

УДК 629.017

Подригало М. А., Клец Д. М., Гацько В. И., Тутов М. В.

## **ОЦЕНКА УПРАВЛЯЕМОСТИ ТРЕХОСНОГО ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ УРАЛ-4320 ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ**

*Виявлено появу негативної кутової швидкості й кутового прискорення в площині дороги, які спричиняють прояв недостатньої повертаємості й низької повороткості. Визначено вплив повертаємості на курсову стійкість тривісних вантажних автомобілів.*

**Ключові слова:** кутова швидкість, кутове прискорення, обертальність, тривісний вантажний автомобіль.

*Обнаружено появление отрицательной угловой скорости и углового ускорения в плоскости дороги, которые обуславливают проявление недостаточной поворачиваемости и низкой поворотливости. Определено влияние поворачиваемости на курсовую устойчивость трехосных грузовых автомобилей.*

**Ключевые слова:** угловая скорость, угловое ускорение, поворачиваемость, трехосный грузовой автомобиль.

*Negative angular speed and angular acceleration appearance is detected, that determine insufficient vehicle turning ability. Turning influence on course stability of six-wheel motor vehicle is determined.*

**Key words:** angular velocity, acceleration, steer, three-axle truck.

**Постановка проблемы.** При прямолинейном движении управляемость является составной частью более сложного свойства – курсовой устойчивости автомобиля, поскольку движения автомобиля всегда является криволинейным, с постоянно изменяющейся кривизной траектории. Автомобиль постоянно находится под воздействием различного рода возмущений, приводящих к отклонению его траектории от прямолинейной. Поэтому водитель вынужден постоянно корректировать траекторию движения, поворачивая рулевое колесо. В настоящей статье рассмотрена структура сложного свойства – курсовой устойчивости автомобиля, включающего в себя управляемость. Показано влияние поворачиваемости на курсовую устойчивость автомобиля. Трехосные грузовые автомобили получили распространение в народном хозяйстве и военных целях. Третий мост у этих автомобилей позволяет повысить проходимость, увеличить грузоподъемность, снизить давление на шины и почву. С другой стороны, наличие третьего моста снижает КПД трансмиссии, увеличивает расход топлива.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Исследование Я. Е. Фаробина [1] показало, что траектория движения автомобиля всегда является криволинейной с непрерывно изменяющейся по времени кривизной. Воздействие водителя на органы управления поворотом происходит почти непрерывно и изменение углов поворота управляемых колес во времени имеет колебательный характер.

В работе [2] 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 допустимые скорости и ускорения машины. Получены криволинейные выражения для оценки устойчивости против заноса полноприводных и заднеприводных автомобилей. Однако в указанной работе [2] не проведена оценка управляемости машины при колебательном изменении углов поворота управляемых колес.

В работе Я. Х. Закина [3] определена структура свойств маневренности, как сложного эксплуатационного свойства автомобиля. Управляемость, как одно из свойств маневренности, также является сложным свойством, включающим в себя более простые свойства – устойчивость, степень поворачиваемости и легкость управления. При оценке маневренности автомобиля, устойчивость является составным свойством управляемости, поскольку речь идет о траекторной устойчивости машины, без сохранения которой автомобиль будет неуправляемым.

Определению понятия управляемости автомобиля посвящено значительное количество исследований [3–8]. Каждый из авторов дал свое определение управляемости, подробно характеризующее указанное эксплуатационное свойство.

Наиболее четкое определение, на наш взгляд, было дано Я. Х. Закиным [3]. В его трактовке управляемость – это свойство подвижного состава двигаться по траекториям различной кривизны в результате действия водителя на органы управления – рулевое колесо и через рулевой привод на управляемые колеса. Управляемость проявляется независимо от компоновки, габаритных размеров подвижного состава и геометрических параметров (ширины проездов, радиусов закруглений, углов пересечения дорог и т. д.)

На наш взгляд, управляемость – это способность объекта (автомобиля) адекватно реагировать на управляющее воздействие. Указанное определение может относиться не только к управляемости при повороте, но также и к реакции автомобиля на любое воздействие водителя на органы управления [9].

При прямолинейном движении автомобиля водитель использует рулевое управление для коррекции курсового угла машины при его отклонении от различных внешних и внутренних возмущений.

Таким образом, рулевое управление используется для обеспечения курсовой устойчивости и неуправляемый автомобиль устойчивым быть не может. Это означает, что при прямолинейном движении курсовая устойчивость является более

сложным эксплуатационным свойством, включающим в себя управляемость автомобиля. Определению понятия устойчивости автомобиля также посвящено значительное количество исследований [4, 7, 9–12]. Наиболее четко на наш взгляд, то формулировка понятия устойчивости приведено в работе М. А. Петрова [12]: «Под устойчивостью автомобиля понимается его свойство сохранять в различных пределах направление скорости движения и ориентацию своих продольной и поперечное осей». На наш взгляд, определение устойчивости в наиболее общем виде должно быть сформулировано как способ-



Рис. 1. Автомобиль Урал-4320 в трехосном исполнении.

Целью статьи является улучшение курсовой устойчивости автомобилей путем обеспечения их управляемости при малых колебательных отклонениях управляемых колес от нейтрального положения.

Для достижения указанной цели необходимо составить математическую модель процесса движения автомобиля с недостаточной степенью поворачиваемости при малых колебательных отклонениях управляемых колес от нейтрального положения, а затем провести моделирование указанного процесса при различных режимах поворота управляемых колес.

#### Изложение основного материала.

**Математическое моделирование изменения угловой скорости и углового ускорения при прямолинейном движении.** Критерием управляемости автомобиля является развиваемое при повороте угловое ускорение, а критерием поворачиваемости – угловая скорость поворота [13]. Угловая скорость поворота автомобиля в плоскости дороги с учетом бокового увода шины передних и задних колес может быть определена как [13]:

$$\begin{aligned} \omega_z &= V_{x1} \frac{\overline{\text{tg}a} + \delta_1 - \delta_2}{L} = \\ &= V_{x1} \frac{\overline{\text{tg}a}}{L} + V_{x1} \frac{\delta_2 - \delta_1}{L} = \omega'_z + \omega''_z, \end{aligned} \quad (1)$$

$$V_{x1} = \frac{V_0}{\sqrt{1 + \frac{i_z^2}{L^2} \times (\overline{\text{tg}a} + \delta_2 - \delta_1)^2}} \approx \frac{V_0}{\sqrt{1 + \frac{i_z^2}{L^2} \times [A_a \sin(\Omega t) + \delta_2 - \delta_1]^2}}, \quad (5)$$

ность объекта (автомобиля) противостоять воздействию возмущений. Таким образом, сохранение управляемости автомобиля обеспечивает его курсовую устойчивость. При этом представляет интерес поведение автомобиля с недостаточной степенью поворачиваемости (например, трехосных грузовых автомобилей) при колебательном характере изменения положения управляемых колес, поскольку в начальный момент поворота указанные типы автомобилей могут получать отрицательные угловые ускорения [13].

Представляет интерес оценки управляемости трехосного автомобиля Урал-4320 (рис. 1).

где  $V_{x1}$  – линейная скорость автомобиля в направлении его продольной оси;

$L$  – продольная база автомобиля;

$\omega'_z$  – угловая скорость поворота, которую имел бы автомобиль с абсолютно жесткими колесами;

$$\omega'_z = V_{x1} \frac{\overline{\text{tg}a}}{L}; \quad (2)$$

$\omega''_z$  – дополнительная угловая скорость, которую имеет автомобиль с эластичными в боковом направлении колесами;

$$\omega''_z = V_{x1} \frac{\delta_2 - \delta_1}{L}. \quad (3)$$

Допустим, что колебательный характер поворота управляемых колес описывается гармоническим законом вида:

$$\overline{a} = A_a \sin(\Omega t), \quad (4)$$

где  $A_a$  – амплитуда колебаний управляемых колес;

$\Omega$  – круговая частота колебаний управляемых колес;

$t$  – время.

При малых отклонениях управляемых колес происходит уменьшение линейной скорости автомобиля.

Линейная скорость автомобиля в направлении его продольной оси изменяется по следующему закону [13]:

где  $i_z$  – радиус генерации остова автомобиля относительно вертикальной оси;  
 $V_0$  – линейная скорость автомобиля при  $\bar{a} = 0$ .

Для определения наиболее вероятных значений  $i_z$  в работе [14] предложена формула:

$$i_z = \sqrt{\frac{1}{2}ab + \frac{B^2}{12}}, \quad (6)$$

где  $a, b$  – расстояния от передней и задней осей

Угловое ускорение автомобиля в плоскости дороги:

$$E_z = \frac{d\omega_z}{dt} = \frac{V_0}{L} \times \frac{A_a \cdot \Omega \cos(\Omega t) + \frac{d\delta_2}{dt} - \frac{d\delta_1}{dt}}{\sqrt{\left\{1 + \left(\frac{ab}{2L^2} + \frac{B^2}{12L^2}\right) \cdot [A_a \sin(\Omega t) + \delta_2 - \delta_1]^2\right\}^3}}. \quad (8)$$

В работе [13] определены боковые реакции на передней и задней осях автомобиля с учетом бокового увода шин:

$$R_{\delta_1} = m \cdot \sec \bar{\alpha} \cdot \left\{ \left[ \frac{R_{k_2} + R_{k_1} \cdot \sec \bar{\alpha}}{m} - \frac{V_{x_1}}{L} \cdot (tg \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1) \cdot \left( \frac{b}{L} \cdot \delta_2 + \frac{a}{L} \cdot \delta_1 \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{\frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \cdot (tg \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{b}{L} \cdot \delta_2}{1 + tg \bar{\alpha} \cdot \left[ \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \cdot (tg \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{b}{L} \cdot \delta_2 \right]} \right\} + \frac{b}{L^2} \cdot V_{x_1}^2 \cdot (tg \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1) - R_{k_1} \cdot tg \bar{\alpha}; \quad (9)$$

$$R_{\delta_2} = m \cdot \left\{ \left[ \frac{R_{k_2} + R_{k_1} \cdot \sec \bar{\alpha}}{m} - \frac{V_{x_1}^2}{L} \cdot (tg \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1) \cdot \left( \frac{b}{L} \cdot \delta_2 + \frac{a}{L} \cdot \delta_1 \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{\frac{a \cdot b - i_z^2}{L^2} \cdot (tg \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{a}{L} \cdot \delta_2}{1 + tg \bar{\alpha} \cdot \left[ \frac{b}{L} \cdot (tg \bar{\alpha} - \delta_1) - \frac{a \cdot b - i_z^2}{L^2} \cdot (tg \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1) \right]} \right\} + \frac{a}{L^2} \cdot V_{x_1}^2 \cdot (tg \bar{\alpha} + \delta_2 - \delta_1). \quad (10)$$

$$R_{\delta_1} = K_{y_1} \times \delta_1 \quad (11)$$

$$R_{\delta_2} = K_{y_2} \times \delta_2, \quad (12)$$

где  $K_{y_1}, K_{y_2}$  – коэффициенты сопротивления уводу колес передней и задней осей автомобиля;  
 $m$  – общая масса автомобиля;  
 $R_{k_1}, R_{k_2}$  – суммарные касательные реакции дороги на колесах передней и задней осей (соответствуют движению колес в шаговом режиме).

до проекции центра масс автомобиля на горизонтальную плоскость;  
 $B$  – колея осей.

Выражение после подстановки в него (5) и (6) принимает вид:

$$\omega_z = \frac{V_0}{L} \times \frac{A_a \sin(\Omega t) + \delta_2 - \delta_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{ab}{2L^2} + \frac{B^2}{12L^2}\right) \times [A_a \sin(\Omega t) + \delta_2 - \delta_1]^2}}. \quad (7)$$

При  $a \rightarrow 0$ , т. е. при небольших углах поворота управляемых колес, выполняется условие (5), а также можно принять  $\sec \bar{\alpha} \approx 1$ . В этом случае уравнения (11) и (12), выраженные относительно  $\delta_1$  и  $\delta_2$  с учетом (7) и (8), примут вид:

$$\delta_1 = \frac{m}{K_{y_1}} \cdot \left\{ \left[ \frac{R_{k_2} + R_{k_1}}{m} - \frac{V_0^2}{L} \cdot \frac{\frac{b}{L} \delta_2 + \frac{a}{L} \delta_1}{\sqrt{\frac{ab}{2L^2} + \frac{B^2}{12L^2} + (\bar{a} + \delta_2 - \delta_1)^2}} \right] \times \right. \\ \left. \times \left[ \bar{a} + \left[ \left( \frac{b^2}{L^2} + \frac{ab}{2L^2} + \frac{B^2}{12L^2} \right) \cdot (\bar{a} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{b}{L} \delta_2 \right]^{-1} \right]^{-1} + \right. \\ \left. + \frac{V_0^2}{L} \cdot \frac{\frac{b}{L}}{\sqrt{\frac{ab}{2L^2} + \frac{B^2}{12L^2} + (\bar{a} + \delta_2 - \delta_1)^2}} - \frac{R_{k_1}}{m} \cdot \bar{a} \right\} \quad (13)$$

$$\delta_2 = \frac{m}{K_{y_2}} \cdot \left\{ \left[ \frac{R_{k_2} + R_{k_1}}{m} - \frac{V_0^2}{L} \cdot \frac{\frac{b}{L} \delta_2}{\sqrt{\frac{ab}{L^2} + \frac{B^2}{12L^2} + (\bar{a} + \delta_2 - \delta_1)^2}} \right] \times \right. \\ \times \frac{\left( \frac{ab}{2L^2} - \frac{B^2}{12L^2} \right) (\bar{a} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{a}{L} \delta_2}{1 + \bar{a} \left[ \frac{b}{L} (\bar{a} - \delta_1) - \left( \frac{ab}{2L^2} - \frac{B^2}{12L^2} \right) (\bar{a} + \delta_2 - \delta_1) \right]} + \\ \left. + \frac{V_0^2}{L} \cdot \frac{\frac{a}{L}}{\sqrt{\frac{ab}{2L^2} + \frac{B^2}{12L^2} + (\bar{a} + \delta_2 - \delta_1)^2}} \right\} \quad (14)$$

Определить величины  $\delta_1$  и  $\delta_2$  из уравнений (15) и (16) возможно только численными методами.

Подставляя уравнение (4) в (15) и (16), получив  $\delta_1$  и  $\delta_2$  при заданных конструктивных параметрах конкретного автомобиля, на следую-

щих этапах расчета возможно определение закона изменения  $\omega_z$  и  $E_z$  по формулам (9) и (10). Моделирование проведем на примере трехосного автомобиля Урал-4320 в снаряженном состоянии. Параметры автомобиля представлены в табл. 1.

Таблица 1.

**Геометрические параметры и параметры массы автомобиля Урал 4320 в снаряженном состоянии.**

Марка авто	Параметры автомобиля				
	$m$ , кг	$a$ , м	$h$ , м	$L$ , м	$i_{z_0}$ , м
Урал-4320	8200	2,269	1,270	4,225	1,598

Результаты расчетов приведены на рис. 2–5. Теоретическое исследование выполнено для си-

нусоидального закона поворота управляемых колес автомобиля при различных значениях  $T_M$  и  $A_\alpha$ .

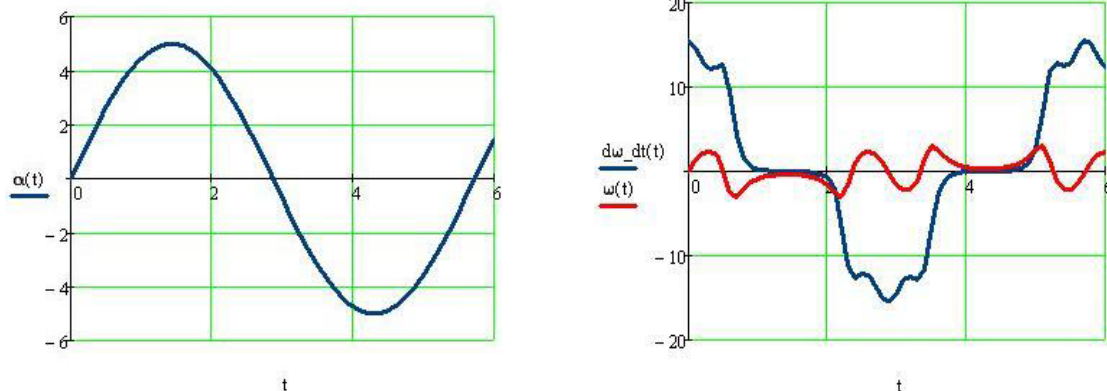


Рис. 2. Изменение угла поворота управляемых колес, угловой скорости и углового ускорения автомобиля Урал-4320 при прямолинейном движении:  $T_M = 0,1$  с;  $A_\alpha = 5^\circ$ .

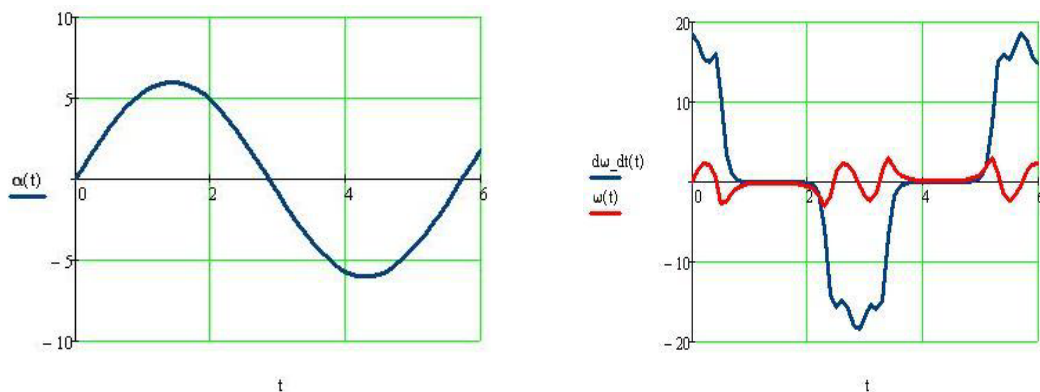


Рис. 3. Изменение угла поворота управляемых колес, угловой скорости и углового ускорения автомобиля Урал-4320 при прямолинейном движении:  $T_M = 0,1$  с;  $A_\alpha = 6^\circ$ .

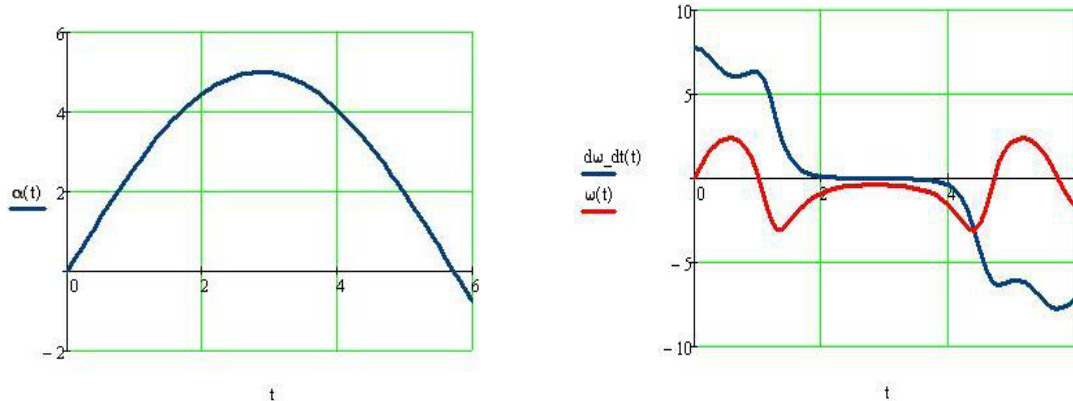


Рис. 4. Изменение угла поворота управляемых колес, угловой скорости и углового ускорения автомобиля Урал-4320 при прямолинейном движении:  $T_M = 0,2$  с;  $A_\alpha = 5^\circ$ .

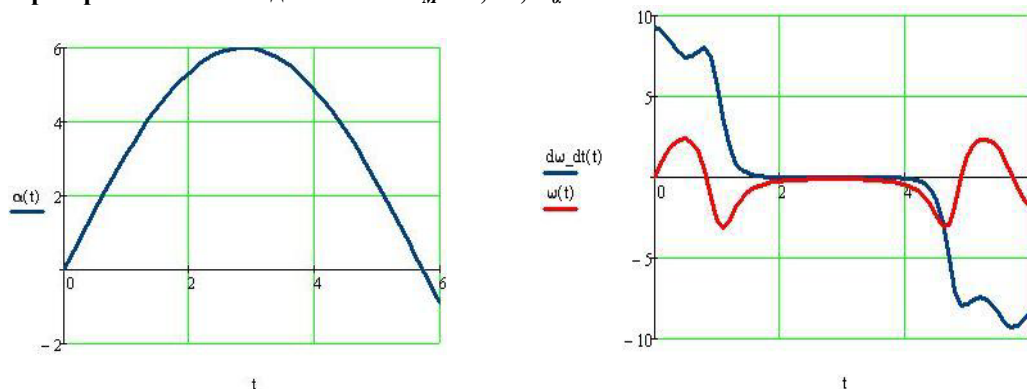


Рис. 5. Изменение угла поворота управляемых колес, угловой скорости и углового ускорения автомобиля Урал-4320 при прямолинейном движении:  $T_M = 0,2$  с;  $A_\alpha = 6^\circ$ .

#### Выводы.

1. В результате проведенного исследования выявлены отрицательная угловая скорости и угловое ускорение в плоскости дороги, которые обуславливают проявление недостаточной поворачиваемости и низкой поворотливости.

2. При прямолинейном движении автомобиль постоянно находится под воздействием различного рода возмущений, приводящих к отклонению его траектории от прямолинейного движения. Это проявляется в появлении отрицательных угловых скоростей и ускорений, что ухудшает управляемость автомобиля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фаробин Я. Е. Теория поворота транспортных машин / Я. Е. Фаробин. – М. : Машиностроение, 1970. – 176 с.
2. Устойчивость автомобиля при малых случайных отклонениях управляемых колес от нейтрального положения / М. А. Подригало, А. А. Бобошко, М. В. Байцур, Д. М. Клец // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту : науково-виробничий збірник. – 2008. – № 2 (7). – С. 5–13.
3. Закин Я. Х. Маневренность автомобиля и автопоезда / Я. Х. Закин. – М. : Транспорт, 1986. – 136 с.
4. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А. С. Литвинов. – М. : Машиностроение, 1971. – 416 с.
5. Тракторы. Теория / В. В. Гуськов, Н. Н. Велев, Ю. Е. Атаманов, Н. Ф. Бочаров, И. П. Ксеневиц, А. С.

- Солонский. – М. : Машиностроение, 1988. – 376 с.
6. Аксенов П. В. Многоосные автомобили / П. В. Аксенов. – М. : Машиностроение, 1989. – 280 с.
7. Смирнов Г. А. Теория движения колесных машин / Г. А. Смирнов. – М. : Машиностроение, 1990. – 352 с.
8. Цимбалин В. Б. Испытания автомобилей / В. Б. Цимбалин, В. Н. Кравец, С. М. Кудрявцев. – М. : Машиностроение, 1978. – 199 с.
9. Подригало М. А. Управляемость и устойчивость автомобиля. Определение понятий (в порядке обсуждения) / М. А. Подригало // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 11. – С. 22–23.
10. Косолапов Г. М. Пути повышения устойчивости автомобиля при торможении : автореф. дис. на соискание ученой степени докт. тех. наук : спец. 05.05.03 / Г. М. Косолапов ; Волгоград. политех. ин-т. – Волгоград, 1973. – 40 с.
11. Таборек Я. Механика автомобиля / Я. Таборек. – М. : Машгиз., 1960. – 252 с.
12. Петров М. А. Работа автомобильного колеса в тормозном режиме / М. А. Петров. – Омск : Западно-сибирское книжное изд-во. Омское отделение, 1973. – 224 с.
13. Динамика автомобиля : монография / [М. А. Подригало, В. П. Волков, Д. М. Клец и др.] ; под ред. М. А. Подригало. – Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2008. – 424 с.
14. Маневренность и тормозные свойства колесных машин / [М. А. Подригало, В. П. Волков, В. И. Кирчатый, А. А. Бобошко]; под ред. М. А. Подригало. – Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2003. – 403 с.