

$$R_{k_1} = K_R \left(kF V^2 + m \frac{dV}{dt} \right). \quad (24)$$

После подстановки выражений (5), (23) и (24) в соотношение (22) получим

$$\frac{d\bar{\alpha}}{dt} \leq \frac{gL^2}{V} \frac{\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}}{b^2 + i_z^2} \sqrt{\left(\frac{\frac{\varphi b/L}{\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}} + \varphi \frac{h}{L}} \right)^2} - K_R^2. \quad (25)$$

Для переднеприводного автомобиля ($K_R = 1$) получим

$$\frac{d\bar{\alpha}}{dt} \leq \frac{gL^2}{V} \frac{\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}}{b^2 + i_z^2} \sqrt{\left(\frac{\frac{\varphi b/L}{\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}} + \varphi \frac{h}{L}} \right)^2} - 1. \quad (26)$$

Для заднеприводного автомобиля ($K_R = 0$) выражение (25) примет следующий вид

$$\frac{d\bar{\alpha}}{dt} \leq \frac{\varphi g L}{V} \frac{b+h \left(\frac{kF}{mg} V^2 + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \right)}{b^2 + i_z^2}. \quad (27)$$

На рис. 1 приведены графики зависимости (14) и (25) для некоторых моделей полноприводных автомобилей.

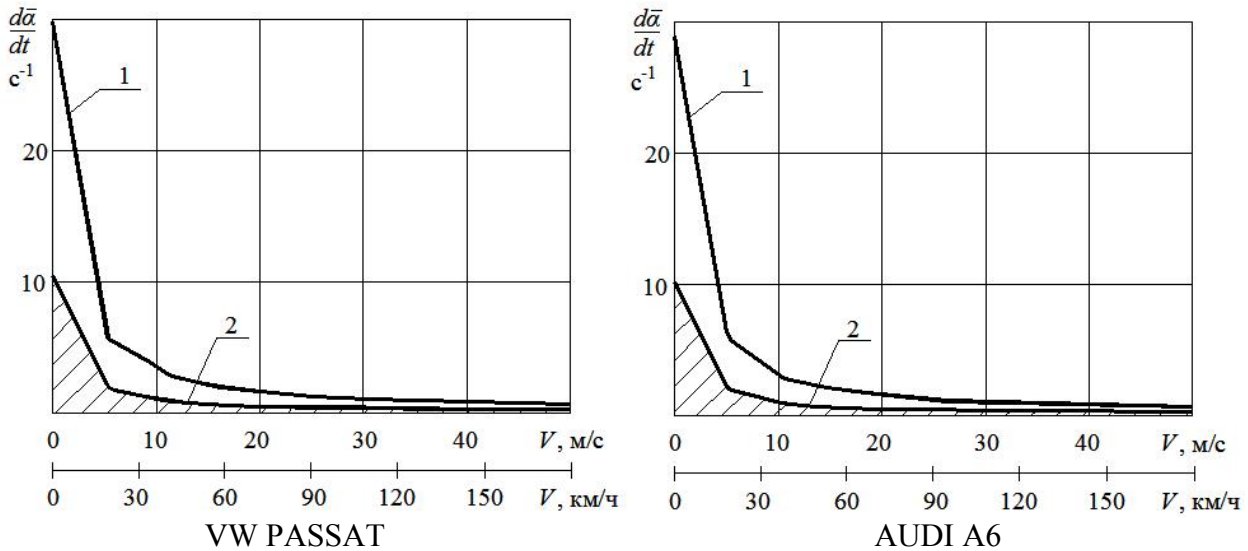


Рис. 1. Максимальная угловая скорость поворота управляемых колес для полноприводных автомобилей (зона устойчивого движения заштрихована): 1 — по условию бокового скольжения задней оси; 2 — по условию бокового скольжения передней оси

На рис. 2 и рис. 3 приведены графики зависимостей (18), (26) и (19), (27) соответственно для некоторых, взятых в качестве примера, переднеприводных и заднеприводных автомобилей.

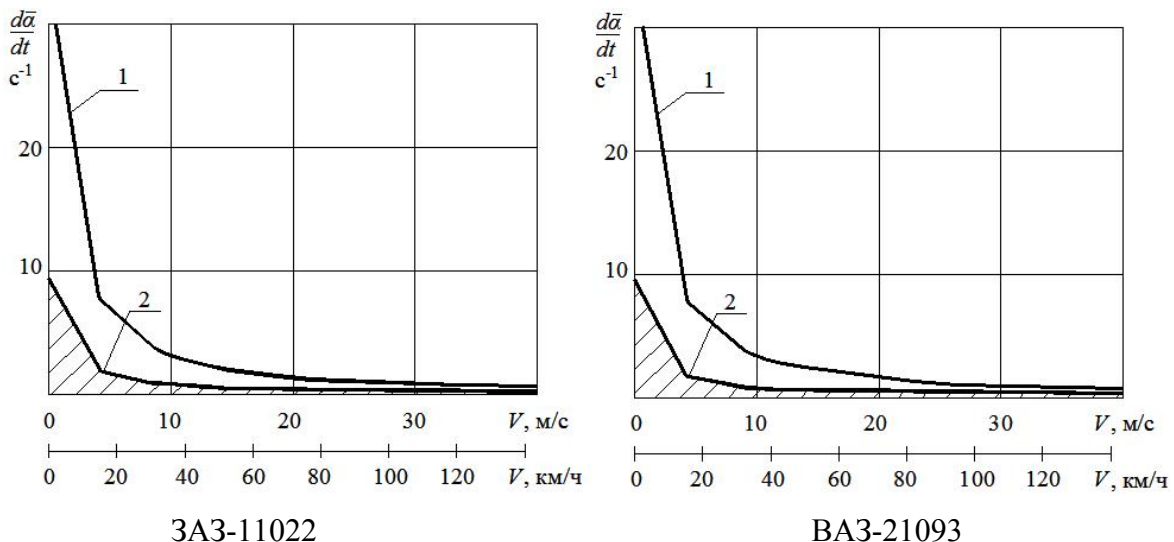


Рис. 2. Максимальная угловая скорость поворота управляемых колес для переднеприводных автомобилей (зона устойчивого движения заштрихована): 1 — по условию бокового скольжения задней оси; 2 — по условию бокового скольжения передней оси

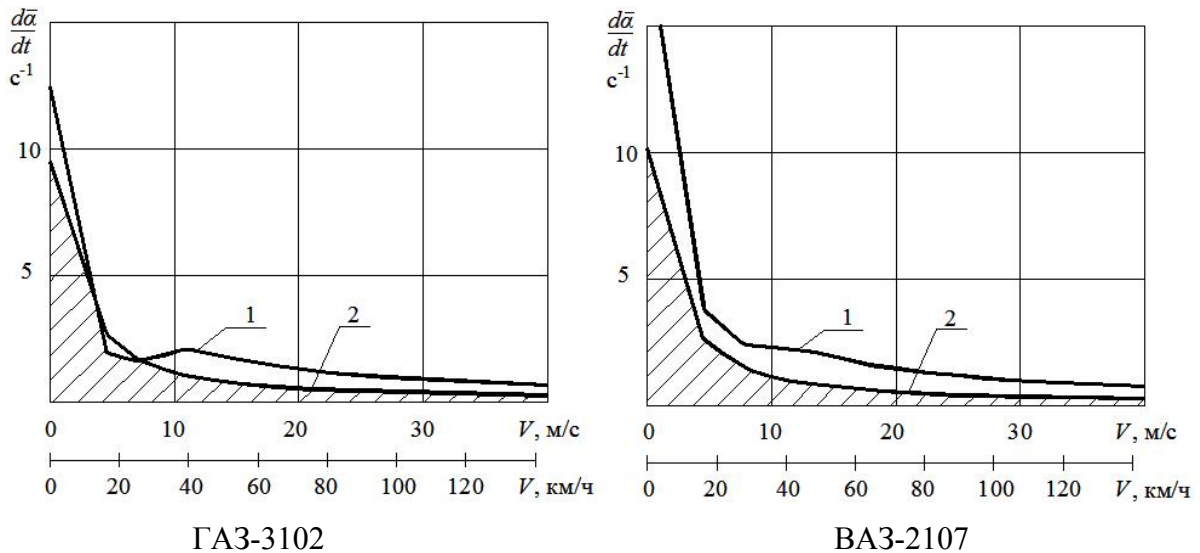


Рис. 3. Максимальная угловая скорость поворота управляемых колес для заднеприводных автомобилей (зона устойчивого движения заштрихована): 1 — по условию бокового скольжения задней оси; 2 — по условию бокового скольжения передней оси

Правая часть выражения (25) имеет действительные значения при

$$\frac{dV}{dt} \leq \varphi g \left(\frac{b/L}{K_R - \varphi \frac{h}{L}} - \frac{kF}{mg\varphi} V^2 \right). \quad (28)$$

При равномерном движении $(dV/dt) = 0$ условие (28) примет вид

$$V \leq \sqrt{\frac{mg\varphi}{kF} \frac{b/L}{K_R - \varphi \frac{h}{L}}}. \quad (29)$$

При $K_R = \varphi \frac{h}{L}$ ограничения по скорости и ускорению отсутствуют, поскольку правые части неравенств (28) и (29) обращаются в бесконечность. При $K_R = 0$ (заднеприводный автомобиль) ограничений по скорости нет, поскольку правая часть неравенства (28) имеет мнимые корни. Выполнение условия (29) приводит и к выполнению условия (28).

Для переднеприводного автомобиля ($K_R = 1$) выражения (28) и (29) примут вид

$$\frac{dV}{dt} \leq \varphi g \left(\frac{b/L}{1 - \varphi \frac{h}{L}} - \frac{kF}{mg\varphi} V^2 \right); \quad (30)$$

$$V \leq \sqrt{\frac{mg\varphi}{kF} \frac{b/L}{1 - \varphi \frac{h}{L}}}. \quad (31)$$

На рис. 4 приведены графики зависимостей (15) и (28) для некоторых, взятых в качестве примера, полноприводных автомобилей.

На рис. 5 приведены графики зависимостей (20) и (30) для некоторых, взятых в качестве примера, заднеприводных и переднеприводных автомобилей.

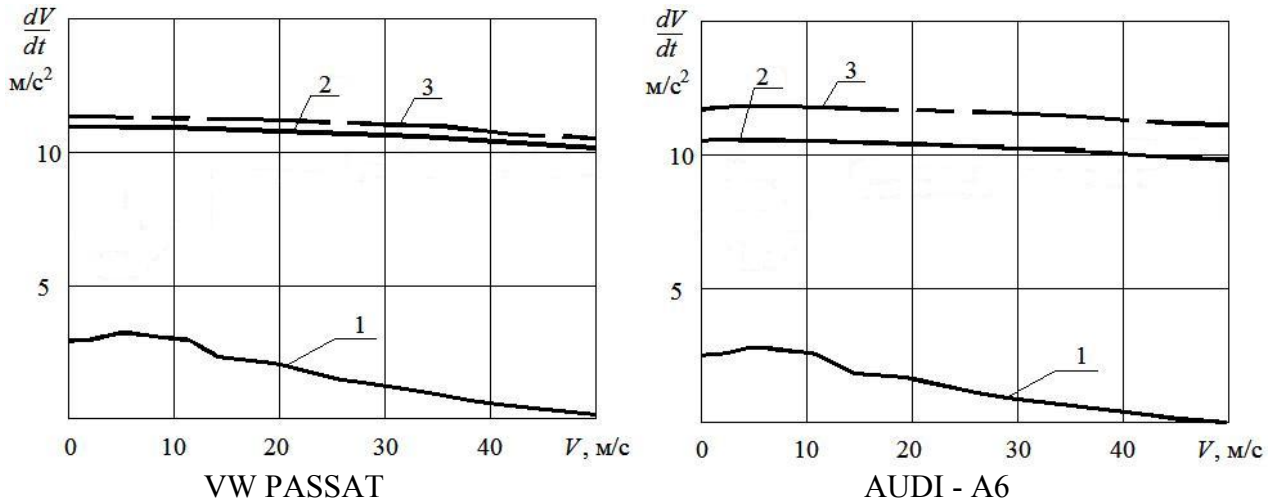


Рис. 4. Зависимость максимально допустимых ускорений от скорости автомобиля: 1 — ускорения, взятые по тяговым характеристикам; 2 — максимально допустимые ускорения по условию бокового скольжения передней оси; 3 — максимально допустимые ускорения по условию бокового скольжения задней оси

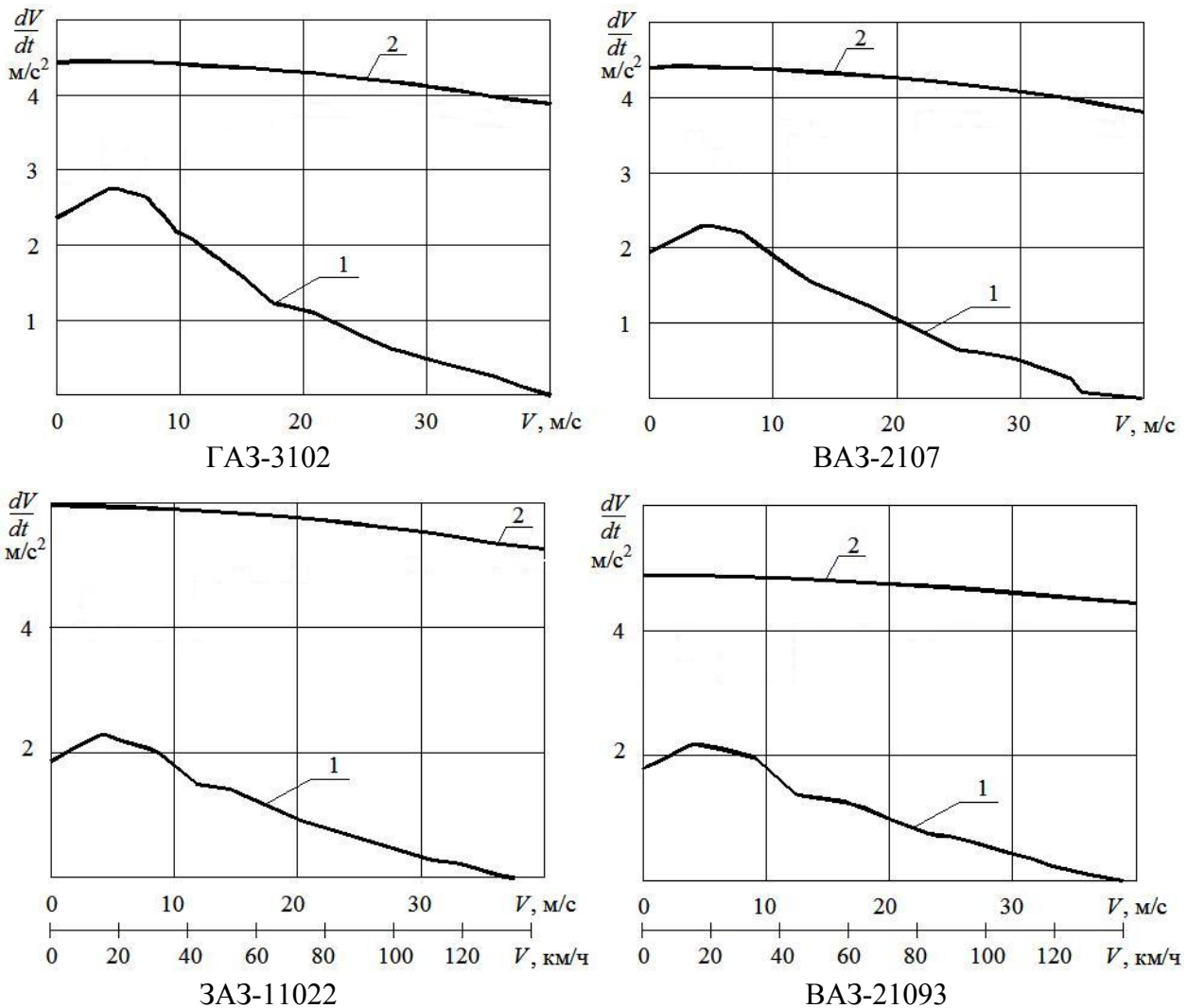


Рис. 5. Зависимость максимально допустимых ускорений от скорости автомобиля: 1 — ускорения, взятые по тяговым характеристикам; 2 — максимально допустимые ускорения по условию устойчивости

Выводы

Полученные зависимости позволяют оценить курсовую устойчивость полноприводных, переднеприводных и заднеприводных автомобилей при случайном повороте управляемых колес.

Список литературы

1. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. — М.: Машиностроение, 1970. — 176 с.
2. Вопросы динамики торможения и теория рабочих процессов тормозных систем автомобилей / Генбом Б.Б., Гудз Г.С, Демьянюк В.А, Кизман А.М, Кобылянский В.Н. / Под ред. Б.Б. Генбома. — Львов: Вища школа, 1974. — 234 с.
3. Маневренность и тормозные свойства колесных машин / М.А. Подригало, В.П. Волков, В.И. Кирчатый, А.А. Бобошко / Под. ред. Подригало М.А. — Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2003. — 403 с.
4. Бобошко А.А. Определение реакций на колесах автомобиля при повороте с учетом бокового увода шин // Механіка та машинобудування: Науково-технічний журнал. — 2008. — С. 107-112.

Стаття надійшла до редакції 06.10.08

© Подригало М.А., Бобошко А.А., Тарасов Ю.В., Байцур М.В., Клец Д.М., 2008