

УДК 629.331

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_113

СИСТЕМА АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА СИЛОВЫХ ФАКТОРАХ В КОНТАКТЕ КОЛЕС С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

С.В. Шаповалов

ORCID: 0000-0003-3551-715X e-mail: ser150386@mail.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
Москва, Россия

В качестве решения проблемы эффективного распределения мощности между ведущими колесами при движении по неподготовленному грунту рассматривается система управления индивидуальным приводом колес, основанная на анализе силового взаимодействия движителя и опорной поверхности. В рамках анализа существующих систем было выявлено, что все они работают в условиях дефицита информации, поскольку построены на кинематических параметрах, которые лишь косвенно характеризуют силовое взаимодействие колес с опорным основанием. Подтверждена возможность создания системы активной безопасности на основе анализа силовых факторов взаимодействия колес с опорным основанием.

Эффективность применения силовых датчиков изучена на математической модели. Проведено исследование движения колесной машины на подъем с использованием дифференциальной трансмиссии с электронной блокировкой дифференциала на силовых и кинематических датчиках. Создание системы управления позволяет реализовать максимально возможные значения коэффициентов сцепления колес с опорной поверхностью, тем самым повысив проходимость и безопасность движения автомобиля. С помощью системы, основанной на силовом анализе, также возможен прогноз несущей способности грунта и предотвращение потери подвижности многоосных колесных машин.

Ключевые слова: система активной безопасности, кинематические параметры, анализ силовых факторов, электронная блокировка дифференциала.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шаповалов, С.В. Система активной безопасности на силовых факторах в контакте колес с опорной поверхностью // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 113-123.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_113

ACTIVE SAFETY SYSTEM BASED ON POWER FACTORS IN CONTACT OF WHEELS WITH THE SUPPORT SURFACE

S.V. Shapovalov

ORCID: 0000-0003-3551-715X e-mail: ser150386@mail.ru

Bauman Moscow state technical University
Moscow, Russia

Abstract. As a solution to the problem of effective power distribution between the driving wheels when driving on unprepared soil, the control system for individual wheel drive is considered, based on analysis of force interaction of propeller and support surface. As part of the analysis of existing systems, it was revealed that all of them operate in conditions of information shortage, since they are built on kinematic parameters that only indirectly characterize the force interaction of wheels with support base. The possibility of creating an active safety system based on the analysis of force factors of interaction of wheels with the support base is confirmed. Efficiency of use of power sensors is studied on a mathematical model. Study of a wheeled vehicle movement uphill using a differential transmission with electronic differential system on power and kinematic sensors, was carried out. Creation of a control system allows us to implement the maximum possible values of coefficients of adhesion of wheels with the support surface, thereby increasing the cross-country ability and road safety of the vehicle. By means of a system based on force analysis, it is also possible to predict a bearing capacity of soil and prevent the loss of mobility of multi-axle wheeled vehicles.

Key words: active safety system, kinematic parameters, power factor analysis, electronic differential system.

FOR CITATION: Shapovalov S.V. Active safety system based on power factors in contact of wheels with the support surface. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. P. 113-123. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_113

Введение

Основные эксплуатационные свойства (тягово-динамические качества, проходимость, экономичность) во многом зависят от эффективности распределения мощности между ведущими колесами. Блокированные или дифференциальные трансмиссии не позволяют принудительно изменять мощность, подводимую к одним колесам, независимо от других. Поэтому в некоторых транспортных средствах используется индивидуальный привод, который позволяет регулировать подводимый крутящий момент в соответствии с условиями движения независимо от других колес. Однако для правильной работы такой трансмиссии необходима эффективная система управления. Для повышения эксплуатационных свойств колесных машин (КМ) также используются системы активной безопасности и системы регулирования динамики движения, но все они основаны на измерении параметров опорного основания по кинематическим датчикам. Этого оказывается достаточно только для эффективной работы на высоких скоростях при перемещении по дорогам общего пользования [1-3]. Движение спецтехники по неподготовленному грунту сопряжено со значительной неопределенностью свойств опорного основания под каждым колесом.

Эффективным решением для улучшения тактико-технических характеристик военных колесных машин и гражданских шасси специального назначения может быть система активной безопасности, основанная на анализе силового взаимодействия движителя и опорной поверхности. Для оценки возможности создания такой системы необходимо проанализировать существующие решения в данной области, а также изучить способы непосредственного измерения силовых факторов, действующих на колесо.

Обзор существующих систем активной безопасности и повышения проходимости

В современных автомобилях принято строить системы активной безопасности (САБ) и системы регулирования динамики движения (СРДД) [3-10] по следующим принципам: 1 – регулирование по коэффициенту относительного скольжения контакта колеса; 2 – регулирование по максимальной реализации тангенциальной силы колеса; 3 – регулирование по производной от коэффициента сцепления по коэффициенту относительного скольжения контакта колеса (градиентный метод). При этом источниками первичной информации практически всех алгоритмов являются кинематические датчики. Так построены противобуксовочная система (ПБС, *ASR – Automatic Slip Regulation*), система блокировки дифференциала (ЭБД – электронная блокировка дифференциала), антиблокировочная система (АБС), система контроля курсовой устойчивости (*ESP – Electronic Stability Program*). Все они предназначены для поддержания оптимального соотношения между коэффициентом сцепления колеса с дорогой и коэффициентом относительного скольжения контакта колеса относительно опорной поверхности. АБС предназначена для реализации максимальной величины продольной реакции опорной поверхности, а также для возможности управления движением во время торможения. Данный эффект достигается регулированием тормозного усилия на колесах по определенному алгоритму. Элементы системы АБС стали основой для создания многих других систем, в том числе, для электронных блокировок дифференциалов.

График изменения коэффициента сцепления от скольжения для связанного грунта (сухой бетон) представлен на рис. 1а. На графике заметна область значительных величин коэффициента продольной реакции, что позволяет реализовывать максимально возможные для данного грунта продольную и поперечную реакции при регулировании скольжения и его удержании в этом диапазоне. Для несвязанного грунта такая зависимость выглядит иначе (рис. 1б). Она не имеет экстремума, а монотонно растет, что не позволяет создать подобную АБС систему, эффективно работающую на несвязанных грунтах: снеге и песке.

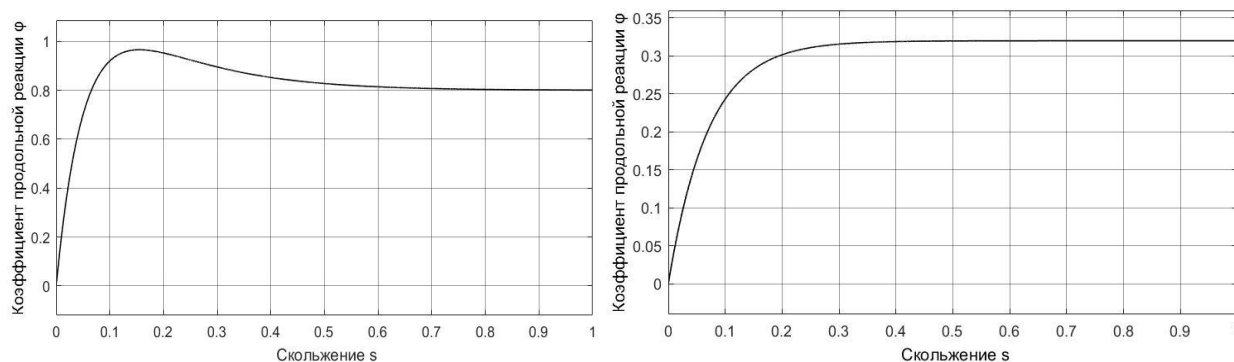


Рис. 1. Зависимость коэффициента продольной реакции
 а) от скольжения для связанного грунта; б) от скольжения для несвязанного грунта

Fig. 1. Dependence of longitudinal reaction coefficient
 a) on skidding for binder soil; b) on skidding for unbinder soil

Таким образом, АБС является необходимой для каждого автомобиля, передвигающегося по опорному основанию из связанного грунта, однако нуждается в отключении при торможении на снеге либо песке, также элементы системы могут быть использованы для более сложных дополнительных систем. Противобуксовочная система [3-5,8] предназначена для реализации максимально возможной силы тяги на опорном основании с небольшим коэффициентом продольной реакции. Принцип работы заключается в поддержании скольжения в заданном диапазоне, но, в отличие от АБС, в тяговом режиме. Зависимости коэффициента продольной реакции в тяговом и тормозном режимах практически не отличаются. Для несвязанных грунтов из анализа графика на рис. 2 имеет смысл не использовать ПБС, а подводить максимум мощности к ведущим колесам, что подтверждается на практике, но при интенсивном буксовании происходит фрезерование грунта, и КМ может потерять подвижность из-за недостатка геометрической проходимости. Наиболее сложные системы представляют собой единую структуру из АБС и ПБС. Если из алгоритма работы ПБС, использующей тормозные механизмы, исключить минимизацию скольжения колеса и минимизировать разность скоростей вращения колес, то образуется система с названием «Электронная блокировка дифференциала (ЭБД)». Примером является система, разработанная компанией «ФАГ Кюгельфишер» – «*Elctronichen Differentialbremse*» (EDS).

Система электронного контроля устойчивости (*Electronic Stability Program*) [3-5,11, 12] срабатывает в опасных ситуациях, когда возможна или уже произошла потеря курсовой устойчивости автомобиля. Система стабилизирует движение путем затормаживания отдельных колес. Она вступает в работу, когда на большой скорости при прохождении поворота передние колеса сносит с заданной траектории в направлении действия сил инерции, т.е., по радиусу большему, чем радиус поворота. *ESP*. В этом случае притормаживает заднее колесо, идущее по внутреннему радиусу поворота, придавая автомобилю большую поворачиваемость и восстанавливая траекторию движения и положение продольной оси автомобиля. Одновременно с притормаживанием колес *ESP* снижает обороты двигателя с помощью электронно управляемой заслонки. Если при прохождении поворота происходит занос задней части автомобиля, *ESP* активизирует тормоз переднего колеса, идущего по наружному радиусу поворота. Таким образом, появляется момент от реакций опорной поверхности, исключая боковой занос. Когда скользят все четыре колеса, *ESP* самостоятельно решает, тормозные механизмы каких колес должны вступить в работу.

Элементами, сообщающими информацию о характеристиках движения колесной машины, являются датчики скорости вращения колес, ЭБУ двигателя и коробки передач, датчик положения руля и датчик линейных и угловых ускорений, который чаще всего располо-

жен в одном корпусе с контроллером *ESP*. Исполнительные механизмы аналогичны ПБС, алгоритмы работы которой предусматривают использование тормозов.

Рассматривая все указанные системы, можно сделать вывод, что они фактически не нуждаются в собственных чувствительных и исполнительных элементах и представляют собой программные надстройки на систему *ESP* или даже АБС. Последние используют информацию о движении машины от блока управления двигателем, датчика положения руля, кинематических датчиков скоростей вращения колес и модуля измерения ускорений. По известным кинематическим параметрам вращения колес производится расчет скольжения и буксования, вычисляется коэффициент сцепления, который является косвенной характеристикой сил в контакте колес с опорной поверхностью. Погрешности измерения каждого из кинематических параметров, используемых системой, негативно отражаются на расчетной величине коэффициента сцепления, характеризующего силы в контакте колес с дорогой. Действительные же реакции в пятне контакта каждого колеса для блока управления данных систем остаются неизвестными, и системы работают в условиях дефицита информации. Эта проблема может быть решена, если найти способ измерения сил, действующих на колесо.

Анализ методов повышения проходимости КМ

В настоящее время обеспечение повышенной проходимости достигается применением блокируемых межосевых и межколесных дифференциалов, дифференциалов повышенного трения, а также электронных систем, задействующих тормозные механизмы для подтормаживания буксующего колеса (ЭДС). Блокированный привод позволяет в значительной степени реализовать условия сцепления ведущих колес с опорной поверхностью, однако он отрицательно влияет на курсовую устойчивость автомобиля, затрудняет поворот (криволинейное движение), увеличивает нагруженность трансмиссии. Подтормаживание буксующего колеса часто используется в колесных машинах с дифференциальным приводом. Однако до настоящего времени нет исследования и обоснования оптимальных режимов применения данного способа и его эффективности в сравнении с блокированием межколесного дифференциала [1].

Как показывает практика, обеспечение идеального распределения мощности по колесам полноприводной машины при всех эксплуатационных условиях, благодаря совершенствованию конструкции привода, невозможно. Полноприводные конструкции с избирательно изменяющимися динамическими качествами могут быть реализованы только с помощью электронно-управляемых элементов привода [1]. Тем не менее, в основе всех систем, регулирующих распределение мощности по колесам и динамику движения автомобиля в автоматическом режиме, лежат алгоритмы, которые используют данные, получаемые с кинематических датчиков. Поэтому максимальная эффективность распределения крутящего момента в соответствии с максимальными возможностями по сцеплению каждого колеса не достигается, пробуксовка колес при использовании таких систем неизбежна. Применение системы на основе анализа силовых факторов в пятне контакта колеса с опорной поверхностью позволит значительно повысить проходимость транспортного средства.

В настоящее время существуют образцы антиблокировочных систем, использующие значения тормозных моментов на колесах вместо кинематических параметров. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в рамках работ [1-3], подтверждают не только возможность практической реализации системы активной безопасности автотранспортных средств на основе силового анализа, но и их превосходство над существующими системами благодаря обеспечению максимальной реализации коэффициентов сцепления колес с опорной поверхностью. Продолжают разрабатываться системы по измерению сил и моментов, действующих на колесо автомобиля. Одной из таких систем является тензоступица [12], входящая в измерительный комплекс исследования управляемости и устойчивости автомобиля. Наиболее современной конструкцией в настоящее время является

динамометрическое колесо *RoadDyn* швейцарской фирмы *Kistler* [13], которое позволяет выполнять измерения всех сил и моментов на колесе. Аналогичная система, позволяющая измерять силы и моменты, действующие на колесо, была разработана в МГТУ им. Н.Э. Баумана [14]. В основе разрабатываемой конструкции лежит шестикомпонентный датчик сил и моментов, 3D модель которого представлена на рис. 4а. Фотография колеса с тензоступицей показана на рис. 4б. Крепежные скобы 2 служат для присоединения датчика к ободу. Фланец 4 крепится к ступице колеса и передает крутящий момент. Фланцы 3 и 5 защищают чувствительный элемент датчика 1 от разрушения.

Шестикомпонентный датчик сил и моментов представляет собой два концентрических фланца (внешний и внутренний), соединенных упругим элементом, выполненным в виде равномерно расположенных по окружности датчика упругих балок. При воздействии сил и моментов на внешний фланец упругие элементы датчика деформируются, при этом их деформация регистрируется закрепленными на них двенадцатью тензорезисторами. По электрическим аналоговым сигналам, снимаемым с них, вычисляются вектора сил нагрузки и моменты сил нагрузки.

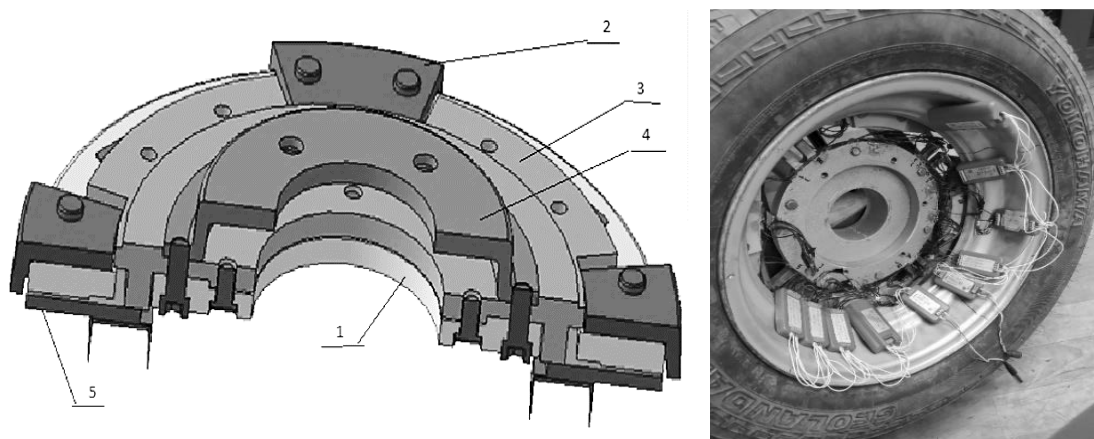


Рис. 2. а) 3D модель датчика в сборе:

*1 – датчик; 2 – скобы крепежные; 3 – внутренний предохранительный фланец;
4 – фланец, передающий крутящий момент; 5 – внешний предохранительный фланец;*
б) колесо с тензоступицей

Fig. 2. a) 3D model of sensor assembly:

*1 – sensor; 2 – fastening brackets; 3 – internal safety flange;
4 – torque transmission flange; 5 – external safety flange;*
b) wheel with strained hub

Исследование эффективности работы системы ЭБД на силовых датчиках

Для анализа эффективности применения систем, основанных на измерении силовых факторов, в среде *MATLAB Simulink* были построены математические и имитационные модели корпуса колесной машины, двигателя и управляющей системы в виде водителя, дифференциальной трансмиссии с ЭБД на кинематических и силовых датчиках (рис. 3-7).

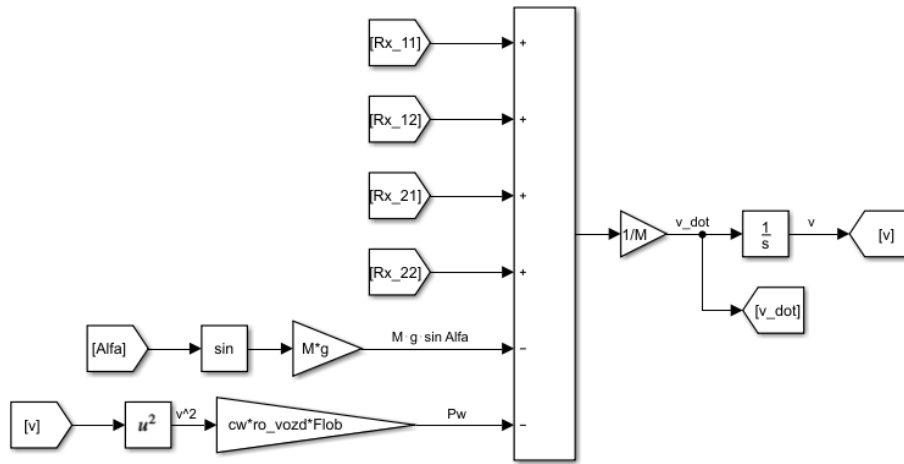


Рис 3. Блок-схема решения ДУ продольного перемещения КМ

Fig. 3. Block diagram of the solution of wheeled vehicle (WV) longitudinal movement

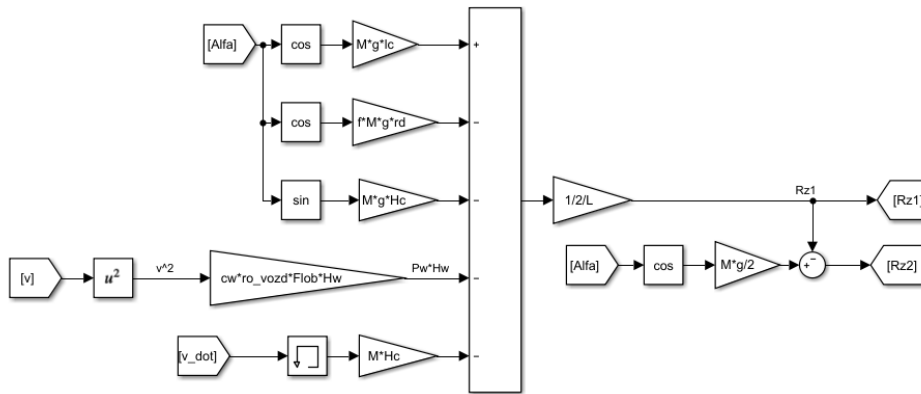


Рис. 4. Блок-схема решения уравнений перераспределения реакций по осям КМ

Fig. 4. Block diagram of reactions reallocation equations solution along WV axes

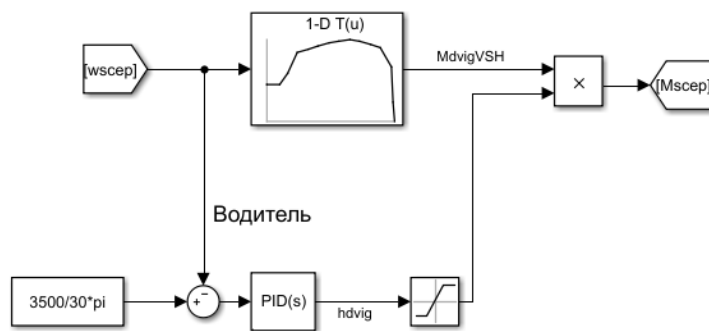


Рис. 5. Система ДВС и водителя

Fig. 5. ICE and driver system

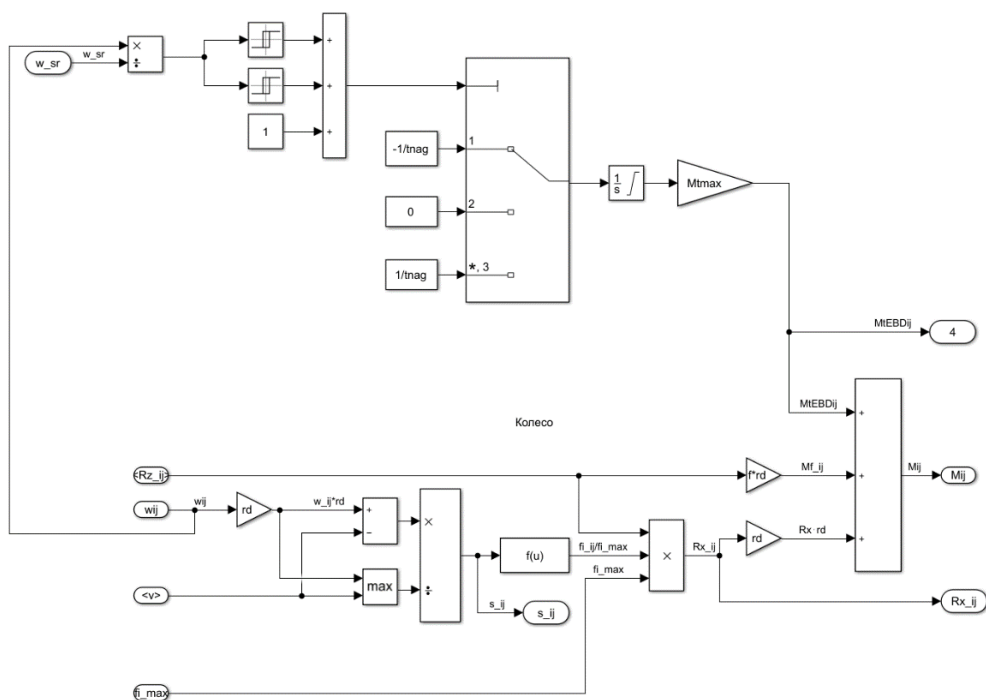


Рис. 6. Блок-схема для колеса и системы ЭБД

Fig. 6. Block diagram of wheel and EDS system

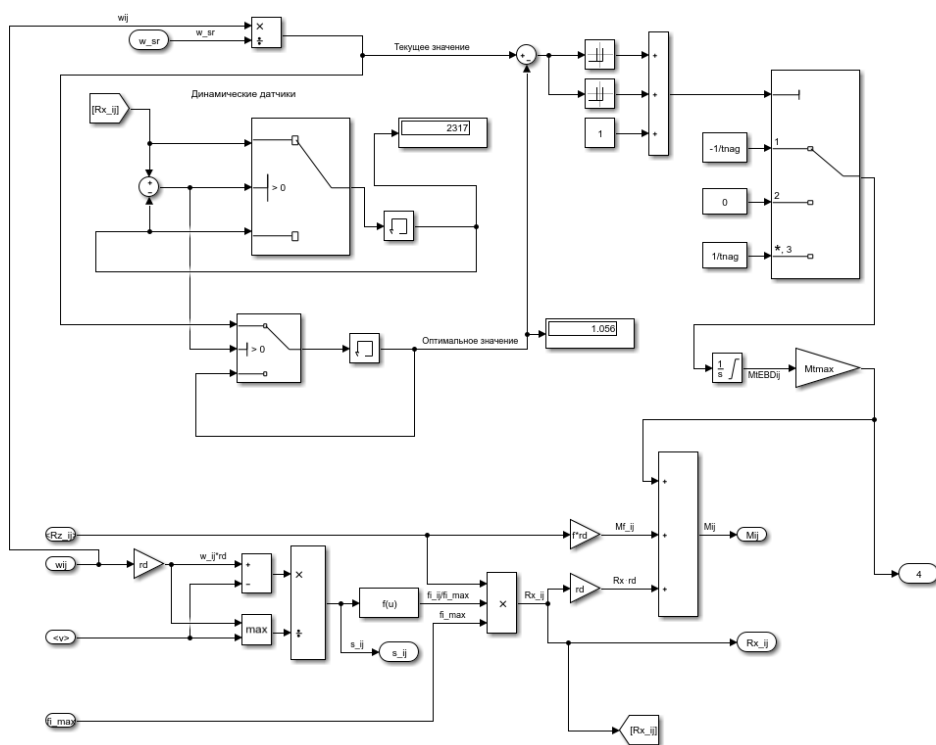
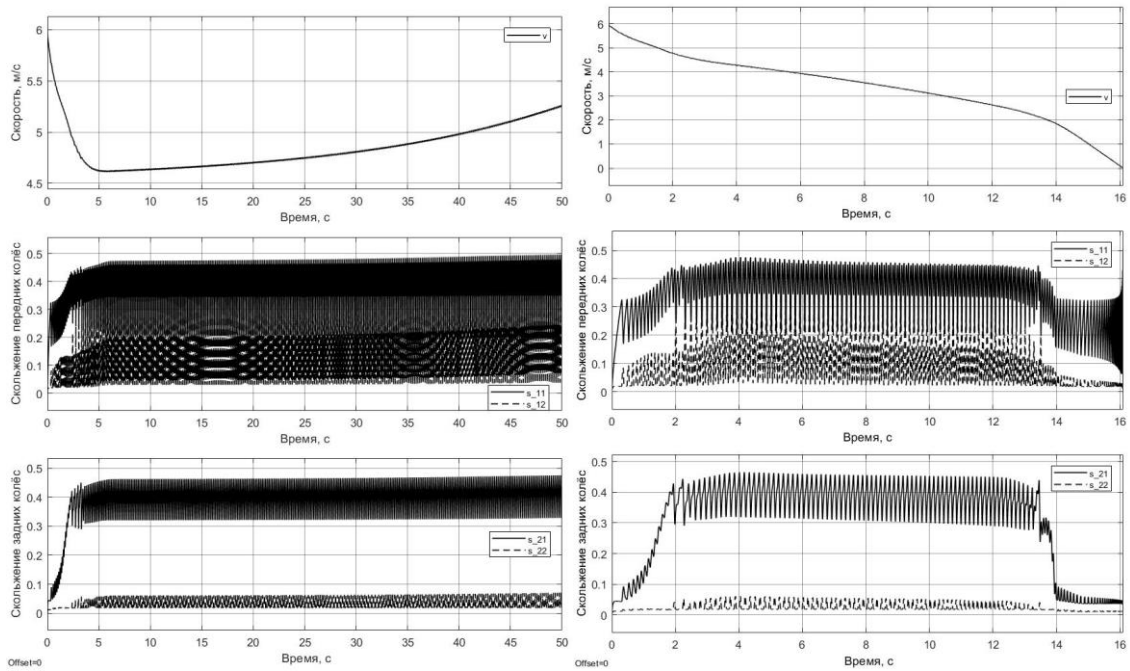


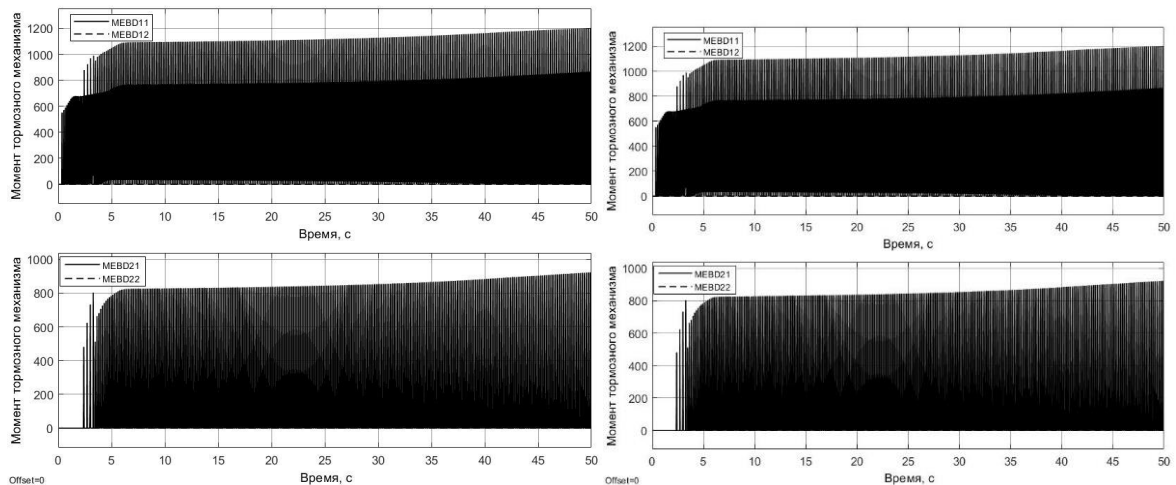
Рис. 7. Блок-схема для колеса и системы ЭБД с силовыми датчиками

Fig. 7. Block diagram of wheel and EDS system with power sensors



**Рис. 8. а) Параметры движения КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при подъеме на ОП с уклоном 12° ;
 б) Параметры движения КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при подъеме на ОП с уклоном $12,5^\circ$**

**Fig. 8. а) Driving parameters of WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of 12° ;
 б) Parameters of WV movement with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of $12,5^\circ$**



**Рис. 9. а) моменты тормозных механизмов для КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при движении на подъем с уклоном ОП 12° ;
 б) моменты тормозных механизмов для КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при движении на подъем с уклоном ОП $12,5^\circ$**

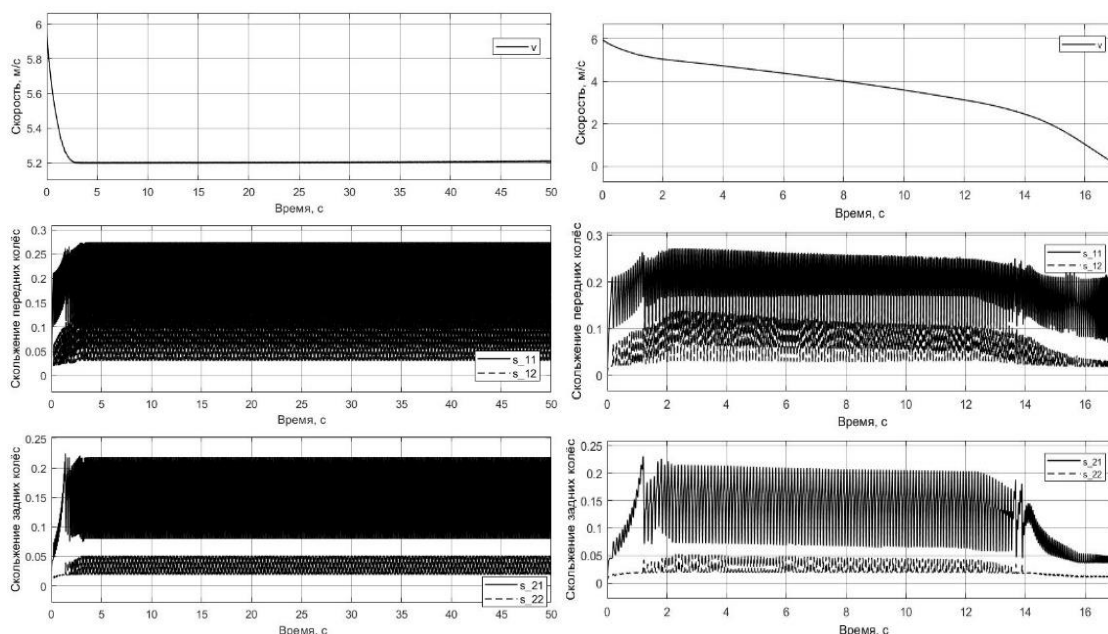
**Fig. 9. а) torques of brake mechanisms for WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of 12° ;
 б) torques of brake mechanisms for WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of $12,5^\circ$**

На основе полученной модели было проведено исследование движения КМ на подъеме при следующих параметрах опорного основания:

- по правому борту покрытие – укатанный снег, посыпанный песком с $\varphi_{max} = 0,38$;
- по левому борту покрытие – укатанный обледенелый снег с $\varphi_{max} = 0,15$;
- начало движения на подъеме со скорости, соответствующей 2500 об/мин по тахометру, с момента начала эксперимента водитель начинает регулировать подачу топлива так, чтобы частота вращения соответствовала 3500 об/мин.

Свойства проходимости в данном случае определялись максимальным углом подъема, который смог преодолеть автомобиль. При исследовании движения на подъем колесной машины с дифференциальной связью колес по опорной поверхности с уклоном 12° движение исследуемой модели КМ возможно (рис. 8а и 9а), а при увеличении угла ОП до $12,5^\circ$ происходит остановка (рис. 8б и 9б).

При исследовании движения на подъем колесной машины с дифференциальной связью колес и ЭБД на динамических датчиках по опорной поверхности с уклоном $12,1^\circ$ движение исследуемой модели КМ возможно, что подтверждают рис. 10а и 11а, а при увеличении угла ОП до $12,5^\circ$ происходит остановка, это можно увидеть на рис. 10б и 11б.



**Рис. 10. а) Параметры движения КМ с ЭБД с динамическими датчиками при подъеме на ОП с уклоном $12,1^\circ$;
б) Параметры движения КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при подъеме на ОП с уклоном $12,5^\circ$**

**Fig. 10. a) Parameters of movement of WV with EDS with dynamic sensors when going up the support surface with a slope of $12,1^\circ$;
b) Parameters of WV movement with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of $12,5^\circ$**

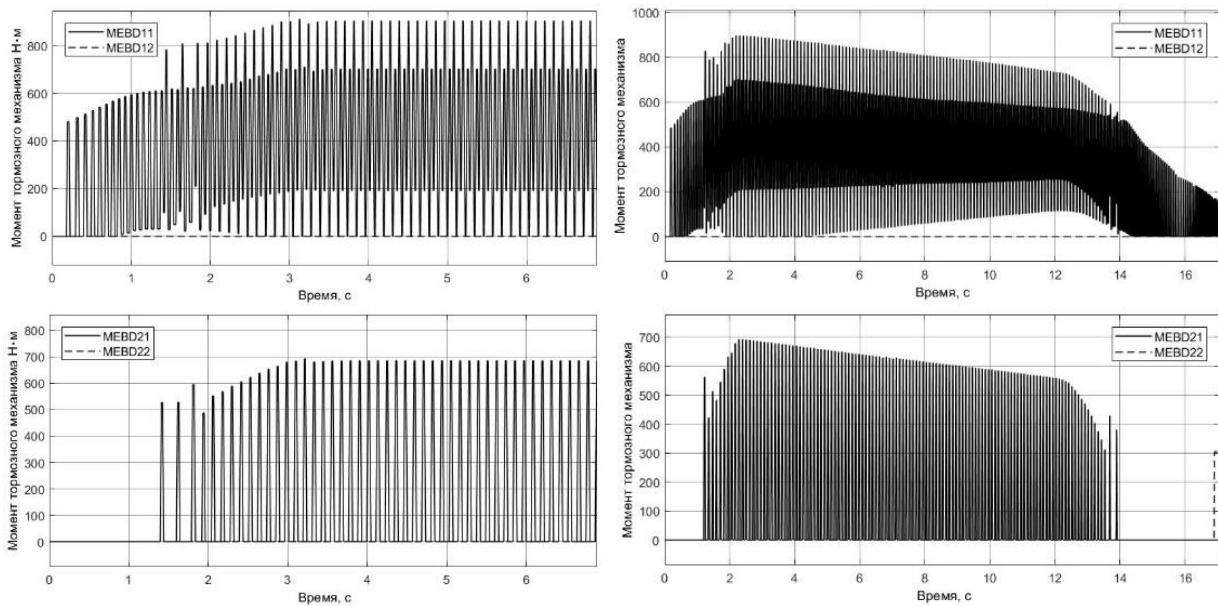


Рис. 11. а) Моменты тормозных механизмов для КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при движении на подъем с уклоном ОП 12,1 °;
б) Моменты тормозных механизмов для КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при движении на подъем с уклоном ОП 12,5 °

Fig. 11. а) Torques of brake mechanisms for WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of 12,1 °;
б) Torques of brake mechanisms for WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of 12,5 °

По графикам на рис. 10б ясно, что буксование поддерживается в области оптимального значения, что способствует увеличению продольной силы тяги; рис. 11б также подтверждает, что максимальный тормозной момент, развиваемый системой ЭБД может быть ограничен. По результатам исследования видно, что КМ с дифференциальной трансмиссией с ЭБД на кинематических датчиках смогла преодолеть подъем в 12 ° (21,3 %), а на силовых датчиках – 12,1 ° (21,4 %).

Таким образом, использование силовых датчиков в системе дало улучшение проходимости в рассматриваемом случае. Кроме того, общая тенденция использования динамических датчиков показывает положительное влияние на систему, так как система поддерживает буксование в оптимальном диапазоне, исследуя грунт. К тому же, при использовании силовых датчиков возможно применение заблокированной трансмиссии, что позволит получить большую проходимость КМ. Также для многоосных колесных машин можно создать систему прогнозирования проходимости на анализе свойств грунта на маршруте движения – по известным силам взаимодействия колес каждой оси с опорной поверхностью методом экстраполяции можно спрогнозировать свойства грунта на ближайшем участке пути. Такая система может позволить сократить количество ситуаций, связанных с потерей подвижности многоосной военной колесной техники, тем самым подняв маневренность и быстродействие вооруженных сил.

Выводы

1. В результате анализа современных систем активной безопасности было выявлено, что их недостатки заключаются в том, что источниками первичной информации являются кинематические параметры, которые лишь косвенно характеризуют силовое взаимодействие колес с опорной поверхностью. Они работают в условиях дефицита информации.

2. Проведенное исследование подтверждает, что система активной безопасности на основе силового анализа позволяет обеспечить максимальную реализацию коэффициентов сцепления колес с опорной поверхностью и тем самым повысить безопасность движения автомобиля, а также его проходимость.

3. На многоосных колесных машинах применение аппаратуры, оценивающей силовое взаимодействие колес с опорной поверхностью, позволяет прогнозировать несущую способность грунта и предотвращать потерю подвижности транспортных средств.

Библиографический список

1. Основы создания САБ АТС на силовом анализе: монография / И. С. Сазонов [и др.]; под общ. ред. д-ра тех. наук, проф. И. С. Сазонова. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2016. – 256 с.
2. **Ким, В.А.** Методология создания САБ АТС на основе анализа сил: автореферат / В.А. Ким. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2004. – 42 с.
3. **Ким, В.А.** Методология создания адаптивных САБ АТС на основе силового анализа: монография / В. А. Ким. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2003. – 346 с.
4. **Сазонов, И.С.** Динамическое регулирование режимов движения полноприводных колесных машин / И.С. Сазонов. – Минск: БГПА, 2001. – 185 с.
5. Bosch. Автомобильный справочник: пер. с англ. – М.: За рулем, 2000. – 896 с.
6. **Гируцкий, О.И.** Электронные системы управления агрегатами автомобиля / О.И. Гируцкий, Ю.К. Есеновский-Лашков, Д.Г. Поляк. – М.: Транспорт, 2000. – 213 с.
7. **Кадаков, М.** Renault Scenic RX4. Почти внедорожник / М. Кадаков // Авторевю. 2000. № 1. С. 4.
8. **Нефедьев, Я.Н.** Конструкции и характеристики электронных антиблокировочных систем зарубежных фирм / Я.Н. Нефедьев. – М.: НИИАВТОПРОМ, 1979. – 60 с.
9. **Нефедьев, Я.Н.** Теория, разработка и исследование унифицированной системы автоматического управления антиблокировочным торможением грузовых автотранспортных средств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / Я.Н. Нефедьев. – М., 1987. – 307 с.
10. Antiskid braking systems: пат. 1296494 Великобритания, МКИ 60 Т 8/00 / Daimler-Benz AG. ФРГ. – № 95742105; заявл. 01.03.70; опубл. 21.03.72. 1972. № 45, – 18 с.
11. **Диваков, А.** Lancer на тропе войны / А. Диваков, Л. Голованов // Авторевю. 2000. № 7. С. 33-35.
12. **Кушвид, Р.П.** Испытания автомобиля: учебник. – М.: МГИУ, 2011. – 351 с.
13. Instruction Manual. Basic Principles for Use in Over-the-Road-Testing. For RoaDyn® System 2000 Measuring Wheels. – Kistler Group, Switzerland, Winterthur.
14. Динамометрическое колесо, шестикомпонентный датчик: Отчет о НИР; рук. Захаров А. Ю.; исполн.: Анисимов М.М. – М., 2016. – 45 с.

*Дата поступления
в редакцию: 11.01.2021*