

*Д. М. КЛЕЦ*, канд. техн. наук, доц. ХНАДУ, Харьков

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ КРИТЕРИЯМИ МАНЕВРЕННОСТИ КОЛЕСНЫХ МАШИН**

Разработан метод определения оптимального соотношения показателей маневренности в зависимости от условий и режима движения, а также параметров транспортного средства. Впервые предложен метод построения блокирующих контуров показателей маневренности, который может являться теоретическим обоснованием системы обеспечения управляемости и устойчивости против заноса интеллектуального автомобиля с учетом его динамичности.

**Ключевые слова:** интеллектуальный автомобиль, маневренность, устойчивость, управляемость, динамичность, взаимосвязь, блокирующий контур.

**Введение.** При проектировании автомобиля и в процессе его эксплуатации необходимо выбирать оптимальное соотношение показателей маневренности в зависимости от условий и режима движения, а также параметров транспортного средства. В теории автомобиля отсутствует общее мнение о взаимосвязи показателей маневренности автомобиля. В работе [8] в качестве свойств маневренности приводятся управляемость, поворотливость и вписываемость. Устойчивость рассматривается как составляющее более общего свойства – управляемость, которое проявляется при повороте автомобиля. При движении автомобиля по прямой курсовую устойчивость следует выделять как самостоятельное эксплуатационное свойство. В литературе отсутствует четкая взаимосвязь свойств устойчивости, управляемости и динамичности, реализуемых в различных режимах движения автомобиля.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросам исследования свойств маневренности колёсных машин посвящены работы значительного числа отечественных и зарубежных авторов [1, 2, 4 - 10]. В этих работах даны определения как управляемости, устойчивости, так и динамичности колёсных машин. Рассматривается как курсовая устойчивость, так и траекторные управляемость и устойчивость этих машин [6, 7]. В работе Я. Х. Закина [4] показано, что в неустановившемся режиме движения при повороте колёсной машины устойчивость является одним из свойств комплексного свойства – управляемости. Установившееся движение на повороте характеризуется [4] одним из свойств маневренности – поворачиваемостью. По мнению авторов работы [6] поворотливость характеризует устойчивость движения при установившемся повороте при постоянном радиусе поворота и определяется максимальной угловой скоростью колесной машины.

В работе [7] указывается, что показателями динамичности при разгоне, кроме ускорения, служат также значения пути и времени разгона. Путь и

время разгона автомобиля до максимальной (или какой – либо другой заданной скорости) являются интегральными показателями динамических свойств. Ускорение является дифференциальным или мгновенным показателем динамических свойств автомобиля. Однако в известных исследованиях не приводится взаимосвязь между критериями маневренности колесных машин, данный вопрос требует дополнительных исследований.

**Цель и постановка задач исследования.** Целью исследования является разработка метода определения оптимального соотношения показателей маневренности в зависимости от условий и режима движения, а также параметров транспортного средства.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить коэффициенты устойчивости и управляемости автомобиля;
- определить коэффициент динамичности автомобиля;
- исследовать взаимосвязь между показателями маневренности колесных машин;
- построить блокирующий контур показателей маневренности автомобиля.

**Определение коэффициентов устойчивости и управляемости автомобиля.** В работе [7] в качестве критерия устойчивости движения колесной машины предложен коэффициент устойчивости. Указанный коэффициент равен отношению момента стабилизирующего к возмущающему моменту и определяется из следующего соотношения:

$$K_{уст} = \frac{b}{a} \cdot \frac{R_{\delta_2}}{R_{\delta_1}}, \quad (1)$$

где  $R_{\delta_1}, R_{\delta_2}$  – боковые реакции дороги на передней и задней осях автомобиля;

$a, b$  – расстояние от проекции центра масс автомобиля на горизонтальной плоскости до передней и задней оси автомобиля.

При  $K_{уст} > 1$  движение автомобиля устойчиво, при  $K_{уст} < 1$  – неустойчиво, при  $K_{уст} = 1$  автомобиль находится на грани выхода из зоны устойчивого движения.

Боковые реакции дороги на осях можно определить как [7]

$$R_{\delta_1} = \sqrt{\varphi^2 \cdot R_{z_1}^2 - R_{k_1}^2} = \sqrt{\varphi^2 \cdot R_{z_1}^2 - K_R^2 \cdot R_k^2}; \quad (2)$$

$$R_{\delta_2} = \sqrt{\varphi^2 \cdot R_{z_2}^2 - R_{k_2}^2} = \sqrt{\varphi^2 \cdot R_{z_2}^2 - (1 - K_R)^2 \cdot R_k^2}. \quad (3)$$

где  $K_R$  – коэффициент распределения касательных реакций;

$R_k$  – суммарная касательная реакция на колесах.

$\varphi$  – коэффициент сцепления колес с дорогой;

$R_{z_1}$  и  $R_{z_2}$  – вертикальные реакции на передней и задней осях,

Угловое ускорение, возникающее при входе колесной машины в поворот, определяется из следующего выражения [7]:

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{1}{I_z} \cdot (M_{нов} - M_{сопр}) = \frac{M_{сопр}}{I_z} \cdot (K_{ynp} - 1), \quad (4)$$

где  $M_{нов}$ ,  $M_{сопр}$  – поворачивающий момент и момент сопротивления повороту колесной машины;

$K_{ynp}$  – коэффициент управляемости колесной машины,

При  $K_{ynp} > 1$  колесная машина способна войти в поворот, поскольку при этом возникает положительное угловое ускорение. При  $K_{ynp} \leq 1$  поворот невозможен. Коэффициент управляемости двухосного автомобиля можно определить из следующего соотношения [7]:

$$K_{ynp} = \frac{R_{k_1}}{R_{\delta_2}} \cdot \frac{a}{b} \cdot \sin \alpha + \frac{R_{\delta_1}}{R_{\delta_2}} \cdot \frac{a}{b} \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – средний угол поворота направляющих колес;

$R_{k_1}$  – касательная реакция на переднем направляющем колесе.

После подстановки выражений для боковых и касательных реакций [7]:

$$K_{ynp} = \frac{a}{b} \frac{\frac{dV_{x_1}}{dt} (b^2 + i_z^2 + fhb) \gamma g \bar{\alpha} + V_{x_1}^2 (b + fh) \gamma g \bar{\alpha} + V_{x_1} \frac{b^2 + i_z^2 + fhb}{\cos^2 \alpha} \frac{d\alpha}{dt}}{\frac{dV_{x_1}}{dt} (ab - i_z^2 - fhb) \gamma g \bar{\alpha} + V_{x_1}^2 (a - fh) \gamma g \bar{\alpha} + V_{x_1} \frac{ab - i_z^2 - fhb}{\cos^2 \alpha} \frac{d\alpha}{dt}}, \quad (6)$$

где  $V_{x_1}$  – линейная скорость автомобиля;

$i_z$  – момент инерции относительно вертикальной оси;

$f$  – коэффициент сопротивления качению;

$h$  – высота центра масс автомобиля.

**Определение коэффициента динамичности автомобиля.** Способность автомобиля к быстрому разгону характеризуется ускорением центра масс [7]:

$$\ddot{x}_c = \frac{1}{\delta \cdot m_a} \cdot (P_{тяги} - \sum P_c), \quad (7)$$

где  $P_{тяги}$  – тяговая сила автомобиля;

$m_a$  – масса автомобиля;

$\sum P_c$  – сумма сил сопротивления движению,

$$\sum P_c = P_{\psi} + P_W, \quad (8)$$

$P_\psi$  – сила суммарного дорожного сопротивления,

$$P_\psi = \psi \cdot m_a \cdot g = (f \pm i) \cdot m_a \cdot g, \quad (9)$$

В выражении (7) вынесем за скобки  $\sum P_c$  и получим:

$$\ddot{x}_c = \frac{\sum P_c}{\delta \cdot m_a} \cdot \left( \frac{P_{\text{тяги}}}{\sum P_c} - 1 \right) = \frac{\sum P_c}{\delta \cdot m_a} \cdot (K_{\text{дин}} - 1), \quad (10)$$

где  $K_{\text{дин}}$  – коэффициент динамичности автомобиля,

$$K_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{тяги}}}{\sum P_c} = \frac{P_{\text{тяги}} \cdot V_a}{\sum P_c \cdot V_a} = \frac{N_{\text{тяги}}}{N_c} = \frac{N_c + N_{\text{разг}}}{N_c} = 1 + \frac{N_{\text{разг}}}{N_c}, \quad (11)$$

$N_{\text{тяги}}, N_c, N_{\text{разг}}$  – соответственно, тяговая мощность на ведущих колесах, мощность, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления движению и запас мощности на разгон автомобиля.

Максимально возможное (предельное) ускорение автомобиля [7]:

$$\dot{V}_{\text{пред}} = \varphi \cdot g. \quad (12)$$

После подстановки соотношения (10) в (12), с учетом (9) – получим (допуская  $i = 0$ ):

$$K_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{тяги}}}{m_a \cdot g \cdot \left( f + \frac{k \cdot F}{m_a \cdot g} \cdot V_a^2 \right)}. \quad (13)$$

Учитывая, что [7]

$$P_{\text{тяги}} = \frac{N_{\text{тяги}} \cdot (1 - S_x)}{V_a} = \frac{N_e \cdot \eta_{\text{мп}} \cdot (1 - S_x)}{V_a}, \quad (14)$$

преобразуем (14) к виду:

$$K_{дин} = \frac{N_e \cdot \eta_{mp} \cdot (1 - S_x)}{m_a \cdot g \cdot V_a \cdot \left( f + \frac{k \cdot F}{m_a \cdot g} \cdot V_a^2 \right)}. \quad (15)$$

С увеличением  $N_e$  увеличивается  $K_{дин}$ . Максимальное значение  $(K_{дин})_{max}$  реализуется при  $N_{e max}$ .

$$(K_{дин})_{max} = \frac{N_{e max} \cdot \eta_{mp} \cdot (1 - S_x)}{m_a \cdot g \cdot V_a \cdot \left( f + \frac{k \cdot F}{m_a \cdot g} \cdot V_a^2 \right)}. \quad (16)$$

**Определение взаимосвязи между показателями маневренности колесных машин.** Определим коэффициент устойчивости двухосной машины при движении на повороте:

$$K_{уст} = \frac{R_{\delta_2}}{R_{k_1}} \cdot \frac{b}{a} \cdot \operatorname{cosec} \alpha + \frac{R_{\delta_2}}{R_{\delta_1}} \cdot \frac{b}{a} \cdot \sec \alpha. \quad (17)$$

Сравнивая выражения (17) и (5) определим взаимосвязь между показателями устойчивости и управляемости при криволинейном движении:

$$K_{уст} = \frac{1}{K_{упр}}. \quad (18)$$

При снижении коэффициента устойчивости повышается коэффициент управляемости и наоборот. Полученный результат справедлив для колесных машин с любым типом привода. Одновременное обеспечение устойчивости и управляемости на повороте возможно лишь при значениях  $K_{уст} = 1$  и  $K_{упр} = 1$ .

Определим взаимосвязь между показателями управляемости и динамичности. Для этого решим уравнение (6) относительно величины линейного ускорения:

$$\frac{dV_{x_1}}{dt} = \frac{\frac{a}{b} \left( V_{x_1}^2 (b + fh) \operatorname{tg} \bar{\alpha} + V_{x_1} \cdot \frac{b^2 + i_z^2 + fhb}{\cos^2 \bar{\alpha}} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right)}{K_{y_{np}} \cdot (a \cdot b - i_z^2 - f \cdot h \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha} - \frac{a}{b} \cdot (b^2 + i_z^2 + f \cdot h \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha}} - \frac{K_{y_{np}} \cdot \left( V_{x_1}^2 (a - fh) \operatorname{tg} \bar{\alpha} + V_{x_1} \cdot \frac{ab - i_z^2 - fhb}{\cos^2 \bar{\alpha}} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right)}{K_{y_{np}} \cdot (a \cdot b - i_z^2 - f \cdot h \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha} - \frac{a}{b} \cdot (b^2 + i_z^2 + f \cdot h \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha}}. \quad (19)$$

Подставляя выражение (10) в (19), получим:

$$\frac{\psi \cdot m_a \cdot g + k \cdot F \cdot V_{x_1}^2}{\delta \cdot m_a} \cdot (K_{дин} - 1) = \frac{\frac{a}{b} \left( V_{x_1}^2 (b + fh) \operatorname{tg} \bar{\alpha} + V_{x_1} \cdot \frac{b^2 + i_z^2 + fhb}{\cos^2 \bar{\alpha}} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right)}{K_{y_{np}} \cdot (a \cdot b - i_z^2 - f \cdot h \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha} - \frac{a}{b} \cdot (b^2 + i_z^2 + f \cdot h \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha}} = \frac{K_{y_{np}} \cdot \left( V_{x_1}^2 (a - fh) \operatorname{tg} \bar{\alpha} + V_{x_1} \cdot \frac{ab - i_z^2 - fhb}{\cos^2 \bar{\alpha}} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right)}{K_{y_{np}} \cdot (a \cdot b - i_z^2 - f \cdot h \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha} - \frac{a}{b} \cdot (b^2 + i_z^2 + f \cdot h \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha}}. \quad (20)$$

Решая выражение (20) относительно  $K_{дин}$ , получим зависимость, отображающую взаимосвязь между  $K_{дин}$  и  $K_{y_{np}}$ .

$$K_{дин} = 1 + \frac{\frac{a}{b} \cdot \left[ V_{x_1} (b + f \cdot h) \operatorname{tg} \bar{\alpha} + \frac{B_1}{\cos^2 \bar{\alpha}} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right] \cdot \delta \cdot V_{x_1} \cdot m_a}{(K_{y_{np}} \cdot A_1 - B_1 \cdot a/b) \cdot C_1 \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha}} - \frac{\frac{a}{b} \cdot K_{y_{np}} \left( V_{x_1} (a - f \cdot h) \operatorname{tg} \bar{\alpha} + \frac{A_1}{\cos^2 \bar{\alpha}} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right) \cdot \delta \cdot V_{x_1} \cdot m_a}{(K_{y_{np}} \cdot A_1 - B_1 \cdot a/b) \cdot C_1 \cdot \operatorname{tg} \bar{\alpha}}; \quad (21)$$

Аналогично, подставляя в выражение (1) зависимости для определения касательных, боковых и нормальных реакций, полученные автором в работе [7], получим с учетом (10) и (8) выражение, определяющее взаимосвязь между показателями устойчивости и динамичности

$$K_{уст} = \frac{b}{a} \cdot \sqrt{\frac{\varphi^2 \cdot \left( m_a \cdot g \cdot \frac{a}{L} + D_1 \cdot \frac{h-r_\delta}{L} \right)^2 - (1-K_R)^2 \cdot D_1^2}{\varphi^2 \cdot \left( m_a \cdot g \cdot \frac{b}{L} - D_1 \cdot \frac{h-r_\delta}{L} \right)^2 - K_R^2 \cdot D_1^2}}. \quad (22)$$

В зависимостях (21) и (22) использованы следующие коэффициенты:  $A_1 = a \cdot b - i_z^2 - f \cdot h \cdot b$ ,  $B_1 = b^2 + i_z^2 + f \cdot h \cdot b$ ,  $C_1 = \psi \cdot m_a \cdot g + k \cdot F \cdot V_{x1}^2$ ,

$D_1 = \frac{C_1}{\delta} (K_{дин} - 1) + kFV_{x1}^2$ . Указанные выражения, описывающие взаимосвязь

между показателями маневренности, позволяют перейти к построению их блокирующих контуров.

**Блокирующий контур показателей маневренности автомобиля.** На основе предложенной математической модели (зависимости (21) и (22)) предлагается для решения указанной задачи использовать метод блокирующих контуров, по аналогии с предложенным М.Б. Громаном [3] методом для эвольвентных зубчатых передач. Блокирующим контуром показателей маневренности автомобиля будем называть область значений коэффициентов  $K_{уст}$ ,  $K_{упр}$  и  $K_{дин}$ , удовлетворяющих ограничениям по их минимально и максимально допустимым величинам в различных дорожных условиях, для автомобилей с различными весовыми, геометрическими характеристиками, а также различными типами привода.

Границы блокирующего контура отсекают те значения коэффициентов  $K_{упр}$ ,  $K_{уст}$  и  $K_{дин}$ , которые недопустимы по условиям обеспечения показателей маневренности. Значения, расположенные внутри контура, допустимы, но каждому изменению характеристик системы "водитель - автомобиль - дорожная среда" соответствует свое сочетание качественных показателей. Для выбора показателей маневренности при проектировании или экспертизе на блокирующий контур наносятся зависимости качественных показателей, с использованием которых внутри контура выбираются коэффициенты  $K_{упр}$ ,  $K_{дин}$  и  $K_{уст}$  с оптимальным сочетанием качественных показателей. На рис. 1-2 построены блокирующие контуры показателей маневренности условного автомобиля при движении его на третьей передаче со следующими характеристиками:  $a = 1,4$  м;  $m = 1430$  кг;  $b = 1,33$  м;  $k \cdot F = 0,58$  Н·с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;  $V_{x1} = 9..15$  м/с;  $r_\delta = 0,29$  м;  $f_0 = 0,013$ ;  $h = 0,546$  м;  $\eta_{мп} = 0,9$ ;  $S_x = 0,2$ ;  $\psi = 0,03$ . При построении блокирующих контуров в качестве варьируемых параметров использованы различные коэффициенты сцепления колес с дорогой и типы привода, различные значения угла и угловой скорости поворота направляющих колес, а также различные значения коэффициента использования мощности.

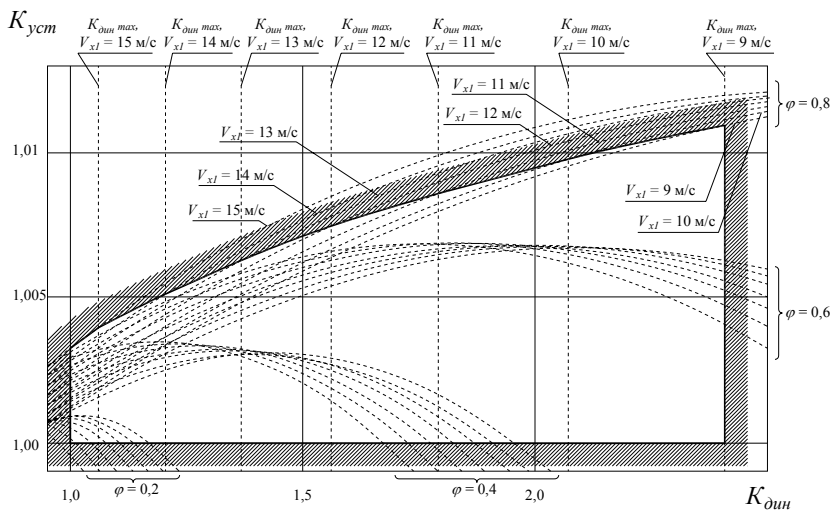


Рис. 1 – Блокирующий контур показателей устойчивости и динамичности автомобиля при различных значениях коэффициента сцепления колес с дорогой

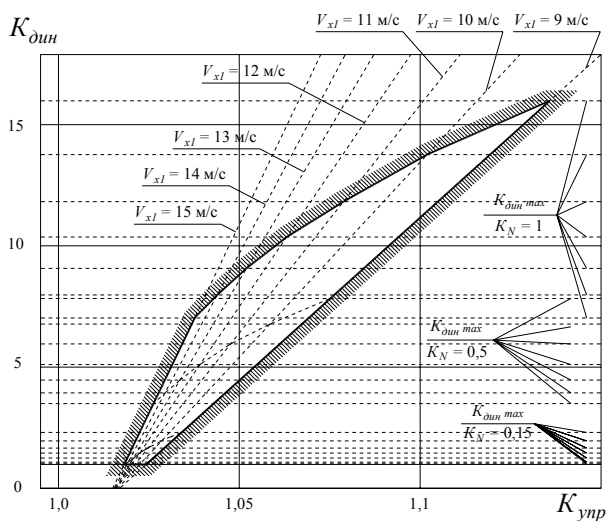


Рис. 2 – Блокирующий контур показателей динамичности и управляемости автомобиля при различных значениях коэффициента использования мощности

**Выводы.** 1. Полученные аналитические выражения позволяют определить взаимосвязь между геометрическими, весовыми показателями, сцепными свойствами колесных машин, управляющими воздействиями водителя и показателями динамичности, управляемости, а также устойчивости против заноса.



2. При снижении коэффициента устойчивости повышается коэффициент управляемости и наоборот. Полученный результат справедлив для двухосных колесных машин с любым типом привода и позволяет решать оптимизационную задачу выбора соотношения показателей устойчивости и управляемости в различных условиях движения.

3. Предложенный метод построения блокирующих контуров показателей маневренности может являться теоретическим обоснованием системы обеспечения управляемости и устойчивости против заноса интеллектуального автомобиля с учетом его динамичности.

**Список литературы:** 1. *Бобошко А. А.* Підвищення маневреності колісних тракторів і самохідних шасі: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.02 / ХНАДУ. – Харьков, 2002. – 19 с. 2. *Волков В. П.* Теория эксплуатационных свойств автомобиля: [уч. пособие] / В. П. Волков. – Харьков: ХНАДУ, 2003. – 292 с. 3. *Громан М.Б.* О блокирующих контурах эвольвентного зацепления. / М. Б. Громан – Вестник машиностроения – 1952. – №7. – С. 12 – 17. 4. *Закин Я. Х.* Маневренность автомобиля и автопоезда / Я. Х. Закин. – М.: Транспорт, 1986. – 136 с. 5. *Литвинов А. С.* Управляемость и устойчивость автомобиля / А. С. Литвинов. – М: Машиностроение, 1971. – 416 с. 6. Маневренность и тормозные свойства колесных машин / М. А. Подригало, В. П. Волков, В. И. Курчатый, А. А. Бобошко / Под ред. М. А. Подригало. - Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2003. – 403 с. 7. *Подригало М. А., Волков В. П., Бобошко А. А., Павленко В. А., Файст В. Л., Клец Д. М., Редько В. В.* Динамика автомобиля. – Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2008. – 426 с. 8. Стабильность эксплуатационных свойств колесных машин / М. А. Подригало, В. П. Волков, В. А. Карпенко и др. / Под ред. М. А. Подригало. – Харьков ХНАДУ, 2003. – 614 с. 9. *Эллис Д. Р.* Управляемость автомобиля. – М: Машиностроение, 1975.–216 с. 10. Electronic Stability Control Systems : Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 126. - Office of Regulatory Analysis and Evaluation, National Center for Statistics and Analysis, 2006. – 142 p.

*Поступила в редколлегию 24.04.2013*

УДК 629.017

**Определение взаимосвязи между критериями маневренности колесных машин / Д. М. Клец** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 31 (1004). – С. 35–43. – Бібліогр.: 10 назв.

Розроблено метод визначення оптимального співвідношення показників маневреності залежно від умов і режиму руху, а також параметрів транспортного засобу. Вперше запропоновано метод побудови блокуючих контурів показників маневреності, який може бути теоретичним обґрунтуванням системи забезпечення керованості і стійкості проти заносу інтелектуального автомобіля з урахуванням його динамічності.

**Ключові слова:** інтелектуальний автомобіль, маневреність, стійкість, керованість, динамічність, взаємозв'язок, блокуючий контур.

A method of determining the optimum ratio between maneuverability indicators depending on the conditions and mode of motion, and vehicle parameters is developed. For the first time a blocking contours constructing method of performance maneuverability, which may be the theoretical basis of the intelligent vehicle manageability and skidding resistance system based on its dynamism.

**Key words:** smart car, maneuverability, stability, handling, dynamics, interconnection, blocking contour.