

УДК 629.3.014

DOI: 10.46960/1816-210X\_2020\_3\_103

С.Е. Манянин<sup>1</sup>, М.Г. Черевастов<sup>2</sup>**К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЯЕМОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА,  
СНАБЖЕННОГО ШИНАМИ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина<sup>2</sup>

С применением расчетной модели транспортного средства, снабженного шинами сверхнизкого давления, в условиях движения по дорогам общего пользования смоделированы два различных вида испытаний: «рывок руля» и «переставка». Получены частотные характеристики вездехода в наиболее вероятном диапазоне управляющих частот. Анализ полученных характеристик позволил сделать вывод о неоднозначном влиянии увеличения боковой жесткости шин, при различных частотах управления, на боковые реакции дороги, приложенные к колесам передней и задней осей. Определена максимальная скорость движения колесной машины, обеспечивающая необходимую безопасность дорожного движения, установлено влияние боковой жесткости шин на ее величину.

*Ключевые слова:* безопасность дорожного движения, внесение изменений в конструкцию транспортного средства, шины сверхнизкого давления, управляемость автомобиля.

В настоящее время сформировался значительный потребительский спрос на колесные транспортные средства, обладающие повышенной проходимостью. Для обеспечения движения по слабонесущим опорным поверхностям необходимо, чтобы шина обладала высокой эластичностью, в том числе, и в боковом направлении. Однако данное обстоятельство негативно влияет на управляемость и устойчивость транспортного средства по причине меньшей сопротивляемости колес боковому уводу, особенно в условиях передвижения на высоких скоростях по твердым слабдеформируемым опорным поверхностям. В качестве движителя для таких вездеходов широко применяются колеса, снабженные шинами сверхнизкого давления (рис. 1). Тем не менее, эксплуатация колесных вездеходов происходит не только в сложно проходимых местах; также существует значительная потребность в передвижении по дорогам общего пользования, которые сами по себе представляют твердую опорную поверхность. Соответственно, большой интерес представляет исследование поведения (реакции) колесной вездеходной машины при различных управляющих воздействиях водителя, осуществляющего движение по шоссейной дороге.

**Рис. 1. Внешний вид шины сверхнизкого давления**

На улицах и шоссейных дорогах можно часто видеть автомобили (легковые, грузопассажирские), движущиеся в общем потоке на колесах, снабженных шинами низкого давления. Они установлены своими владельцами самостоятельно, только исходя из необходимости передвижения вне дорог с твердым покрытием. Само по себе применение таких шин зачастую не предусмотрено заводами-изготовителями и, на наш взгляд, является не чем иным, как внесением изменения в конструкцию транспортного средства. При этом необходимы изучение их влияния на безопасность дорожного движения и согласование с ГИБДД МВД РФ.

Объектом исследования в настоящей статье является типичный колесный вездеход, где в качестве шин заводом-изготовителем выбраны шины сверхнизкого давления; нами будут рассмотрены особенности его передвижения по дорогам общего пользования. Прежде чем перейти к моделированию испытаний, справочно приведем основные технические параметры вездехода, необходимые для формирования его расчетной модели. За основу нами были приняты характеристики снегоболотохода «Кержак», изображенного на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид снегоболотохода

В технической и научной литературе отсутствуют данные о величине коэффициента сопротивления боковому уводу шин сверхнизкого давления, приводится лишь метод его получения при стендовых испытаниях. Таким образом, в целях устранения неопределенности, нами была применена хорошо зарекомендовавшая себя эмпирическая формула [6,11] (1):

$$K_y = 780 \cdot B_{ш} \cdot (D_{ш} + 2B_{ш}) \cdot (P_{ш} + 98), \quad (1)$$

где  $K_y$  – коэффициент сопротивления боковому уводу колеса  $\left[ \frac{кН}{рад} \right]$ ;

$B_{ш}$  и  $D_{ш}$  – ширина и посадочный диаметр шины [м];

$P_{ш}$  – внутреннее давление воздуха в шине [кПа].

Рабочий диапазон изменения внутреннего давления воздуха в шинах, применяемых на выбранном вездеходе, 1300х700-533 составляет от 15 до 80 кПа. Формула (1) с достаточной точностью может применяться как для радиальных, так и для диагональных шин, с тем лишь исключением, что во втором случае значение коэффициента может снижаться в два раза. Как правило, в рассматриваемом случае применяются диагональные шины.

Для достижения цели нашего исследования в качестве расчетной модели колесной машины применялась плоская одномассовая модель. Планируемые испытания моделировались при полной массе вездехода в 4240 кг. При этом осевая нагрузка на переднюю и заднюю оси соответственно составляла 38 % и 62 % от полной массы. Диапазон изменения коэффициента сопротивления боковому уводу шин сверхнизкого давления с учетом рабочего давления воздуха может составлять от 60 до  $190 \frac{\kappa H}{рад}$ . Колесная база транспортного средства

имеет значение 3,45 м. Таким образом, исследуемая колесная машина повышенной проходимости обладает избыточной поворачиваемостью [2, 3, 7, 9]. Особенности передвижения колесных машин повышенной проходимости, снабженных шинами сверхнизкого давления, по дорогам с твердой поверхностью и обладающих недостаточной поворачиваемостью, ранее уже рассматривались [13], изучим далее возможные особые отличия для нашего случая, где поворачиваемость вездехода избыточная. При моделировании испытаний нами учитывались условия и критерии оценки, указанные в ГОСТ Р 52302-2004 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний». В частности, скорость движения вездехода при испытаниях «рывок руля» выбиралась на 10 км/час меньше предполагаемой максимально допустимой.

Перейдем непосредственно к результатам моделирования. Вначале рассмотрим испытание «рывок руля». При расчетах, используя допущение о мгновенном изменении положения управляемых колес, была определена максимально допустимая скорость движения «Кержака» при прохождении испытаний. Критериями оценки для ее определения стали приведенный угол поворота управляемых колес и время 90 %-й реакции. Так как наш вездеход обладает избыточной поворачиваемостью, мы посчитали целесообразным привести величину критической скорости движения по условиям бокового увода. Расчет данной критической скорости производится по известной формуле, широко применяемой в теории автомобиля [3, 8, 12, 14, 15]. Исходя из вида поворачиваемости, можно также говорить и об отсутствии забросов угловой скорости, по причине аperiodичности переходного процесса [10].

В приведенной ниже таблице указываются предельно допустимые углы поворота управляемых колес, пересчитанные через среднее передаточное число рулевого управления по отношению к углу поворота рулевого колеса, при движении с заданным установившимся боковым ускорением. Справа через косую черту приводятся значения для категории «N<sub>2</sub>», с левой – для «M<sub>2</sub>».

Таблица 1.

## Значения допустимых углов поворота управляемых колес

$a_y, \left[ \frac{м}{с^2} \right]$	$\theta_{мин}, [рад]$	$\theta_{макс}, [рад]$
1	0,009 / 0,01	0,024 / 0,025
2	0,018 / 0,023	0,048 / 0,051
4	0,034	0,094

По полученным данным можно сделать следующие выводы (табл. 2). Увеличение боковой жесткости колес, во-первых, приводит к повышению величины критической скорости автомобиля по условию бокового увода и уменьшению времени 90 %-й реакции автомобиля, что в конечном итоге благоприятно сказывается на устойчивости и управляемости вездехода

как транспортного средства. Изменение значения коэффициента сопротивления колес боковому уводу с 60 до 120 кН на радиан повышает критическую скорость с 73 до 104 км/час, при этом время реакции достаточно велико, что характерно для случая с избыточной поворачиваемостью, и в основном превышает величину 0,3 с, которая соответствует предельно допустимой для категории «М<sub>2</sub>», но в целом не превышает 2 с, что соответствует пределу для «N<sub>2</sub>».

Во-вторых, повышение жесткости колес приводит к увеличению необходимого потребного угла поворота управляемых колес при других равных условиях проведения маневра, что ограничивает предельную скорость движения транспортного средства. Вместе с тем, необходимо отметить, что увеличение вдвое жесткости колес приводит к увеличению допустимой скорости движения вездехода, если рассматривать его как грузовой автомобиль, всего лишь в 1,08 раза (с 63 до 68 км/час). Если же вездеход «Кержак» является автомобилем категории «М<sub>2</sub>», для обеспечения его безопасного движения по дорогам общего пользования необходимо повысить боковую жесткость колес до 120 кН на радиан, при этом максимально допустимая скорость его движения составит 50 км/час. Что касается сцепления колес с твердой опорной поверхностью, можно с уверенностью предполагать, что при значениях  $\varphi \geq 0,4$  обеспечивается необходимая устойчивость движения против заноса.

Таблица 2.

## Результаты моделирования испытания «Рывок руля»

$K_y, \left[ \frac{\text{кН}}{\text{рад}} \right]$	$V_{исп}, \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$	$V_{кр}, \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$	$a_y, \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]$	$\theta_{исп}, [\text{рад}]$	$t_{90\%}, [\text{с}]$	$V_{дон}, \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$
60	11,111	20,41	1	0,01967	0,8007	17,5
			2	0,03934		
			4	0,07867		
	13,889		1	0,01	1,5570	
			2	0,01920		
			4	0,03841		
	16,667		1	0,00414	3,4680	
			2	0,00827		
			4	0,01655		
90	11,111	25	1	0,02243	0,4052	18,06
			2	0,04486		
			4	0,08972		
	13,889		1	0,01236	0,6899	
			2	0,02473		
			4	0,04945		
	16,667		1	0,00690	1,1853	
			2	0,01380		
			4	0,02759		
120	11,111	28,86	1	0,02380	0,2631	18,89
			2	0,04761		
			4	0,093		
	13,889		1	0,01374	0,4187	
			2	0,02749		
			4	0,05497		
	16,667		1	0,00828	0,6631	
			2	0,01656		
			4	0,03311		

В целом, проведенное моделирование испытания вездехода «рывок руля» достаточно хорошо описывает его поведение в установившемся (стационарном) режиме движения с постоянным радиусом кривизны траектории после протекания переходного процесса. Также оно характеризует и быстроту установления нового режима движения, что имеет несомненное значение для оценки устойчивости и управляемости. Вместе с тем, при движении по дорогам общего пользования водителю постоянно приходится маневрировать, в том числе, менять полосу движения. Данный процесс сам по себе динамичен, и от того, как вездеход, являясь объектом управления, будет реагировать на управляющее воздействие, напрямую зависит возможность его практического использования на дорогах с твердой поверхностью. Таким образом, смена полосы движения как маневр при управлении колесной машиной существенно характеризует динамические качества вездехода.

Для более глубокого изучения этих качеств нами было смоделировано испытание «переставка», которое позволит определить частотные характеристики транспортного средства повышенной проходимости, а также возможность выполнения маневра. Здесь в качестве управляющего воздействия рассматривается один период гармонической (синусоидальной) функции с нулевой начальной фазой [4,5] и последующим удержанием управляющих колес в нейтральном положении. При моделировании испытания нами учитывались наиболее вероятные частоты управления от 0,1 до 4,5 Гц [1]. Получим частотные характеристики колесной машины. Применим классический подход теории автоматического регулирования и управления. Передаточная функция вездехода как объекта управления нам уже хорошо известна [9, 10], изображение входного сигнала управления – табличная функция, следовательно, отыскание частотных характеристик не представляет собой большой сложности. На рис. 3 представлена амплитудно-частотная характеристика «Кержака» для скорости движения 50 км/час при различных величинах коэффициента сопротивления боковому уводу шин. Как видно из графика, характеристика носит монотонно убывающий характер при увеличении угловой частоты управления транспортным средством. Меньшему значению боковой жесткости соответствует более резкое уменьшение величины амплитудно-частотной характеристики или, по-другому, меньшая полоса пропускания. Также необходимо отметить, что сравнивая характеристики, можно выделить следующее. На частотах от нуля до некоторого значения характеристика с меньшей боковой жесткостью расположена выше характеристики с большей жесткостью, при дальнейшем увеличении частоты управления картина меняется на противоположную.

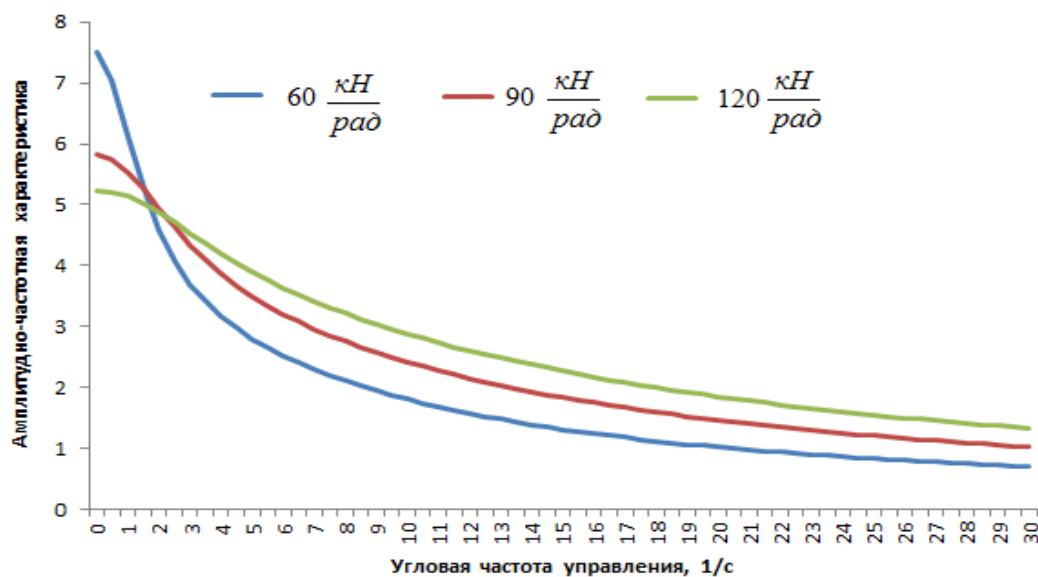


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика вездехода

Что касается фазочастотной характеристики, с увеличением частоты управления монотонно возрастает запаздывание (фазовый сдвиг) угловой скорости поворота транспортного средства от входного управляющего воздействия, и это запаздывание тем больше, чем меньше боковая жесткость шин. По условиям испытания необходимо определить максимальную скорость движения вездехода, при которой он не выйдет за пределы отведенного коридора при маневрировании, при этом движение должно происходить без заноса или отрыва колес от опорной поверхности.

На рис. 4 и 5 в качестве примера приведены смоделированная траектория движения центра масс вездехода на скорости 50 км/час с минимально допустимой боковой жесткостью колес и соответствующее во времени изменение боковых реакций дороги на осях.

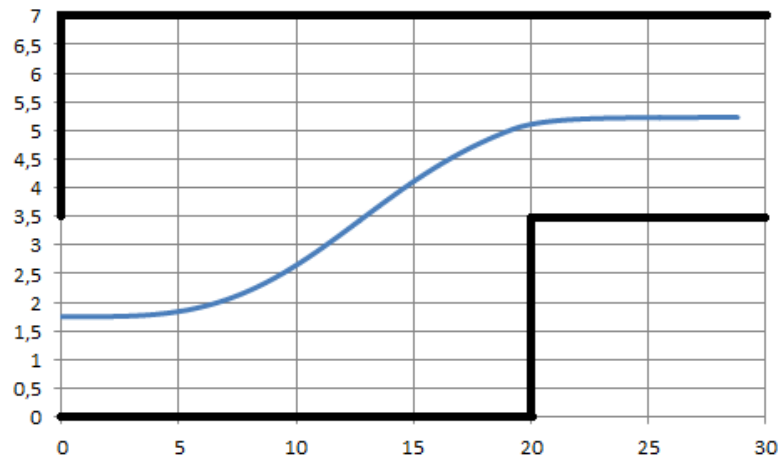


Рис. 4. Траектория движения вездехода

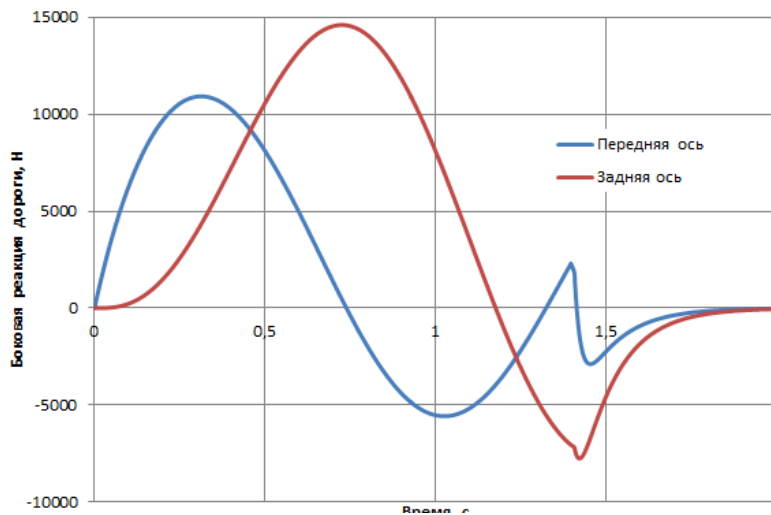


Рис. 5. Изменения боковых реакций

Данному движению соответствует частота управления равная 0,7 Гц и амплитуда угла поворота управляемых колес равная 0,15 рад. При этом необходимый коэффициент сцепления колес с дорогой должен быть обеспечен на уровне не менее 0,6. При дальнейшем увеличении скорости движения для удержания вездехода в установленном коридоре необходимо увеличивать частоту управления и (или) угол поворота управляемых колес. Это в конечном итоге приведет к увеличению боковых реакций, а, следовательно, к заносу или опрокидыванию вездехода. Так, для обеспечения устойчивого маневрирования «Кержака» со скоростью 60 км/ час потребуется обеспечить уровень коэффициента сцепления более 0,85.

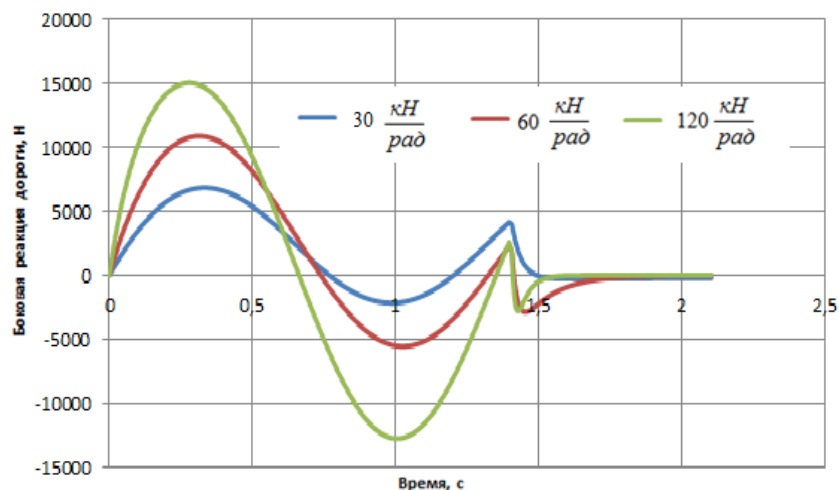


Рис. 6. Изменения боковых реакций дороги на передней оси

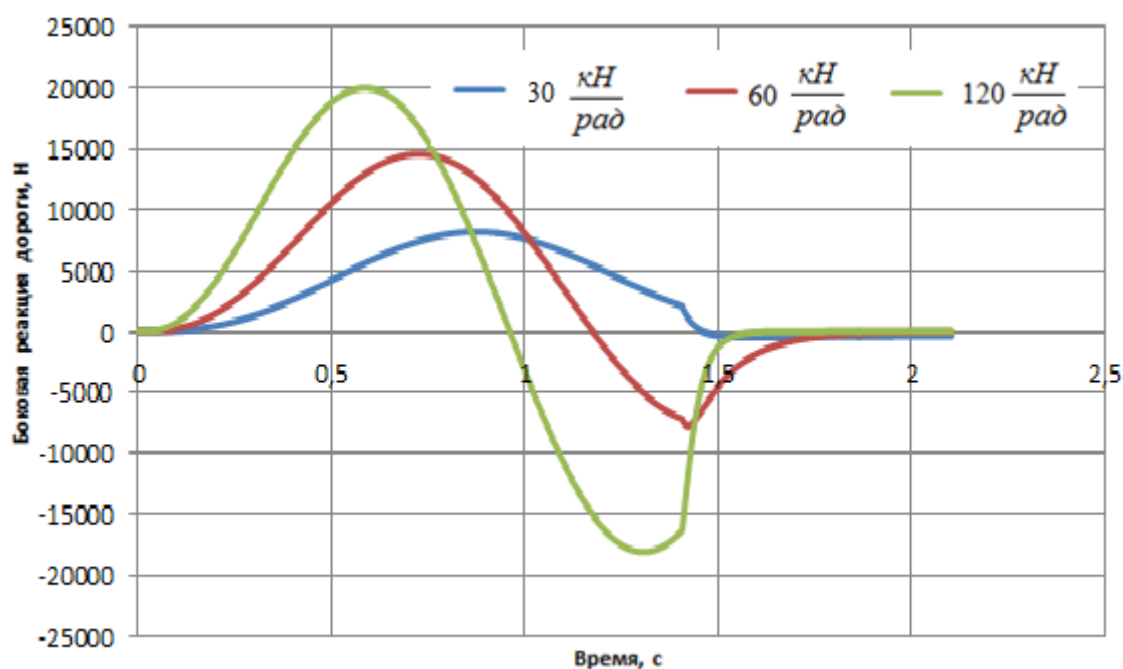


Рис. 7. Изменения боковых реакций дороги на задней оси

На рис. 6 и 7 приведены графики изменений боковых реакций дороги, приложенных к осям вездехода, при прохождении со скоростью 50 км/час испытания «переставка» с различной боковой жесткостью колес. При увеличении боковой жесткости, во-первых, увеличивается амплитуда реакций, во-вторых, происходит уменьшение периода колебаний. Также следует отметить, что установленная зависимость справедлива только при частотах управления больших частоты, при которой происходит пересечение соответствующих амплитудно-частотных характеристик (рис. 3). И в целом такая картина является особенностью избыточной поворачиваемости нашего транспортного средства.

Обобщая полученные результаты теоретического исследования, можно говорить о следующем. Важную роль в реакциях на управляющее воздействие вездехода играет частота управления. На нулевой частоте управления (маневр «рывок руля») и частотах меньше некоторого значения (для нашего случая 0,3 Гц), определяемого пересечением амплитудно-частотных характеристик, повышение боковой жесткости колес дает общее улучшение

управляемости. Происходит уменьшение длительности переходного процесса и запаздывания угловой скорости поворота колесной машины от управляющего воздействия. Не наблюдается увеличение боковых реакций при равных условиях движения. При управлении вездеходом на частотах больших данного характерного значения увеличение боковой жесткости колес, с одной стороны, также благоприятно влияет на управляемость колесной машины. С другой стороны, оно приводит к увеличению амплитуды боковых реакций, что сильно ограничивает возможность движения без заноса или опрокидывания. При этом, чем больше угловая частота управления, тем больше проявляется перераспределение боковых реакций в сторону передней оси, что приводит к ее сносу и последующей потере управляемости. Таким образом, можно говорить о приемлемом диапазоне изменения боковой жесткости для безопасного движения вездехода по твердой опорной поверхности с установленной скоростью.

Что касается максимальной скорости движения «Кержака», то с учетом обоих испытаний для опорных поверхностей с высоким коэффициентом сцепления приемлемая скорость движения, обеспечивающая необходимую безопасность, составляет 50 км/час. При учете понижения коэффициента сцепления приемлемая скорость понижается до 40 км/час. Данное скоростное ограничение справедливо при боковой жесткости шин в интервале от 60 до 90 кН/рад. При дальнейшем увеличении жесткости скорость необходимо будет уменьшать. Обращая внимание на интервал, можно также сказать о возможности использования вездехода по дорогам общего пользования как грузового автомобиля категории «N<sub>2</sub>», для перевозки пассажиров не обеспечивается необходимая безопасность движения.

Полученные результаты исследования говорят о значительном влиянии шин сверхнизкого давления на управляемость нашего вездехода. Применительно к самостоятельной установке владельцами зарегистрированных в органах ГИБДД транспортных средств шин низкого давления взамен штатных, можно предположить, что их замена также может приводить к нежелательному изменению управляемости, которое, в свою очередь, негативно влияет на безопасность дорожного движения.

### Библиографический список

1. **Бахмутов, С.В.** Научные основы параметрической оптимизации автомобиля по критериям управляемости и устойчивости: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03 / С.В. Бахмутов. – М., 2001. – 350 с.
2. **Брянский, Ю.А.** Управляемость большегрузных автомобилей / Ю.А. Брянский. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
3. **Вонг, Дж.** Теория наземных транспортных средств / Дж. Вонг. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.
4. **Воронов, А.А.** Основы теории автоматического регулирования и управления: уч. пос. для вузов / А.А. Воронов, В.К. Титов, Б.Н. Новогранов. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1977. – 519 с.
5. **Воронов, А.А.** Устойчивость, управляемость, наблюдаемость / А.А. Воронов. – М.: Изд-во «Наука», 1979. – 336 с.
6. **Иларионов, В.А.** Эксплуатационные свойства автомобиля (Теоретический анализ) / В.А. Иларионов. – М.: Машиностроение, 1966. – 279 с.
7. **Куляшов, А.П.** Безопасность дорожного движения. Ч. III. Автомобиль и безопасность дорожного движения: учеб. пособие. – 2-е изд. / А.П. Куляшов, А.Г. Китов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин – Н. Новгород: ВГИПА, 2005. – 369 с.
8. **Литвинов, А.С.** Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
9. **Милликен, У.Ф.** Применение общей теории устойчивости и управляемости автомобилей к их конструированию / У.Ф. Милликен, Д.У. Уитком // Управляемость и устойчивость автомобиля: сборник статей / пер. с англ. В.И. Котовского / под ред. А.С. Литвинова. – М.: МАШГИЗ, 1963. – С.145-204.
10. **Молев, Ю.И.** Теоретический расчет переходной реакции движения автомобиля при заданной функции возмущения / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Организация и безопасность дорожного



движения: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (15 марта 2018 г.): в 2-х т. Т.2 / отв. ред. Д. А. Захаров. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С. 89-95.

11. **Пирковский, Ю.В.** Теория движения полноприводного автомобиля (прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси) / Ю.В. Пирковский, С.Б. Шухман. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001; Элит-2000, 2001. – 230 с.
12. **Певзнер, Я.М.** Теория устойчивости автомобиля / Я.М. Певзнер. – М.: МАШГИЗ, 1947. – 156 с.
13. **Селифонов, В.В.** Исследование статических характеристик управляемости автомобиля на шинах сверхнизкого давления / В.В. Селифонов, В.И. Котляренко, Е.Е. Баулина // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – №3 (56). – С. 13-17.
14. **Фалькевич, Б.С.** Теория автомобиля / Б.С. Фалькевич. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 239 с.
15. **Чудаков, Е.А.** Теория автомобиля / Е.А. Чудаков. – М.: МАШГИЗ, 1950. – 343 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 14.07.2020*

**S.E. Manyanin<sup>1</sup>, M.G. Cherevastov<sup>2</sup>**

### **ON THE ISSUE OF CONTROL OF A VEHICLE EQUIPPED WITH EXTRA LOW PRESSURE TIRES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod State Pedagogical University n.a. Kozma Minin<sup>2</sup>

**Purpose:** In this work, the main goal of the study was to find the maximum speed of a cross-country vehicle equipped with ultra-low pressure tires and compare it with the one set by the manufacturer of the all-terrain vehicle. Evaluate the potential ability of a high-traffic vehicle to travel on public roads.

**Design/methodology/approach:** The work uses the classical methods of the theory of automatic control and regulation to find the frequency characteristics of the control system and the normal response of the all-terrain vehicle. Also, the main methods used in the theory of the car are applied.

**Findings:** In this paper, using the computational model of a vehicle equipped with ultra-low pressure tires, two different types of tests, such as "steering jerk" and "shifting", are simulated in driving conditions on public roads. The frequency characteristics of the all-terrain vehicle are obtained in the most probable range of control frequencies. The analysis of the obtained characteristics made it possible to draw a conclusion about the ambiguous influence of an increase in the lateral stiffness of tires, at different control frequencies, on the lateral reactions of the road applied to the wheels of the front and rear axles. The maximum speed of a wheeled vehicle, which ensures the necessary road safety, is determined, and the influence of the lateral stiffness of tires on its value is determined.

**Research limitations / consequences:** In carrying out this study, a flat single-mass design model of an off-road vehicle was used. One of the main assumptions was the linearity of the model, the smallness of the wheel slip angles and the constancy of the tire lateral slip resistance coefficient.

*Key words:* road safety, changes to the vehicle design, ultra- low pressure tires, vehicle handling.