

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-62-73



УДК 629.07

UDC 629.07

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УПРАВЛЯЕМОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С БОРТОВЫМ СПОСОБОМ ПОВОРОТА

Куклина Ирина Геннадьевна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных и дорожных машин, Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород, e-mail: istkuklina@rambler.ru

Левшунув Лев Сергеевич,

к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных и дорожных машин, Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород, e-mail: wlev.lev@yandex.ru

✉¹ **Молев Михаил Юрьевич,**

студент, Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород, e-mail: molev.michail@yandex.ru

Федоренко Александр Викторович,

старший преподаватель кафедры «Автомобили и тракторы», Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород, e-mail: alex.fedorenko.tech@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты анализа оценок управляемости автомобилей с бортовым способом поворота. Описаны основные методы проверки, показаны их основные достоинства и недостатки. Предложена методика оценки влияния конструкционных параметров автомобиля на его управляемость. Разработана математическая модель управляющего воздействия на транспортное средство, для его движения по траектории, соответствующей требованиям Глобальных Технических Правил № 8 для автомобилей, оснащённых механизмом поворота управляемых колёс. Предложена

ON THE ISSUE OF ASSESSING THE CONTROLLABILITY OF VEHICLES WITH AN ON-BOARD TURN METHOD

Kuklina Irina Gennadievna,

candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of construction and road machinery, Nizhny Novgorod state technical university, Nizhny Novgorod, e-mail: istkuklina@rambler.ru

Levshunov Lev Sergeevich,

candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of construction and road machinery, Nizhny Novgorod state technical university, Nizhny Novgorod, e-mail: wlev.lev@yandex.ru

✉¹ **Molev Mishail Yurievich,**

student, Nizhny Novgorod state technical university, Nizhny Novgorod, e-mail: molev.michail@yandex.ru

Fedorenko Aleksandr Viktorovich,

senior lecturer, department of Automobiles and tractors, Nizhny Novgorod state technical university, Nizhny Novgorod, e-mail: alex.fedorenko.tech@yandex.ru

Annotation. The article presents the results of an analysis of assessments of the controllability of vehicles with an on-board turn method. The main verification methods are described, their main advantages and disadvantages are shown. A methodology is proposed for assessing the influence of the vehicle's structural parameters on its controllability. A mathematical model of the control action on a vehicle has been developed for its movement along a trajectory that meets the requirements of Global Technical Regulations No. 8 for vehicles equipped with a steering wheel rotation mechanism. A method is proposed for experimentally verifying the obtained results of

методика экспериментальной проверки получаемых результатов управляемости и устойчивости движения по заданной траектории, на основании тех же контролируемых параметров, что и для автомобилей с управляемыми колёсами: общая величина смещения транспортного средства и величина боковой скорости при завершении манёвра. Полученные результаты позволяют наметить наиболее эффективные пути повышения управляемости и устойчивости движения транспортных средств с бортовым способом поворота.

Ключевые слова: УПРАВЛЯЕМОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, БОРТОВОЙ ПОВОРОТ, МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

controllability and stability of movement along a given trajectory, based on the same controlled parameters as for vehicles with controlled wheels: the total amount of vehicle displacement and the amount of lateral velocity at the end of the maneuver. The results obtained allow us to identify the most effective ways to improve the controllability and stability of vehicles with an on-board turn method.

Keywords: VEHICLE HANDLING, VEHICLES WITH AN ON-BOARD TURN METHOD, TEST METHODS, MATHEMATICAL MODELING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Одним из результатов развития беспилотных транспортных средств явилось увеличение количества машин, оснащённых бортовым способом поворота, это связано с более простым способом реализации управления, большей компактностью и обеспечением возможности движения с малыми радиусами поворота. На рис. 1 и 2 показаны примеры таких машин, спроектированных и изготовленных в последнее время.



Рисунок 1 – Примеры современных беспилотных транспортных средств, оснащённых бортовой системой поворота

Отсутствие поворота управляемых колёс у машин описываемого типа делают невозможным применение стандартных методик оценки качества управления, применяемых для большинства обычных транспортных средств. То есть под управляемостью машин с бортовым поворотом следует понимать не способность транспортного средства точно следовать углу поворота управляемых колёс [1], а совокупность качеств, обеспечивающих лёгкое и быстрое изменение направления движения. Поэтому в научной литературе для техники данного вида используют такие определения как: «поворотливость» – способность изменять направление движения и двигаться по заданной траектории с различными радиусами кривизны или «устой-

чивость на курсе», то есть способность машины выдерживать заданное направление прямолинейного движения [2]. В ряде работ [3, 4] предлагалось оценивать управляемость машин по отношению между фактической и теоретической скоростями поворота, однако дальнейшие исследования [4] показали, что описанный критерий не может быть применим при прямолинейном движении (при теоретической скорости поворота, равной нулю), а также при неустановившемся движении в повороте. Поэтому авторами [4] для оценки управляемости автомобиля с бортовым способом поворота предложено использовать такой показатель как «величина угла увода транспортного средства с теоретической траектории». Также критерием управляемости специального транспортного средства можно принять среднюю скорость движения при перемещении по траектории, связанной с постоянным изменением направления движения, однако, в работе [5] было показано, что данный параметр в большей степени характеризует удельную мощность исследуемой техники, а не качество процесса управления.



Рисунок 2 – Примеры управляемых вездеходных транспортных средств особо малого класса

Прямое применение методик оценки управляемости транспортных средств, оснащённых бортовыми системами поворота, описанных в стандартах, применяемых для оценки свойств обычных автомобилей, показывает, что управляемость таких машин значительно хуже [6]. Причём более худшие результаты показываются на тестах, в которых требуется изменение направления поворота, таких как в тестах типа «переставка», а при выполнении манёвров «поворот» результаты движения машин с бортовым поворотом очень близки к нормируемым значениям. В работе [7] были проведены исследования, в которых проводилась оценка соответствия исследуемой техники на соответствие требованиям ГОСТ Р 50943-2011 «Снегоболотоходы. Технические требования и методы испытаний». При этом оценивались такие показатели как «усилие на руле», «стабилизация рулевого управления», «рывок руля» (только для оценки курсовой устойчивости транспортного средства). В данной работе было отмечено, что: бортовой способ поворота, накладывает ограничения на методику проведения испытаний, а также требует корректировки предельно-допустимых параметров управляемости на скоростях. Указанные обстоятельства позволяют сделать однозначный вывод о том, что для оценки управляемости машин с бортовым способом поворота необходимо применение специфического критерия.

В работе [2] научной новизной заявлен критерий оценки управляемости в виде частной производной угловой скорости поворота по изменению управляющего воздействия – поворота штурвала. Кривизна вычисляется как отношение угловой скорости корпуса относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести машины, к линейной скорости центра тяжести машины, направленной вдоль продольной оси. Интересно рассматривают управляемость в фундаментальной механике [8]. Согласно этим работам, система считается управляемой, если в исследуемый момент времени существуют управляющее воздействие, которое может перевести систему из начального состояния в любое заданное состояние. Скорость этого перевода и позволяет сравнить управляемость двух транспортных средств. Подобный подход реализуется в работе [9], в которой приводится определение, согласно которому управляемостью называют

«возможность управляемого перехода из одного режима с установившимся движением в другой». При этом управляемым криволинейным движением следует считать возможность управляемого перехода из одного режима с установившимся движением в другой. Если движение осуществляется независимо от управляющих воздействий, либо реакция машины на управляющее воздействие неопределенна, то такое движение называют неуправляемым.

Отдельным показателем управляемости является показатель фазовой напряжённости управляемых воздействий, представляющий собой отставание управляющих воздействий по фазе по отношению к выбранной траектории [5]. Для обычных автомобилей данный показатель принято называть длительностью переходного процесса.

В работах [10, 11] было отмечено, что для оценки управляемости колёсного транспортного средства без учёта квалификации водителя необходимо применять автоматическое воздействие на рулевое управление. Таким образом, исходя из вышесказанного следует сделать вывод о том, что оценка управляемости колёсных транспортных средств с бортовым поворотом может быть выполнена с использованием заранее заданного управляющего воздействия $w(t)$, при котором должно осуществляться движение по траектории $y(t)$, а сравнение различных конструкций может быть оценено величиной отклонения от идеальной траектории $x(t) = y(t) - y_n(t)$, где $y_n(t)$ – математическое описание идеализированной траектории. Тогда искомая величина управляемости, как функция скорости перехода системы из одного состояния системы в другое, может быть представлена в виде производной по времени функции $y_n(t)$. Дополнительными условиями проверки управляемости должна быть длительность переходного процесса при изменении направления движения и отсутствие влияния мощности двигателя. Из всех существующих методов проверки управляемости для описанных целей будет подходить только движение по усечённой траектории (испытания на соответствие требований Глобальных Технических Правил № 8), так как оно происходит на постоянной скорости и мощность двигателя не влияет на изменение траектории, необходимо учитывать, что при испытании данного типа происходит изменение направления движения, что позволяет оценить не только поворачиваемость транспортного средства, но и задержку при изменении направления движения, которая в теории регулирования носит название «длительность переходного процесса».

2 Материалы и методы

Исходя из положений, описанных в предыдущем разделе, задача оценки управляемости транспортного средства с бортовым поворотом может быть определена исходя из отклонения текущего положения транспортного средства, от заданного. Так как, величина отклонения, допустимая для транспортного средства должна быть достаточно малой величиной, то для её математического описания допустима линеаризация значений отклонений, то есть разложение функции отклонения $\theta(y)$ в ряд Тейлора в окрестности задаваемой траектории движения. Так как линеаризация отклонений подразумевает наличие только первой производной по отклонению искомая функция примет вид:

$$\theta(y^II, x) = \theta(y^II) + Hx, \quad \text{где } H = \frac{\partial \theta(y^II)}{\partial y^II},$$

что подтверждает возможность оценки управляемости объекта по величине отклонения от заданной траектории как с практической, так и с математической точки зрения. Согласно Глобальных Технических Правил ООН № 8 [12] величина x (в качестве величины отклонения принято суммарное боковое смещение автомобиля) находится как двойной интеграл от бокового ускорения автомобиля. При этом боковое ускорение не должно приводить к опрокидыванию транспортного средства, с учётом того, что большинство машин указанного типа комплектуются колёсами высокой проходимости большого радиуса, что приводит к значительному увеличению высоты центра тяжести. Определим предельное значение данного параметра.

Опрокидывание транспортного средства с бортовым поворотом возможно при выполнении следующих условий: колесо со стороны автомобиля, наиболее удалённого от центра поворота не имеет возможности перемещаться вдоль направления под действием центробежной силы. Центробежная сила, действующая на автомобиль, создаёт момент, превышающий по величине стабилизирующий момент от массы автомобиля. Тогда условие опрокидывания автомобиля примет вид:

$$g \frac{B}{2} > ah \rightarrow a < \frac{gB}{2h},$$

где B – ширина колеи транспортного средства, м; h – высота расположения центра масс, м; a – боковое ускорение транспортного средства $м/с^2$. Полученные данные для существующих типов машин, оснащённых бортовым поворотом сведены в табл. 1.

Полученные данные свидетельствуют о том, что для большинства транспортных средств с бортовым поворотом проверка управляемости при движении с боковым ускорением, равным 0,75g или 7,35 $м/с^2$ не приводит к опрокидыванию во время движения.

Таблица 1 – Значения предельно-допустимого значения бокового ускорения движения машин, оснащённых системой бортового поворота по условиям опрокидывания

№ п/п	Марка машины	Ширина колеи, м	Высота центра масс, м	Максимальное значение бокового ускорения, $м/с^2$
1	Корсак бхб [13]	1,600	0,70	11,2
2	ГПИ 3901 [14]	2,550	1,12	11,15
3	МРК [15]	2,250	1,32	8,35
4	Тингер Армо [16]	1,700	0,70	11,9
5	ШЕРП Макс [16]	2,520	1,55	7,96
6	Бурлак [16]	2,900	1,750	8,12

Тогда зададим характер движения таких машин по аналогии с требованиями Глобальных Технических Правил ООН № 8 как:

$$a_y = \begin{cases} 7,5 \text{ } \overleftrightarrow{\text{m/c}^2} \text{ } \text{при } t \in [0; 0,18]c \\ -7,5 \text{ } \overleftrightarrow{\text{m/c}^2} \text{ } \text{при } t \in [0,18; 0,54]c \\ 0 \text{ } \overleftrightarrow{\text{m/c}^2} \text{ } \text{при } t \in [0,54; \infty]c \end{cases}$$

Радиус кривизны траектории может быть найден из условий:

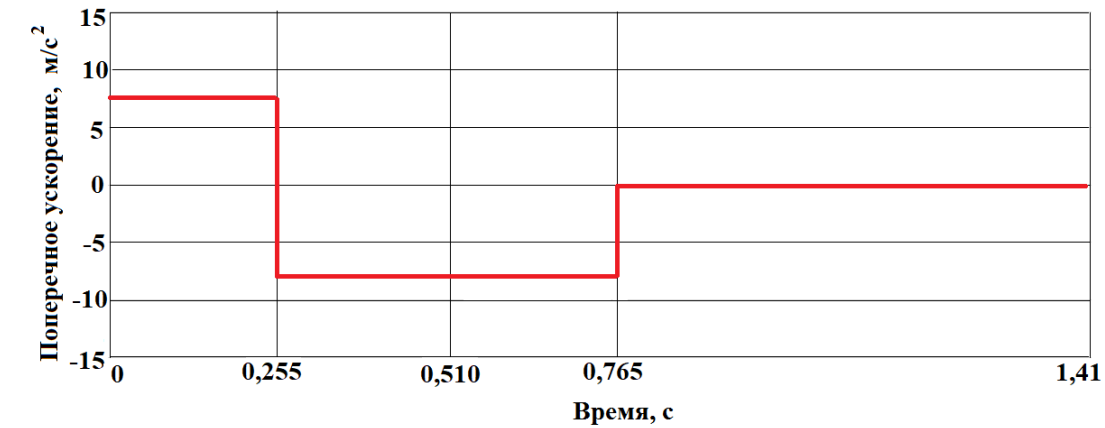
$$a_y = v^2/R. R = S/d\alpha = vdt/d\alpha, \frac{d\alpha}{dt} = (v_1 - v_2)/B,$$

где v – скорость движения транспортного средства, $м/с$; R – радиус кривизны траектории, м; α – угол поворота транспортного средства, град; $d\alpha/dt$ – скорость поворота транспортного средства. Откуда:

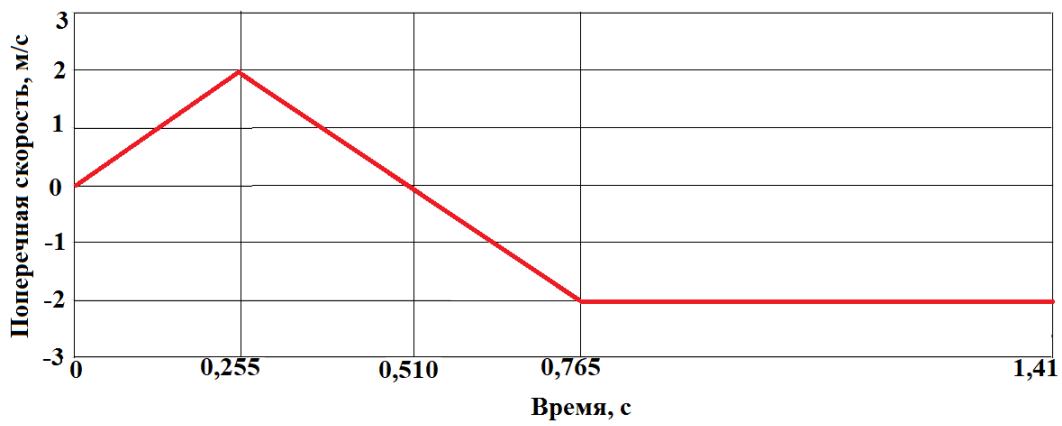
$$R = v^2/a_y = Bv/\Delta v \rightarrow \Delta v = a_y B/v,$$

где Δv – разница скоростей вращения колёс левого и правого борта движения транспортного средства, $м/с$.

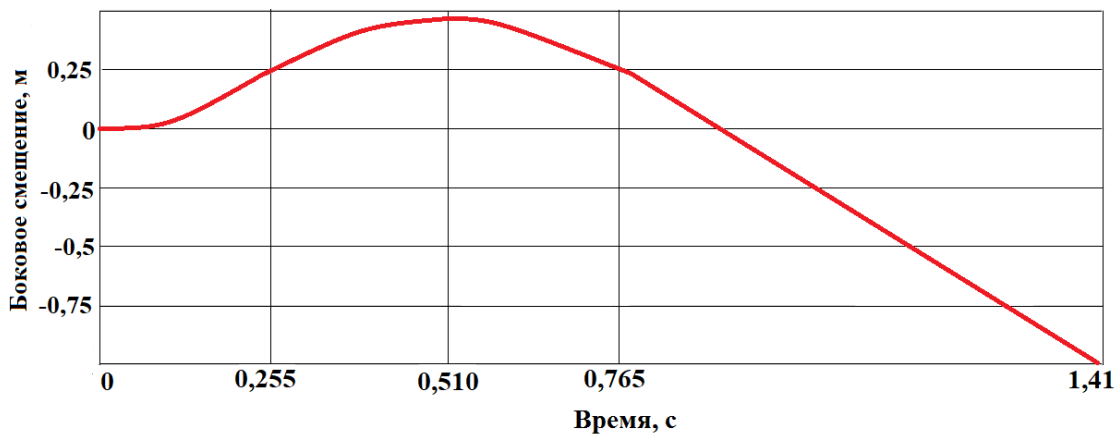
Относительная разница скоростей вращения колёс Ψ будет равняться $a_y B/v^2$. Тогда, исходя из вышеизложенного управляющее воздействие на колёса левого и правого борта транспортного средства с бортовым способом поворота должно обеспечивать параметры движения, показанные на рис. 3.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Зависимости изменения бокового ускорения (а), боковой скорости (б) и бокового перемещения (в) от времени при испытании транспортного средства с бортовым поворотом на управляемость

При этом, чтобы обеспечить точность исследования, заданную в Глобальных Технических Правилах ООН № 8, при снижении величины бокового ускорения в два раза необходимо увеличить время бокового смещения автомобиля на величину равную по сравнению со стандартными методами испытаний.

Ключевой особенностью представленных зависимостей является отсутствие в них взаимосвязи с линейной скоростью движения, которая может быть выбрана исходя из конструктивных особенностей испытуемой техники. Поэтому предложенная методика позволяет сравнивать между собой управляемость различной техники с бортовым способом поворота. После назначения скорости движения при испытаниях можно найти такие параметры движения, как радиус поворота, равный v^2/a_Y и относительное изменение скорости вращения колёс левого и правого борта $\Psi = a_Y B/v^2$. Изменение последнего показателя от времени показано на рис. 3.

На рис. 4 приведены значения изменения скоростей вращения колёс каждого из бортов, обеспечивающих постоянную скорость движения, а на рис. 5 показано изменение угла отклонения положения кузова испытуемого объекта относительно прямолинейного движения, рассчитанного из условия:

$$R = \frac{v dt}{d\alpha} \rightarrow d\alpha = \frac{v}{R} dt = a_Y \frac{v}{v^2} dt = \frac{a_Y}{v} dt,$$

$$\alpha = \int d\alpha = \int \frac{v}{R} dt = \int a_Y \frac{v}{v^2} dt = \int \frac{a_Y}{v} dt. \quad (1)$$

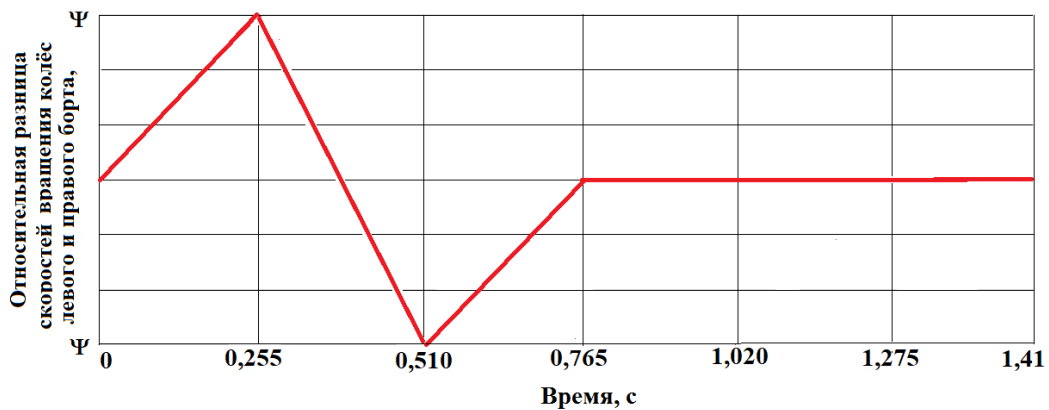


Рисунок 4 – Закон управляющего воздействия на колёса транспортного средства с бортовой системой поворота для оценки его управляемости

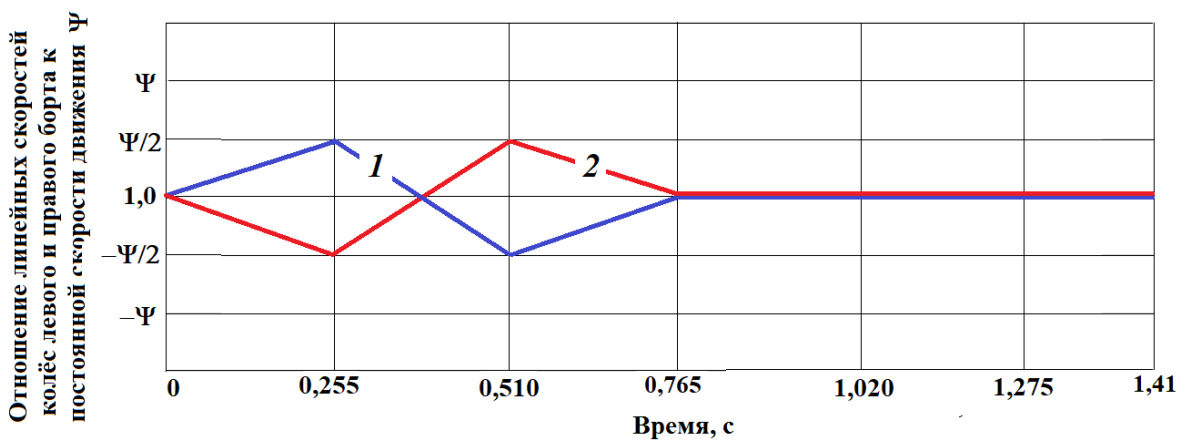


Рисунок 5 – Пример закона управляющего воздействия на колёса правого (1) и левого (2) бортов транспортного средства при проведении испытания на управляемость с поддержанием постоянной линейной скорости

3 Результаты исследований

Следует отметить, что реализация предложенной схемы может быть выполнена только на машинах с индивидуальным приводом на колёса. Наиболее же распространённые конструкции осуществляют поворот путём снижения скорости вращения колёс одного борта. Такой способ поворота приводит к уменьшению скорости движения машин. Пример закона управляющего воздействия на колёса правого (1) и левого (2) бортов транспортного средства при проведении испытания на управляемость с изменением линейной скорости показан на рис. 6.

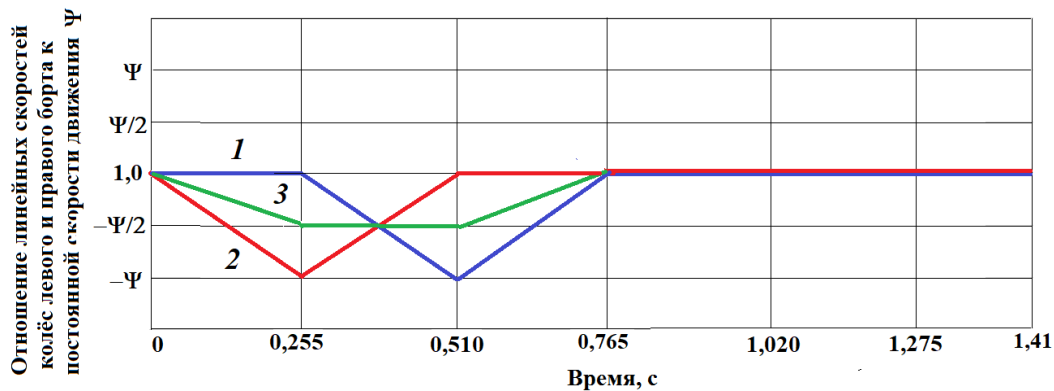


Рисунок 6 – Пример закона управляющего воздействия на колёса правого (1) и левого (2) бортов транспортного средства при проведении испытания на управляемость при движении с торможением бортов. Скорость движения центра масс транспортного средства будет меняться по закону (3) постоянной линейной скорости

Тогда, на втором участке траектории движения средства с бортовым способом поворота при движении с заданным радиусом боковое ускорение будет меньше на величину равную $a_{\Psi}/a_{Y0} = v^2/v_0^2 = \Psi^2/4 = 14B^2/v^4$.

Тогда с учётом того, что изменение продольной скорости на первом и третьем участке (см. рис 5.) подчиняется линейному закону, а на втором и четвёртом остается постоянным, то изменение ускорения на первом и третьем участке примет вид:

$$a_Y = \frac{14,0 \cdot 7 \cdot B^2}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^4} = \frac{98 \cdot B^2}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^4}. \quad (2)$$

Общий вид зависимости изменения бокового ускорения движения машины с бортовым способом поворота примет вид, показанный на рис. 7.

Интегрируя уравнение (2) по времени, найдём скорость бокового смещения автомобиля:

$$v_Y = \int a dt = \frac{98 \cdot B^2}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^4} = \frac{\frac{98}{-3 \cdot \frac{0,255}{\Psi}} \cdot B^2}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^3} = \frac{128B^2\Psi}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^3}. \quad (3)$$

Полученная зависимость изменения боковой скорости при повороте с торможением одного из бортов показана на рис. 8.

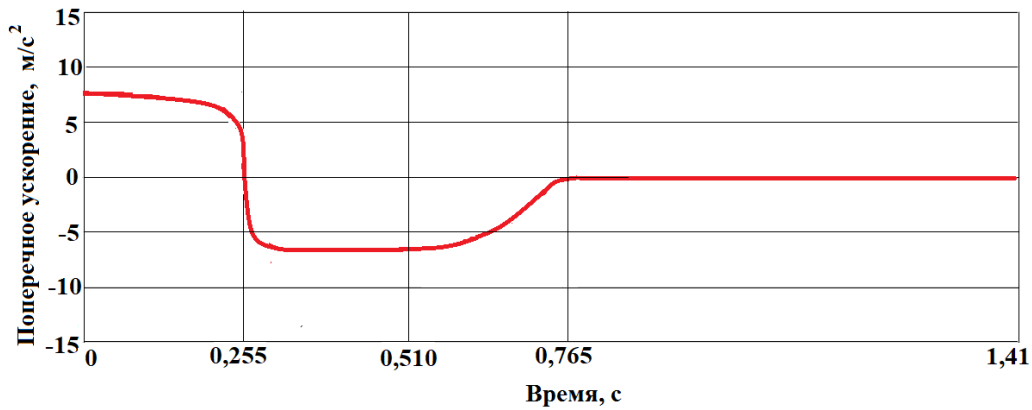


Рисунок 7 – Зависимости изменения бокового ускорения от времени при испытании транспортного средства с бортовым поворотом на управляемость при условии движения с непостоянной скоростью, обусловленной торможением одного борта относительно другого

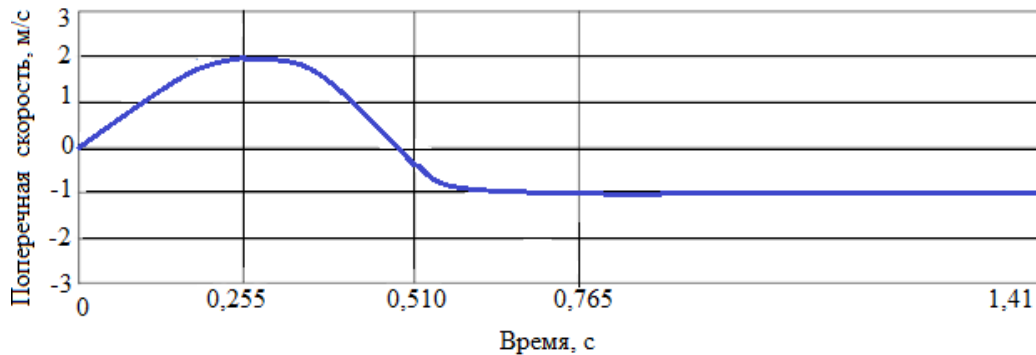


Рисунок 8 – Зависимости изменения боковой скорости перемещения транспортного средства от времени при испытании транспортного средства с бортовым поворотом на управляемость при условии движения с непостоянной скоростью, обусловленной торможением одного борта относительно другого

Сравнительный анализ траекторий движения транспортных средств с бортовым поворотом на управляемость при условии движения с постоянной и непостоянной скоростью, показан на рис. 9.

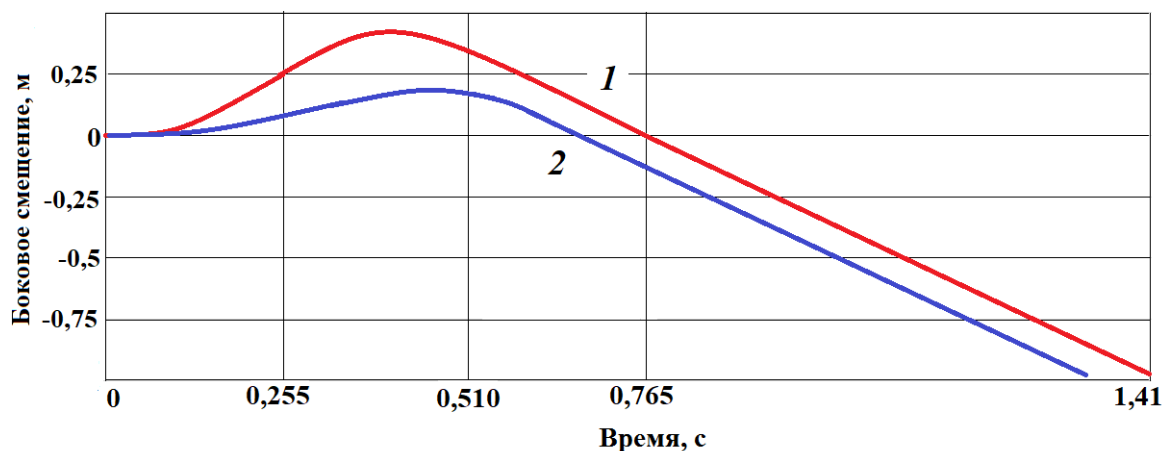


Рисунок 9 – Зависимости изменения бокового перемещения транспортного средства от времени при испытании транспортного средства с бортовым поворотом на управляемость при условии движения как с постоянной (1) так и непостоянной (2) скоростями

Таким образом, для оценки управляемости транспортно-технологических машин и комплексов, поворот которых осуществляется за счёт разницы в скоростях движения движителей левого и правого борта предлагается использовать испытание, аналогичное применяемому для оценки управляемости автомобилей с управляемыми колёсами и называемому «движение по усечённой синусоиде». Так же, как и в базовом методе оценки управляемости объекта испытания предлагается оценивать по такому показателю как величина отклонения от идеализированной траектории движения. При этом управляющее воздействие на объект будет задаваться не как угол и скорость поворота управляемых колёс, а как разница в скоростях движения движителей левого и правого борта. Изменение данного параметра во времени показано на рис. 5. Так как рассматриваемая техника является специфической и в общем виде не предназначенной для движения по дорогам общего пользования, то для каждого образца будет своя скорость движения, что не позволяет применять какое-либо постоянное значение скорости движения испытываемых машин. Поэтому испытания следует проводить на той скорости движения, на которую рассчитан объект исследования. При этом управляемость будет оцениваться по величине бокового смещения. Единый характер движения в боковом направлении обеспечивается реализацией одинакового характера изменения бокового ускорения во времени, показанного на рис. 6, что приводит к тому, что и скорости бокового смещения и их величины теоретически у всех машин исследуемого класса будут одинаковы, что и позволит оценить управляемость как разницу в боковом смещении при одинаковых управляющих воздействиях у разных транспортно-технологических машин.

4 Обсуждение и заключение

Разработанный алгоритм оценки управляемости транспортных средств с бортовым способом поворота позволяет оценивать управляемость специальных транспортно-технологических машин на единых методологических принципах с машинами, поворот которых осуществляется за счёт управляемых колёс. При этом предложенная методика может быть использована для оценки машин разных классов, имеющих различную эксплуатационную скорость движения. Применение данной методики позволяет научно-обоснованно оценивать влияние вносимых изменений в конструкцию машин на управляемость как на этапе проектирования, так и на этапе доводочных испытаний.

Список литературы

- 1 Гинцбург Л.Л. Методы оценки управляемости автомобиля на поворотах / Л.Л. Гинцбург, М.А. Носенков // Автомобильная промышленность. – 1971, № 2. – С. 14 – 17.
- 2 Кондаков, С. В. Повышение подвижности быстроходной гусеничной машины путем автоматизации системы управления криволинейным движением / С. В. Кондаков // Министерство образования и науки Российской Федерации; Федеральное агентство по образованию; Южно-Уральский государственный университет Кафедра «Специальные и дорожно-строительные машины». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 110 с.
- 3 Наумов, В.Н. Алгоритм предотвращения неуправляемого движения гусеничных роботов / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, А.А. Пехтерев, В.И. Рубцов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1(186). – С. 29-42.
- 4 Стадухин, А.А. Метод определения границ управляемого движения гусеничной машины / А.А. Стадухин, В.Б. Холоденко, Н.А. Мокрецов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – №2. – С. 115-126.
- 5 Исследование динамики управляемого движения быстроходных гусеничных машин / В. Б. Держанский, И. А. Жебелев, И. А. Тараторкин [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2008. – № 3(72). – С. 86-99.
- 6 Чернышев Н.В. Комплексная система управления поворотом боевой колёсной машины 8×8: диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03 /; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. – Москва, 2009. – 118 с.: ил.

- 7 Федоренко, А. В. Испытания по определению параметров управляемости легкого колесного снегоболотохода с бортовым способом поворота / А. В. Федоренко, К. Я. Лелиовский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2023. – № 2(141). – С. 89-96.
- 8 Александров, В. В. Лекции по механике управляемых систем: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "010701 Фундаментальная математика и механика" / В. В. Александров, С. С. Лемак, Н. А. Парусников - М.: – Москва : Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – 2020. – 165 с.
- 9 Бекетов С.А. Теория управляемого движения гусеничных машин / С.А. Бекетов. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2017. – 125 с.
- 10 Катанаев, Н. Т. Системные оценки управляемости колесных машин / Н. Т. Катанаев // Известия МГТУ МАМИ. – 2012. – Т. 1, № 1(13). – С. 34-41.
- 11 Катанаев, Н. Т. Системные и несистемные оценки управляемости автомобиля / Н. Т. Катанаев, А. В. Лепешкин // Известия МГТУ МАМИ. – 2015. – Т. 1, № 1(23). – С. 112-116.
- 12 Аналитическое сравнение показателей управляемости автомобилей при выполнении манёвров «Переставка» и «Движение по усечённой траектории» / Ю. И. Молев, М. Г. Червастов, С. В. Лазаревич, А. В. Ерофеева // Воронежский научно-технический Вестник. – 2025. – Т. 1, № 1(51). – С. 114-124.
- 13 Разработка многоосного вездеходного транспортного средства особо легкого класса с гидрообъемной трансмиссией / В. С. Макаров, А. М. Беляев, Д. М. Беляев [и др.] // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы : сборник материалов 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров, Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2016. – С. 162-167.
- 14 Гончаров, К. О. Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К. О. Гончаров, В. С. Макаров, В. В. Беляков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 2. – С. 10.
- 15 Kurkin, A. Autonomous Robotic System for Coastal Monitoring / A. Kurkin, E. Pelinovsky, D. Tyugin, A. Giniyatullin, O. Kurkina, V. Belyakov, V. Makarov, D. Zeziulin, K. Kuznetsov // Twelfth international conference on the Mediterranean coastal environment (MEDCOAST 15). – 2015. – Vols 1 and 2. –P. 933-943.
- 16 Тарарыкин, А. М. Перспективный облик и основные характеристики пожарного автомобиля первой помощи на базовом шасси вездехода - амфибии / А. М. Тарарыкин, А. В. Калач // Техносферная безопасность. – 2022. – № 1(34). – С. 59-65.

References

- 1 Ginzburg, L.L. Methods for Assessing Vehicle Controllability on Corners. Ginzburg, M.A. Nosenkov. Automotive Industry. 1971, no. 2, pp. 14–17.
- 2 Kondakov, S.V. Increasing the Mobility of a High-Speed Tracked Vehicle by Automating the Curved Motion Control System. Kondakov, S.V. Ministry of Education and Science of the Russian Federation; Federal Education Agency; South Ural State University, Department of Specialized and Road-Construction Machinery. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2009. 110 p.
- 3 Naumov, V.N. Algorithm for Preventing Uncontrolled Motion of Tracked Robots. Rubtsov // SFedU News. Technical Sciences. – 2017. – No. 1(186). – P. 29-42.
- 4 Stadukhin, A. A. Method for Determining the Boundaries of Controlled Motion of a Tracked Vehicle / A. A. Stadukhin, V. B. Kholodenko, N. A. Mokretsov // Proceedings of R. E. Alekseev NSTU. – 2022. – No. 2. – P. 115-126.
- 5 Study of the Dynamics of Controlled Motion of High-Speed Tracked Vehicles / V. B. Derzhansky, I. A. Zhebelev, I. A. Taratorkin [et al.] // Bulletin of the N. E. Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering. – 2008. – No. 3(72). – P. 86-99.
- 6 Chernyshev N. V. Integrated control system for the rotation of an 8x8 combat wheeled vehicle: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.05.03 /; [Place of protection: Moscow state technical university named after N.E. Bauman]. - Moscow, 2009. - 118 p.: ill.
- 7 Fedorenko, A. V. Tests to determine the controllability parameters of a light wheeled snow and swamp-going vehicle with side turning / A. V. Fedorenko, K. Ya. Leliovsky // Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev. - 2023. - No. 2 (141). - P. 89-96.
- 8 Aleksandrov, V. V. Lectures on the Mechanics of Controlled Systems: a textbook for students of higher educational institutions studying in the specialty "010701 Fundamental Mathematics and Mechanics" / V. V. Aleksandrov, S. S. Lemak, N. A. Parusnikov - M.: Moscow: Lomonosov Moscow State University. - 2020. - 165 p.

- 9 Beketov, S. A. Theory of Controlled Motion of Tracked Vehicles / S. A. Beketov. - M.: Bauman Moscow State Technical University Publishing House. - 2017. - 125 p.
- 10 Katanaev, N. T. Systematic Assessments of Wheeled Vehicle Controllability / N. T. Katanaev // Bulletin of Moscow State Technical University "MAMI". – 2012. – Vol. 1, No. 1(13). – P. 34-41.
- 11 Katanaev, N. T. Systematic and Non-Systematic Assessments of Vehicle Controllability / N. T. Katanaev, A. V. Lepeshkin // Bulletin of Moscow State Technical University "MAMI". – 2015. – Vol. 1, No. 1(23). – P. 112-116.
- 12 Analytical Comparison of Vehicle Controllability Indicators When Performing the “Rearrangement” and “Movement along a Truncated Trajectory” Maneuvers / Yu. I. Molev, M. G. Cherevastov, S. V. Lazarevich, A. V. Erofeeva // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2025. – Vol. 1, No. 1(51). – P. 114-124.
- 13 Development of a multi-axle all-terrain vehicle of an especially light class with a hydrostatic transmission / V. S. Makarov, A. M. Belyaev, D. M. Belyaev [et al.] // Unmanned vehicles: problems and prospects: collection of materials of the 94th international scientific and technical conference of the Association of Automotive Engineers, Nizhny Novgorod: R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 2016. - P. 162-167.
- 14 Goncharov, K. O. Experimental studies of a multi-axle wheeled vehicle / K. O. Goncharov, V. S. Makarov, V. V. Belyakov // Science and education: scientific publication of Bauman Moscow State Technical University. – 2011. – № 2. – P. 10.
- 15 Kurkin, A. Autonomous Robotic System for Coastal Monitoring / A. Kurkin, E. Pelinovsky, D. Tyugin, A. Giniyatullin, O. Kurkina, V. Belyakov, V. Makarov, D. Zeziulin, K. Kuznetsov // Twelfth international conference on the Mediterranean coastal environment (MEDCOAST 15). – 2015. – Vols 1 and 2. –P. 933-943.
- 16 Tararykin, A. M. Promising appearance and main characteristics of a first-aid fire truck on the basic chassis of an amphibious all-terrain vehicle / A. M. Tararykin, A. V. Kalach // Technosphere safety. – 2022. – № 1(34). – P. 59-65.

© Куikliна И. Г., Левшунов Л. С., Молев М. Ю., Федоренко А. В., 2026