

УДК 629.113

**В.И. Филатов, Д.В. Зезюлин, Д.Ю. Тюгин, П.И. Пронин,  
Д.Н. Зарубин, А.А. Ерёмин, В.В. Беляков, А.А. Куркин**  
**РАЗРАБОТКА НАЗЕМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА,  
ОСНАЩЕННОГО СИСТЕМАМИ АДАПТИВНОЙ ПОДВИЖНОСТИ**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Целью исследования является создание и интегрирование систем адаптивной подвижности наземных мобильных роботов для повышения их подвижности на местности. Представлен обзор современного уровня развития в создании роботизированных платформ легкого класса. Рассмотрена конструкция разрабатываемого шасси наземного мобильного робота, обосновывается выбор конструкции подвески с возможностью регулировки жесткости упругого элемента, необходимой для обеспечения адаптивности подвески. Представлены концепция адаптивной системы поддрессорирования и проведено компьютерное моделирование системы управления адаптивной подвески, система контроля крутящего момента на каждом колесе шасси с электрической трансмиссией. Приведены результаты компьютерного моделирования модели с системой распределения мощности по колесам в зависимости от взаимодействия с опорной поверхностью.

**Ключевые слова:** адаптивная подвижность, наземные мобильные роботы, адаптивные системы управления.

### **Введение**

Применяемые в настоящее время наземные роботизированные платформы, оснащенных широким спектром датчиков, включая радарные системы, проводят панорамные измерения характеристик затопляемых зон, применяются при разработке, добыче полезных ископаемых, проведении спасательных и военных операций. При непосредственном участии человека в подобных работах, возрастает вероятность его гибели, а использование мобильных роботов позволяют снизить риск для жизни человек.

Главной проблемой при разработке беспилотных машин является поддержание ее подвижности. Подвижность включает в себя способность машины выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и состоянию самого наземного мобильного робота (НМР) [1].

Определение содержит две характеристики, относительно которых формируется выполнение транспортно-технологической операции: условия эксплуатации и состояние машины. Управление состоянием машины связано с поддержанием ее жизнеспособности, и главным в этом процессе является обеспечение надежности. Основной задачей для системы управления шасси наземного мобильного робота является формирование бортовыми средствами такой модели внешней среды, на которой возможно реализовать и оптимизировать варианты будущего движения и эффективно решать навигационные задачи. В работах [2-4] представлены варианты решения данной проблемы. Коллектив авторов также имеет опыт непосредственной реализации систем технического зрения для наземных подвижных объектов, результаты исследований суммированы в [5]. Для оптимизации будущего поведения НМР и достижения адаптивной подвижности в части исполнительных систем шасси требуются разработка и создание адаптивной к рельефу опорной поверхности подвески, средств рационального распределения моментов и скоростей по двигателям в зависимости от текущих характеристик грунтового основания под каждым двигателем.

Таким образом, целью данной работы является разработка шасси беспилотного наземного транспортного средства (БНТС) и адаптивных систем управления, обеспечивающих повышение подвижности.

Для разработки оптимальной конструкции и выбора правильных конструктивных параметров был проведен обзор аналогов среди БНТС, способных передвигаться по пересечен-

ной местности. Одним из лидеров по производству наземных роботов и созданию систем управления для беспилотных транспортных средств является компания Lockheed Martin (США). Результат их деятельности – роботизированная платформа Squad Mission Support System [6]. Данная платформа оснащена шестиколесным шасси с бортовым способом поворота. Для беспилотного движения данное ТС оснащено лазерным дальномером, несколькими камерами и прочим необходимым оборудованием. Платформа предназначена для перевозки полезных грузов массой до 300 кг. Робот управляется дистанционно, может работать в режиме следования за другим транспортным средством, либо за человеком, идущим впереди машины.

Другим популярным робототехническим комплексом является High-Speed Off-Road Robot Platform – разработка компании Innok TX (Германия). Данная платформа позиционируется как вездеходная и может быть оснащена навигационным оборудованием, различными датчиками и вычислителями по желанию заказчика. Данный робот оснащен независимой подвеской и может развивать скорость до 30 км/ч [7]. Одним из робототехнических комплексов для работы на заснеженной территории является 6WD RC Snow Plow Robot Platform – WC DB [8]. Данный комплекс имеет полный привод, осуществляемый с помощью цепной передачи на каждый борт от двух электромоторов с совмещенными редукторами. Робот имеет дистанционное управление и может оснащаться оборудованием для выполнения транспортно-технологических задач (буксировка, перевозка материалов и оборудования, расчистка территорий и т.д.) Робот может передвигаться по крутым склонам и преодолевать дорожные бордюры.

Наиболее совершенным в плане конструкции и возможностей работы по бездорожью является разработка компании AMBOT – роботизированная колесная платформа – Wheeled Platforms [9]. Данная платформа обладает полным приводом колес, 19-дюймовыми шинами, высоким клиренсом – 200 мм. Корпус обладает высоким уровнем защиты от попадания влаги, грязи и пыли. Данный комплекс обладает независимой подвеской на двух поперечных рычагах, поворотным устройством как двух передних, так и всех четырех колес.

По результатам проведенного анализа существующих на рынке робототехнических комплексов можно сделать вывод о том, что легкие платформы массой до 300 кг в большинстве своем не обладают достаточными характеристиками для эффективного выполнения работ на бездорожье: низкий клиренс, отсутствие подвески, невозможность регулирования крутящего момента на каждом колесе, отсутствие оборудования для движения по заданным координатам без участия оператора, дистанционно управляющего роботом.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

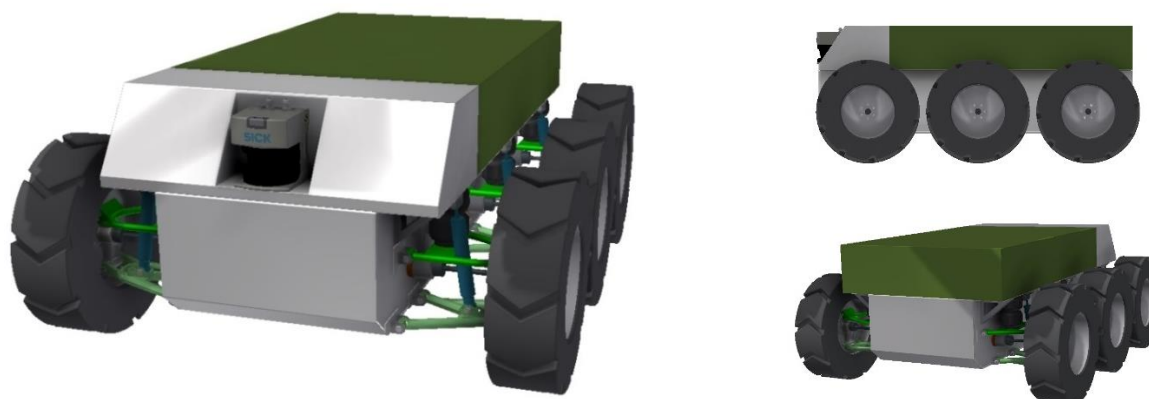
- проектирование шасси БНТС;
- анализ основных принципов обеспечения подвижности транспортных средств с помощью систем управления;
- разработка математических моделей движения БНТС с учетом работы систем адаптивной подвижности средствами программного обеспечения;
- анализ результатов моделирования движения БНТС, оснащенных адаптивными системами управления, обеспечивающими их подвижность.

### Разработка конструкции макета шасси НМР

Для отработки и апробации систем адаптивной подвижности был разработан макет наземного мобильного робота с колесной формулой бхб и индивидуальным электроприводом (рис. 1). Технические характеристики шасси приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
Технические характеристики шасси

Параметр	Значение
Габаритные размеры, м	1.8x1.5x0.77
Масса, кг	300
Размерность шин	23x7-12
Макс. Момент электродвигателя, Нм	21
Передаточное число планетарного редуктора	10
Максимальная скорость, км/ч	10
Макс. Преодолеваемый угол подъема, град.	30



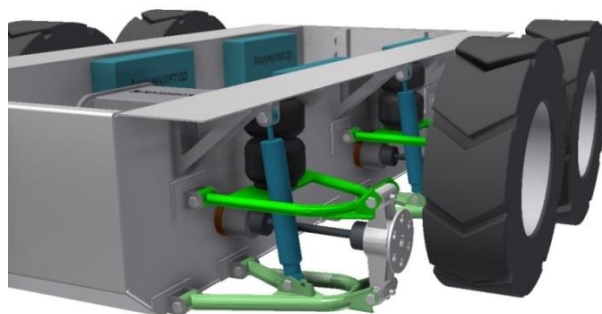
**Рис. 1. Внешний вид НМР**

В ходе проектирования шасси решался ряд важных конструктивных задач.

Первой задачей является выбор типа и параметров независимой подвески, а также способов регулирования жесткости и управления клиренсом. По заданным условиям эксплуатации был выбран оптимальный тип подвески – на двух поперечных рычагах (рис. 2). Данная конструкция обладает рядом следующих преимуществ: реализация большого хода подвески, универсальность компоновки и возможностью быстрого снятия – установки, что существенно повышает ремонтопригодность в условиях прибрежной зоны.

Для решения задачи обеспечения адаптивности подвески был проведен анализ ряда существующих решений данной проблемы. Понятие адаптивности подвески сводится к регулированию клиренса и углов наклона корпуса шасси для обеспечения безопасного устойчивого движения (снижение вероятности опрокидывания). В качестве упругого элемента используется пневматическая подушка. Данное решение объясняется тем, что пневматическая подвеска позволит не только регулировать клиренс, что крайне необходимо в тяжелых условиях движения по береговой зоне. Второй задачей является разработка системы контроля крутящего момента. После проведения анализа ряда работ [10-12] был сделан вывод, что для эффективного и быстрого изменения крутящего момента оптимально подходит электрическая трансмиссия. Возможность регулировки крутящих моментов по бортам макета позволяет существенно повысить подвижность и влиять на маневренные качества. Регулировка моментов на каждом отдельном колесе осуществляется на базе показаний акселерометра и дат-

чиков угловой скорости. Изменение требуемым образом подаваемой силы тока на электродвигатели позволяет реализовать максимальные сцепные возможности каждого колеса и минимальное сопротивление при движении на местности.



**Рис. 2. Двухрычажная подвеска НМР**

### **Разработка концепции адаптивной системы поддрессоривания**

При разработке концепции адаптивной системы поддрессоривания необходимо было решить задачу поддержания устойчивости НМР. Задача поддержания устойчивости НМР особо важна при эксплуатации в прибрежной и горной зоне, большая часть которых представляет из себя холмистые, каменистые местности с часто меняющимся углом косогора. Трудность обеспечения устойчивости транспортного средства усугубляется при эксплуатации в автономном режиме. При движении НМР в таком режиме повышается вероятность встречи с различного рода препятствиями. В результате таких встреч может произойти удар крайними колесами в непреодолимое препятствие, экстренное торможение, преодоление препятствия в объезд или без маневра, если его высота окажется приемлемой для ее преодоления.

Потеря устойчивости НМР связана с изменением его положения в пространстве или на плоскости. Поэтому необходимо различать устойчивость к опрокидыванию и устойчивость к заносу или сползанию. В обоих случаях может существовать два вида устойчивости движения – статическая и динамическая [13]. Под статической устойчивостью понимают способность транспортного средства сохранять исходное положение, находясь в покое или в движении.

Под динамической устойчивостью – способность машины противостоять изменению заданного угла наклона ее корпуса при воздействии возмущающих факторов. Применительно к НМР будем связывать с опрокидыванием в вертикально-продольной и вертикально-поперечной плоскостях. Соответственно, будем различать продольную и поперечную устойчивость к опрокидыванию. Потеря продольной устойчивости НМР происходит относительно некоторой оси, лежащей в поперечной плоскости, которая является осью продольного опрокидывания. Опрокидывание НМР в вертикально-продольной плоскости возможно при движении под уклон или на подъеме в случае резкого разгона, торможения, наезда на выступающие непреодолимые препятствия или преодоления различного рода неровностей рельефа. Потеря продольной устойчивости НМР в зависимости от условий, указанных выше, может происходить относительно передних или задних колес вокруг соответствующих осей опрокидывания.

Наиболее важным является опрокидывание НМР в вертикально-поперечной плоскости. Данное явление возможно при движении по крутому косогору, в случае удара колес о препятствие при боковом скольжении, либо при преодолении различного рода препятствий, либо в процессе поворота. Для уменьшения крена кузова и предотвращения опрокидывания в вертикально-продольной и вертикально-поперечной плоскостях на БНТС применена пнев-

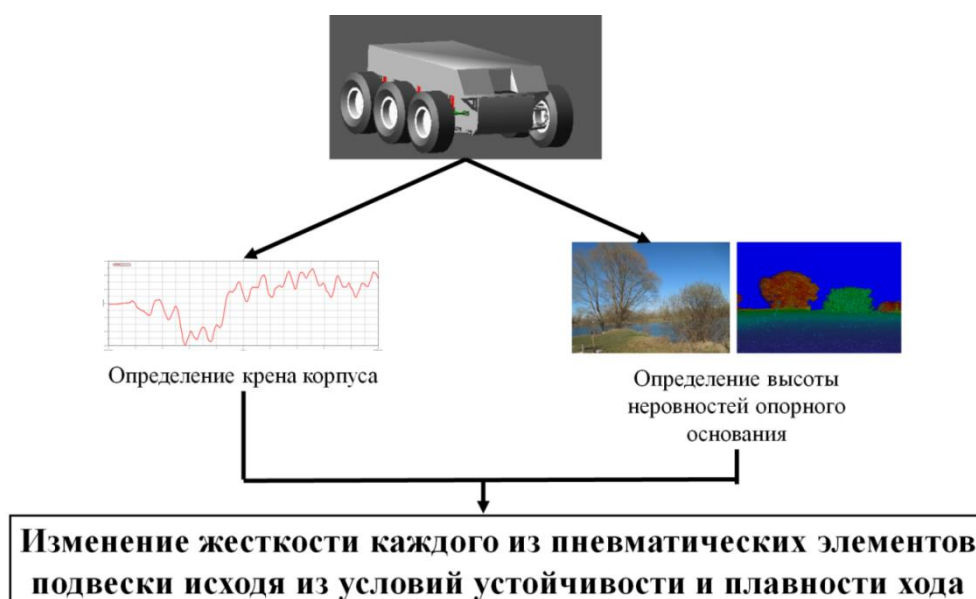
матическая подвеска. Изменение давления воздуха в упругом пневмоэлементе влияет на жесткость самого элемента, а также позволяет регулировать положение кузова.

Для быстрой и эффективной корректировки положения центра масс кузова при движении НМР необходимо разработать систему управления электромагнитными клапанами блока подачи воздуха.

При проектировании такой системы необходимо учитывать несколько составляющих:

- 1) препятствия на пути следования НМР. Прогнозирование и оценка препятствий впереди транспортного средства;
- 2) скорость НМР;
- 3) углы наклона центра масс корпуса НМР в продольной и поперечной плоскостях.

Структурная схема работы адаптивной подвески представлена на рис. 3.



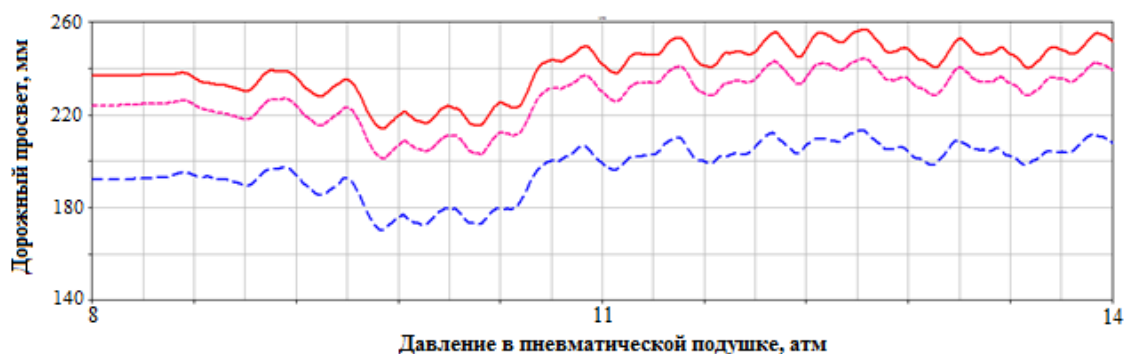
**Рис. 3. Структурная схема работы адаптивной подвески**

В данной схеме учитываются две составляющие, которые будут являться входными данными в систему управления. Первой из них является комплекс данных о высоте неровности опорного основания на пути следования НМР. С помощью лазерного дальномера будут считываться данные и направляться в блок управления. В блоке данные будут сравниваться с заданными параметрами высоты для принятия бортовым компьютером определенного решения. В диапазоне некритических высот неровностей будет регулироваться дорожный просвет НМР. Вторая составляющая – угол отклонения от вертикальной плоскости центра масс корпуса. Как было сказано выше, при опрокидывании НМР не только будет потеряна подвижность, но и велика вероятность повреждения дорогостоящего оборудования, а также потеря связи со спутником, ввиду повреждения навигационного оборудования. Это ведет к трудности определения местоположения НМР и выезда рабочей группы для устранения аварии.

Основной задачей при разработке данной системы адаптивной подвески является не только реализация двух составляющих системы, а также синтез данных подзадач, так как оба параметра так или иначе связаны между собой. При успешной реализации данной системы планируется существенно повысить безопасность работы НМР в прибрежной зоне, а также расширить рабочую область комплекса на крутых склонах, каменистой и холмистой местностях. Перед созданием адаптивной системы подрессоривания необходимо произвести компьютерное моделирование. Для моделирования систем управления адаптивной подвеской и контроля крутящего момента используются программные комплексы MSC Adams в связке с

Matlab/Simulink. С помощью MSC Adams была построена математическая модель комплекса. В ходе виртуальных испытаний был проведен ряд заездов по типовой береговой зоне [14].

Было проведено моделирование изменения дорожного просвета НМР в зависимости от жесткости подвески. Результаты представлены на рис. 4.



**Рис. 4. Изменение дорожного просвета НМР в зависимости от давления в пневматической подушке**

Разница между самым низким положением кузова и самым большим дорожным просветом составляет до 120 мм. Изменение жесткости подвески ведет также к уменьшению виброускорений, передающихся на корпус НМР.

По итогам вышеуказанных испытаний подвески можно сделать вывод о правильности выбранной системы подрессоривания. Данная система обладает большим количеством регулировок, которые при работе в системе повысят подвижность и безопасность функционирования комплекса.

### Разработка системы контроля крутящего момента

Разработка способов автоматического управления приводом колес и их обоснование требует проведения математического моделирования, с созданием модели движения НМР с электрической трансмиссией (ЭТ), управляемой различными способами. Для создания математической модели используется ПК MATLAB/Simulink. Целесообразность использования данного ПК и адекватность решаемым в проекте задачам подтверждается опытом его применения инженерным сообществом при разработке алгоритмов работы автоматических и интеллектуальных систем контроля динамики вездеходных транспортных средств для повышения их подвижности в условиях бездорожья [15-17].

По результатам анализа работ можно выделить необходимые характеристики разрабатываемой в рамках проекта модели. Разработанная математическая модель должна удовлетворять следующим требованиям:

- учитывать взаимное влияние основных модулей (силовая установка, трансмиссия, движитель) друг на друга;
- учитывать несущую способность и параметры сдвига грунта;
- учитывать возможность разработки, применения и изменения законов управления индивидуальным приводом движителей.

Подводимый к ведущему колесу крутящий момент затрачивается на преодоление сопротивлений качению, разгон колеса и на реализацию тягового усилия. Общее уравнение динамики колеса имеет вид:

$$I_w \cdot \dot{\omega}_w = T_m \cdot u_{fd} \cdot \eta_{fd} - T_{load}$$

Момент сопротивления вращению определяется моментом сопротивления качению колеса и моментом, который создает тангенциальная составляющая силы взаимодействия колеса с опорным основанием

$$T_{load} = T(R_z) + T(R_x)$$

Использование данной модели работы ЭТ НМР, позволяет производить поиск алгоритмов регулирования параметров ЭТ для достижения требуемых показателей подвижности и энергоэффективности в условиях любого бездорожья с учетом необходимых факторов, влияющих на параметры работы НМР. Данная схема отражает связь между моментом двигателя, моментами, приложенными к колесам, угловой скоростью вращения вала двигателя и угловыми ускорениями вращения колес. Обеспечение максимальной силы тяги и минимального сопротивления качению колеса обеспечивается контролем буксования.

Основным уравнением, характеризующим работу эластичного колеса в ведущем режиме качения, является уравнение мощностного баланса. Уравнение прямолинейной динамики колеса примет вид:

$$I_k \cdot \dot{\omega}_k = T_k - T(R_z) - T(R_x)$$

Момент нагрузки на колесе определяется моментом сопротивления качению колеса и моментом, который создает тангенциальная составляющая силы взаимодействия колеса с опорным основанием.  $T_{load}$  может быть рассчитан следующим образом:

$$T_{load} = R_z r (f_0 + \varphi)$$

где:  $f_0$  – коэффициент сопротивления качению колеса в ведомом режиме,  $\varphi$  – коэффициент продольной силы или коэффициент сцепления эластичного колеса с опорной поверхностью дороги, определяется в соответствии с принятой  $\varphi(s)$  – диаграммой в данных условиях качения, по величине относительного продольного скольжения  $s$  в контакте шины с дорогой;  $r$  – радиус эластичного колеса без учета внешнего скольжения.

При построении математической модели принимаются следующие основные допущения.

1. Рассматривается движение транспортного средства по ровному опорному основанию.
2. Исследуется трехосный автомобиль с равномерным расположением осей.
3. Учтена возможная разница условий движения под разными бортами машины.
4. Образование момента вращения корпуса машины относительно центра масс, возникающего под воздействием различных условий движения бортов транспортного средства, компенсируется управляющими действиями оператора, корректирующими траекторию движения. Оператор удерживает БНТС на заданной траектории движения.
5. Упруго-демпфирующие свойства элементов трансмиссии не учитываются. Систему управления ЭТ считаем без инерционной.
6. Колесо рассматривается как крутильная масса с коэффициентами взаимодействия с опорной поверхностью.
7. Взаимосвязь между колесами описывается через параметры трансмиссии, а также через учет изменения физико-механических свойств материала полотна пути после прохода по нему колеса.
8. В качестве характеристики энергетической установки БНТС используется нагрузочная характеристика электродвигателя.

Расчетная схема движения БНТС представлена на рис. 5.

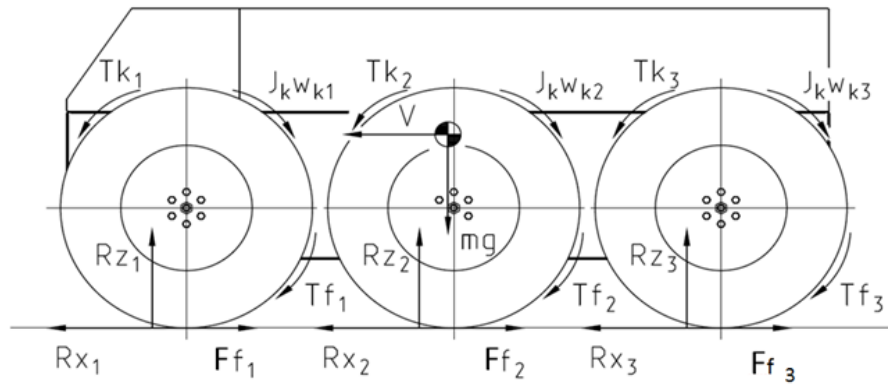


Рис. 5. Расчетная схема движения БНТС

Дифференциальное уравнение движения корпуса машины имеет вид:

$$m_a \frac{dV_a}{dt} = \sum R_{x\varphi_i} - \sum F_{f_i} - F_{\text{дн}} - F_{\text{кр}},$$

Величина буксования, определяющего параметры взаимодействия каждого колеса со снегом, зависит от двух фазовых координат: действительной угловой скорости колеса и линейной скорости центра масс автомобиля. В рассматриваемой модели корпус и оси вращения колес соединены жестко, следовательно, при движении испытывают одинаковые перемещения, скорости и ускорения. Таким образом, выражение для определения коэффициента внешнего скольжения имеет вид:

$$s = 1 - \frac{V_a}{w_k r_k}.$$

Сцепление колеса с грунтом и сопротивление качению колеса также являются функциями двух переменных. Поскольку вышеназванный коэффициент входит и в уравнение движения центра масс транспортного средства и в уравнения движения колес, то они представляют собой систему уравнений, решение которых должно осуществляться совместно.

Продольная реакция колеса с опорным основанием  $R_x$  определяется следующим образом:

$$R_x = \varphi \cdot R_z,$$

где  $R_z$  – вертикальная реакция в пятне контакта колеса с опорной поверхностью,  $\varphi$  – функция сцепления.

Коэффициент взаимодействия колеса с опорной поверхностью, определяющий тягу в пятне контакта определяется по зависимости  $h$  [18]:

$$\varphi = \text{Sign}(S_B) \cdot \varphi_{\text{max}} \cdot (1 - e^{-\frac{|S_B|}{S_0}}),$$

где  $S_B$  – коэффициент буксования колеса;  $\varphi_{\text{max}}$  – максимальное значение коэффициента силы сцепления колеса с опорной поверхностью;  $S_0$  – константа. Характер изменения сцепления от внешнего скольжения при использовании данной зависимости соответствует рисунку.

Сила сопротивления движению колеса может быть рассчитана следующим образом [19,20]:

$$F_{fw_i} = f_{wi} \cdot R_{z_i},$$



где  $f_{wi} = f_o - K_f \cdot \log\left(1 - \frac{\varphi_i}{\varphi_{i_{\max}} \cdot (1 - e^{\frac{-1}{S_o}})}\right)$  – коэффициент сопротивления качению колеса по

деформируемому основанию; где  $K_f$  – коэффициент пропорциональности.

Движение возможно только с определенным ограниченным значением тяги. С ростом буксования тяга перестает увеличиваться, и вся энергия двигателя тратится на преодоление увеличивающейся силы сопротивления движению. Логично также предположить, что длительное буксование в реальных условиях может привести к невозможности выполнять транспортным средством заданные функции в связи с экскавационным эффектом.

Также было проведено моделирование движение НМР в программном комплексе MSC Adams в связке с Matlab/Simulink с учетом работы системы управления распределением мощности по колесам. Были приняты следующие законы управления трансмиссией:

- индивидуальное регулирование внешнего скольжения колес борта по известной линейной скорости движения центра масс шасси НМР;
- «высокопороговое» регулирование колес борта шасси НМР – сигнал подается датчиком «сильного» колеса, т. е. находящегося в лучших условиях движения;
- регулирование буксования колес по средней угловой скорости колес борта шасси НМР.

Рассмотрим показатели прямолинейной динамики НМР с электрической трансмиссией. Для численного моделирования были выделены следующие типовые случаи для движения НМР в условиях грунтовых дорог и местности.

1. Разгон заданных скоростей при прямолинейном движении с постоянными условиями сцепления  $\varphi$  и сопротивления  $f$ .
2. Движение машины по полотну пути со случайным распределением характеристик сцепления и сопротивления (поверхности со случайным распределением характеристик сцепления и сопротивления типа грунтовой дороги, снег со льдом и «микст»).

Анализ результатов исследований работоспособности модели подтвердил возможность для выбора и обоснования параметров, характеристик и регулировок электрической трансмиссии для повышения уровня энергоэффективности при передвижении в условиях бездорожья. При моделировании обеспечивается приемлемое качество переходных процессов. Модель обеспечивает возможность разработки и отладки законов распределения мощности по ведущим колесам в зависимости от условий их взаимодействия с опорной поверхностью с целью обеспечения минимальных энергозатрат на передвижение.

Из графиков работы системы, представленных на рис. 6, наглядно видно значительное снижение буксования колесного движителя с помощью работы системы контроля крутящего момента. По результатам анализа изменения угловых ускорений, крутящих моментов на движителях и их буксований, а также изменения скорости и ускорения НМР, упорных реакций грунта модель была признана работоспособной и отражающей процесс взаимодействия машины с местностью. Таким образом, разработанная имитационная модель соответствует поставленной цели ее разработки.

### Выводы

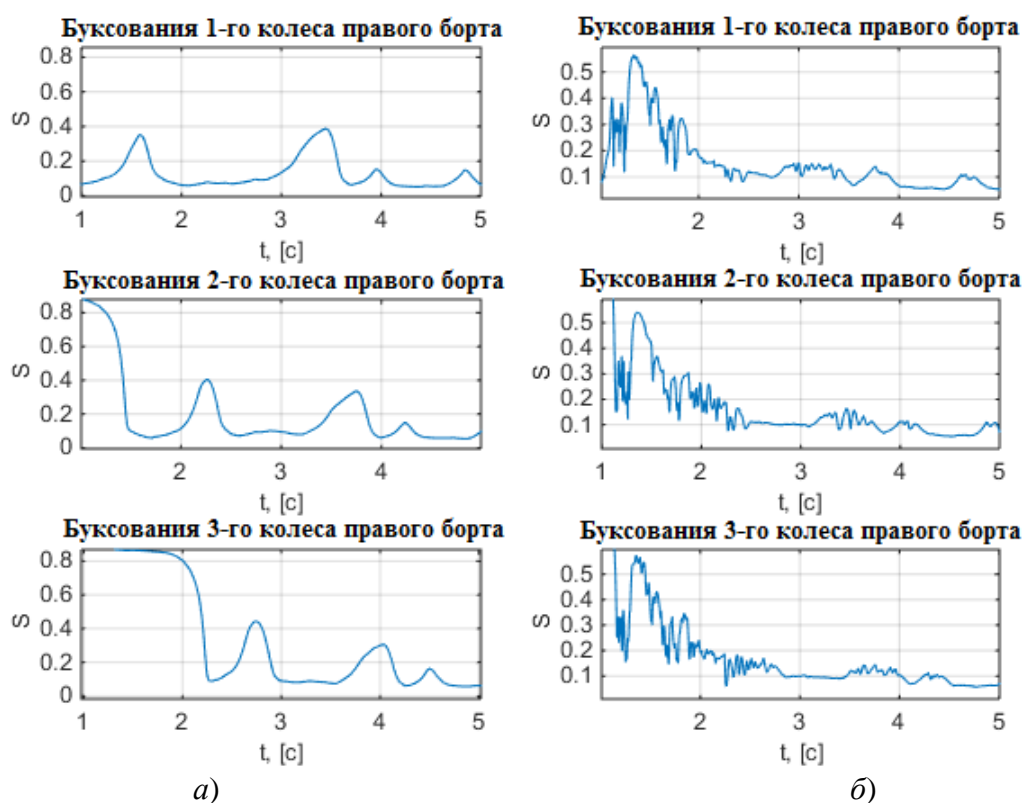
В результате обзора и анализа существующих беспилотных транспортных средств была проведена общая компоновка НМР. Были представлены особенности конструкции разработанного мобильного робота. По результатам анализа основных принципов обеспечения подвижности транспортных средств были определены пути повышения подвижности за счет изменения жесткости подвески и контроля крутящего момента на каждом колесе.

Были разработаны математические модели движения НМР с учетом работы систем адаптивной подвижности, и апробированы с помощью ПК MSC Adams и Matlab/Simulink.

Проведенный анализ результатов моделирования движения НМР, оснащенного адаптивными системами управления, показал целесообразность применения таких систем на НМР.

Дальнейшая работа будет связана с созданием систем адаптивного управления курсовой ориентацией, тяговыми параметрами привода движителей, подпрессориванием, их интеграции и обеспечению совместной работы, а также с технической реализацией опытно-демонстрационного объекта с комплексными системами контроля динамики и проведением соответствующих испытаний.

В 2018 году запланированы экспериментальные исследования макета НМР с целью подтверждения полученных теоретических результатов тягово-скоростных характеристик, параметров независимой подвески, а также исследования разработанных систем адаптивной подвижности.



**Рис. 6. Графики изменения буксований колес для случая моделирования движения НМР:**  
**а) без учета работы системы управления;**  
**б) с учетом работы системы управления**

#### *Библиографический список*

1. Барахтанов, Л.В. Проходимость автомобиля [Текст] / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец; НГТУ. – Нижний Новгород, 1996. – 200 с.
2. Носков, В.П. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям [Текст] / В.П. Носков, А.В. Носков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №12. С. 16-21.
3. Медведев, А.И. Система калибровки видеокамеры и лазерного дальнометрического сканатора мобильного транспортного робота [Текст] / А.И. Медведев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Специальный выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». 2011. С. 99-108.

4. Носков, В.П. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера [Текст] / В.П. Носков, И.В. Рубцов, А.Ю. Романов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 8. С. 2-5.
5. Kurkin, A. Unmanned ground vehicles for coastal monitoring [Text] / Kurkin A., Pelinovsky E., Tyugin D., Kurkina O., Belyakov V., Makarov V., Zezulin D. // International Journal of Imaging and Robotics. 2017. Vol. 17. P. 64-75.
6. Lockheed Martin, SMSS [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.lockheedmartin.com/us/products/smss.html> (Дата обращения 06.03.2018).
7. Innok Robotics, High-Speed Off-Road Robot [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.innok-robotics.de/en/products/tx> (Дата обращения 06.03.2018).
8. 6WD RC Snow Plow Robot Platform-WC DB [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.superdroidrobots.com/shop/item.aspx/6wd-rc-snow-plow-robot-platform-wc-db/2049/> (Дата обращения 06.03.2018).
9. AMBOT, Wheeled Platforms [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.ambot.com/ip-wheel.shtml> (Дата обращения 06.03.2018).
10. Cheng J. Orientation Tracking Control of Mobile Robot with Three Trailers [Text] / Cheng J., Zhang Y., Zhonghua W. // 2015 IEEE International conference on robotics and biomimetics (ROBIO). P. 739-744.
11. Ayadi, N. Identification and development of a real-time motion control for a mobile robot's DC gear motor [Text] / Ayadi N., Turki M., Ghribi R. & Derbel N. // International Journal of Computer Applications in Technology. 2017. 55(1). P. 61-69.
12. Gao, H.B. Adaptive motion control of wheeled mobile robot with unknown slippage [Text] / Gao H.B., Song X.G., Ding L., Xia K.R., Li N., Deng Z.Q. // International Journal of Control. 2014. 87, 8. P. 1513-1522.
13. Планетоходы [Текст] / под ред. А.Л. Кемурджиана. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.
14. Макаров, В.С. Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон [Текст] / В.С. Макаров: дисс. ... д. тех. наук. – Нижний Новгород, 2018. – 321 с.
15. Чижов, Д.А. Разработка комплексного метода повышения энергоэффективности полноприводной колесной машины [Текст] / Д.А. Чижов. – автореф. дис... канд. техн. наук. – М., 2012 – 17 с.
16. Вольская, Н.С. Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации [Текст] / Н.С. Вольская. дис. ... д. тех. наук. – М., 2010.
17. Angelova, A. Slip prediction using visual information [Text] / A. Angelova, L. Matthies, D. Helmick, P. Perona // Robotics: Science and Systems Conference. 2006.
18. Котиев, Г.О. Математическая модель криволинейного движения автомобиля с колёсной формулой 8x8 при различных способах управления поворотом [Текст] / Г.О. Котиев, Н.В. Чернышев, В.А. Горелов // Журнал Автомобильных Инженеров. 2009. № 2. С. 34-39.
19. Гусаков, Д.Н. Разработка методики оптимизации законов управления автоматической трансмиссией полноприводного автомобиля по ряду эксплуатационных показателей [Текст] / Д.Н. Гусаков: автореф. дис... канд. тех. наук. – М., 2010. – 24 с.
20. Курмаев, Р.Х. Метод повышения эффективности полноприводной многоосной машины с гидрообъемной трансмиссией за счет использования корректирующих алгоритмов [Текст] / Р.Х. Курмаев: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – М., 2010. – 23 с.