

К. Ю. М а ш к о в, В. И. Р у б ц о в,  
Н. В. Ш т и ф а н о в

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПОРНОЙ ПРОХОДИМОСТИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

*Рассмотрен вопрос взаимодействия движителя мобильных роботов с опорным основанием с точки зрения управления движением машины. Сформулированы задачи, которые должна решать система автоматического управления движением. Для реализации одной из задач рассмотрены способы определения параметров опорного основания в полевых условиях. Предложена новая методика определения типа грунта в полевых условиях, основанная на определении динамических воздействий со стороны опорного основания на ходовую систему.*

**E-mail:** robot@sm.bmstu.ru

**Ключевые слова:** моделирование, динамика мобильного робота, опорная проходимость.

В последнее время резко возрос интерес к роботам военного назначения, что обусловлено достижениями научно-технического прогресса, изменениями, происходящими в характере современного общевойскового боя, ограниченными физиологическими возможностями человека, а также требованиями о снижении потерь личного состава в бою. Работы ведутся как по роботизации существующих образцов техники, так и по созданию принципиально новых машин. В армии США на данный момент принято на вооружение свыше 15 000 боевых и обеспечивающих роботов. Эти роботы принимали участие в военных действиях в Афганистане и Ираке.

Все робототехнические комплексы (РТК) по типу управления можно разбить на три группы:

- дистанционно управляемые;
- с супервизорным управлением;
- автономные.

Особый интерес представляет третья группа роботов. Это класс мобильных систем, способных без участия оператора двигаться и выполнять различного рода боевые задачи в неполно заданной или неопределенной среде при наличии внешних возмущающих факторов. При этом система управления должна обеспечить профильную и опорную проходимость РТК, для этого необходимо осуществлять:

- комплексную обработку информации от бортовых датчиков, систем технического зрения и систем навигации с привязкой к цифровой карте местности;
- автоматическое планирование глобальных и локальных траекторий движения в реальном масштабе времени;

В состав САУД должны входить:

- подсистема технического зрения, обеспечивающая получение и обработку информации от датчиков различной физической природы в целях определения характеристик зоны движения РТК;
- навигационная подсистема, обеспечивающая автоматическую ориентацию, определение местоположения РТК и привязку текущих моделей внешней среды к цифровой карте местности (базе данных);
- подсистема формирования динамически обновляемых моделей внешней среды, обеспечивающая классификацию зоны движения по критерию проходимости РТК;
- подсистема планирования локальных траекторий обхода (преодоления) обнаруженных препятствий;
- исполнительная подсистема, обеспечивающая автоматическое управление движением РТК по заданному маршруту;
- подсистема внутреннего контроля текущего состояния РТК;
- подсистема обмена информацией между РТК и пунктом дистанционного контроля и другими РТК.

Исполнительный уровень САУД должен обеспечивать:

- автоматическое выполнение базового набора команд (удержание заданных значений скорости, курса, радиуса поворота, разгона и торможения) и обработку заданных траекторий движения (последовательностей из базового набора команд) с требуемой точностью;
- автоматическую остановку РТК при возникновении нештатных (критических) ситуаций с переходом в режим дистанционного управления.

В настоящий момент задачи по обеспечению профильной проходимости автономных роботов на основе систем технического зрения, в основном, решены [1]. Однако для решения полномасштабной задачи автономного управления движением РТК необходимы разработка и внедрение в практику системы обеспечения опорной проходимости, основой которой является математическая модель поведения РТК в конкретных грунтовых условиях.

При построении математических моделей РТК как объекта управления возникают значительные трудности. Во-первых, РТК — это сложная механическая система, состоящая из большого числа механически связанных подсистем (корпус и навесное оборудование, гусеничный или колесный движитель с подсистемой трансмиссии, подсистема подрессоривания и т.д.). Во-вторых, движение РТК часто происходит на пересеченной местности, изобилующей различными препятствиями: подъемами и спусками, косогорами и оврагами; в этих условиях математические модели должны учитывать перемещение РТК в трехмерном пространстве. В-третьих, при движении РТК возникают такие эффекты, как буксование и юз, связанные с деформацией грунта.

В настоящее время известно большое число работ, посвященных взаимодействию движителя с опорным основанием, в которых рассматриваются шасси с различными колесными (жесткие и эластичные колеса) и гусеничными движителями. В качестве подстилающей поверхности берется основание как твердое, так и деформируемое при различных углах уклона местности.

Помимо этого, внимание исследователей уделяется, в основном, рассмотрению процесса взаимодействия движителя с грунтом с позиции проходимости машины, в то время как не менее актуальной является задача управления мобильным роботом в конкретных дорожно-грунтовых условиях при выполнении боевых задач.

Таким образом, необходимо разработать систему автоматического управления движением ТС. Основная задача данной системы — это моделирование динамики движения РТК, т.е. преобразования входных воздействий (угловой скорости и крутящего момента ведущих колес) в перемещение РТК с учетом его динамических свойств, а также особенностей взаимодействия движителя с грунтом. Помимо этого, система должна решать и обратную задачу — на основе динамических воздействий со стороны опорного основания на ходовую систему машины или данных с различных датчиков определять параметры дорожно-грунтовых условий и корректировать управляющее воздействие САУД. В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с реализацией обратной задачи.

Прежде чем переходить к выбору методики и определению набора параметров, характеризующих опорное основание, определим исходные данные и требования, предъявляемые к расчетной системе. Во-первых, это высокое быстродействие, надежность и возможность корректировки расчетных формул. Во-вторых, необходимо учитывать, что система будет адаптирована к конкретной машине. И наконец, следует помнить, что измерения должны проводиться в полевых условиях и без участия человека (разведывательный робот, планетоход, робот, работающий в опасных для человека условиях).

Очевидно, что для реализации поставленной задачи больше подходит группа методик, основанная на использовании эмпирических законов. Наиболее развитым является метод, предложенный WES (Waterways Experiment Station) для оценки проходимости военных разведывательных транспортных средств. В основе метода лежит применение специального устройства — пенетрометра. С помощью этого устройства получают параметр грунта, который получил название конусного индекса (Cone Index). Это комплексный параметр грунта, обычно получаемый путем вдавливания специального конусного наконечника в грунт. Параметр затем используется для определения основных величин, характеризующих взаимодействие движителя с

опорным основанием. Метод нашел широкое применение (особенно за рубежом) благодаря своей простоте и легкости вычислений. В отечественной практике примером может служить пенетрационная установка ПРОП, которая была установлена на аппаратах “Луноход-1, 2”. Существуют стандарты проведения измерений [2–4].

Еще одной методикой определения параметров грунта является применение специального устройства, которое называется беваметр [5–7]. В отличие от пенетрометра с беваметром проводятся измерения двух типов. В одном из них в грунт вдавливаются площадка и строится зависимость силы вдавливания от глубины погружения. Причем размер площадки подбирается в соответствии с размерами реального движителя, для которого проводятся измерения. По результатам измерений можно вычислить погружение движителя ТС и определить сопротивление движению. При измерении второго типа площадку перемещают по касательной к грунту, имитируя скольжение движителя по опорному основанию, и получают зависимость касательного напряжения от перемещения. На основе этих данных можно оценить тягово-сцепные свойства ТС: зависимость тяговой силы от буксования, а также максимально возможную тяговую силу на заданном грунте [7].

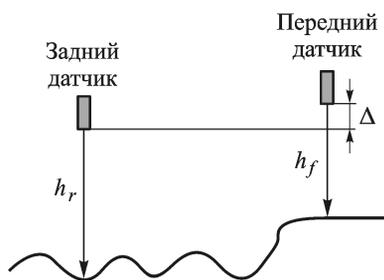
Помимо описанных классических устройств разными авторами в разное время были предприняты попытки создать альтернативные измерительные приборы [5, 8]. Все они действуют по одному и тому же принципу: в грунт погружается наконечник, который затем проворачивается. Вычисляются различные параметры: СИ (конусный индекс), угол внутреннего трения, коэффициент трения металл–грунт, адгезия грунта, связность грунта, напряжения среза.

Таким образом, можно определять тип ДГУ в полевых условиях, установив на мобильный робот дополнительное оборудование. Если рассматривать безэкипажный робот (разведывательный робот, планетоход, робот, работающий в опасных для человека условиях), то установка дополнительного оборудования, очевидно, снижает надежность машины в целом, а также требует наличия специальных управляющих систем.

В работе [9] была предпринята попытка разработать методику косвенного определения параметров грунта, в частности СИ (конусного индекса). Авторы [9] получают зависимость СИ от глубины колеи и буксования колес трактора (рис. 1):

$$CI = 2,6265 \frac{P_z \left(1 - \frac{\delta}{h}\right)^{\frac{3}{2}}}{bd^{\frac{2}{5}}} \left(\frac{s}{z^3}\right)^{\frac{1}{5}},$$

где  $z$  — глубина погружения;  $P_z$  — вертикальная нагрузка на колесо;  $b$  — ширина колеса;  $d$  — диаметр колеса;  $\delta$  — вертикальный прогиб



**Рис. 1. Расположение датчиков для определения глубины колеи**

шины;  $h$  — высота профиля шины;  $CI$  — конический индекс грунта;  $s$  — коэффициент буксования колеса;  $N$  — число проходов колес.

Глубина погружения определяется с помощью лазерных датчиков, установленных перед колесом и за ним.

Буксование определяется отношением реально пройденного пути к теоретическому. В проведенных авторами экспериментах реально пройденный путь замерялся рулеткой, а теоретический вычислялся как произведение числа оборотов колеса на длину окружности катящегося колеса (паспортные данные шины).

В настоящей статье предлагается иной подход определения типа грунта без специальных устройств. При этом допускается использование набора различного рода датчиков, устанавливаемых на базовое шасси, которые можно дублировать и легко менять в случае выхода из строя.

В основе новой методики определения типа грунта лежат две идеи:

- использование типовых маршрутов;
- “прощупывание” грунта.

Машина выполняет типовые геометрические фигуры (рис. 2) на полигоне в условиях конкретной местности на нескольких распространенных типах грунта (например, на пяти). Тензометрические датчики фиксируют динамические воздействия на движитель ТС со стороны грунта (продольную ( $R_X$ ) и поперечную ( $R_Y$ ) силы, крутящий момент  $M_k$ , буксование  $s_k$ ). Эти данные обрабатываются и заносятся в базу данных.



**Рис. 2. Пример типового маршрута**

При “прощупывании” грунта момент подается не на все колеса ТС, а, например, только на передние (задние) или правые (левые). Для гусеничного РТК — на правый или левый борт. Аналогичные действия выполняет человек или животные при перемещении, например, по болотистой или очень скользкой поверхности — ногой (лапой) шупает почву и по возникшим ощущениям принимает решение о том, как следует двигаться дальше. Установленные на машине тензометрические датчики также фиксируют динамические воздействия на движитель ТС со стороны грунта (продольную ( $R_x$ ) и поперечную ( $R_y$ ) силы). Эти данные обрабатываются и заносятся в базу данных.

Испытания проводятся несколько раз для повышения точности замеров. В результате в базе данных машины формируются усредненные сведения о различных типах грунта. Типы грунтов, на которых следует проводить испытания, определяются исходя из предполагаемого района эксплуатации ТС. Замеры выполняются на одной и той же машине, а результаты (база данных) затем распространяются на аналогичные машины.

Во время реальной эксплуатации перед непосредственным началом движения по заданному маршруту машина выполняет такую же геометрическую фигуру, так же “прощупывается” грунт. Данные с датчиков ( $R_x$  и  $R_y$ ) обрабатываются и сравниваются со значениями из базы данных. Выбирается тип грунта, наиболее близко соответствующий сделанным замерам.

**Математическая модель динамики РТК.** После определения типа грунта представляется целесообразным использовать характеристики тягово-сцепных свойств и потерь энергии для определенных условий взаимодействия колеса с опорным основанием, полученные при экспериментальных исследованиях в грунтовом канале или на полигоне [10].

Характеристиками процесса криволинейного движения ТС в различных случаях движения являются [11]:

1. Тяговая характеристика в плоскости колеса (рис. 3) — зависимость  $s = f(K_T)$ , где  $s$  — коэффициент буксования колеса;  $\delta$  — угол увода;  $K_T = \frac{R_x}{R_z}$  — удельная свободная тяга.

2. Годограф удельных реакций в плоскости грунта (рис. 4)  $\mu = f(K_T)$ , где  $\mu = \frac{R_y}{R_z}$  — удельная боковая реакция.

В отличие от прямолинейного движения свободная тяга  $R_x$  (рис. 5) при перемещении колеса под углом  $\delta$  к своей плоскости в режиме бортового поворота не полностью характеризует его тяговые возможности. Это вызвано тем, что колесо в данном случае преодолевает дополнительное сопротивление в виде поперечной реакции грунта  $R_y$ , возникающей при боковом скольжении обода. В итоге результирующая сила

тяги, создающая поворачивающий момент при повороте ТС, направлена по касательной к траектории движения колеса и составляет

$$R_T = R_x \cos \delta - R_y \sin \delta.$$

3. Удельные потери энергии  $f_w$  (потери энергии при движении на единицу пройденного колесом пути при единичной вертикальной нагрузке) определяются по формуле

$$f_w = \frac{M_k \cos \delta}{R_z r_0 (1 - s)} - K_R,$$

где  $r_0$  — расчетный (начальный) радиус качения колеса без буксования ( $s = 0$ ). Критерий  $f_w$  интегрально учитывает все виды потерь (силовые и кинематические) на движение. Зависимость  $f_w$  от  $K_R$  дает возможность оценить эффективность работы колес во всей возможной области тяговых режимов (рис. 6).

Существуют различные расчетные схемы поворота колесного транспортного средства с поворотными и неуправляемыми колесами, рассматривающие машину как в статике, так и в динамике [12]. В [11] рассматривается установившийся бортовой поворот  $m$ -осного транспортного средства (рис. 7).

При условии постоянства угловой скорости ведущих колес по одному борту поворот описывается следующей системой уравнений:

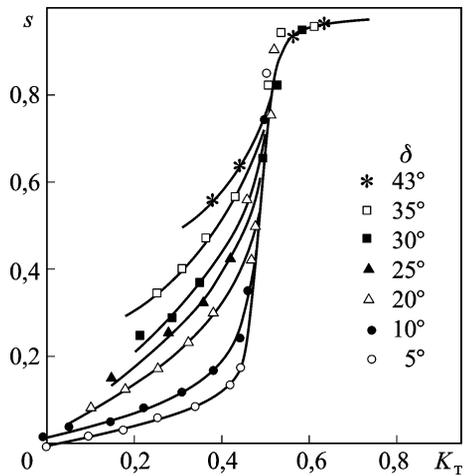


Рис. 3. Тягово-сцепная характеристика МУК (МК-4) на ИАГ [11]

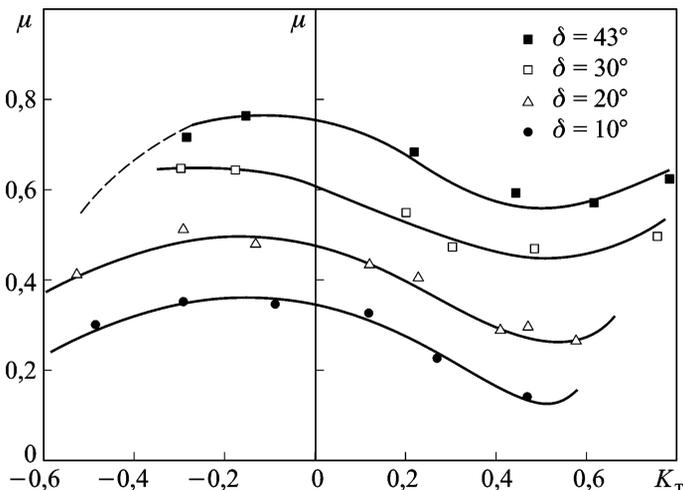


Рис. 4. Зависимость  $\mu = f(K_T)$  для жесткого колеса на песке [11]

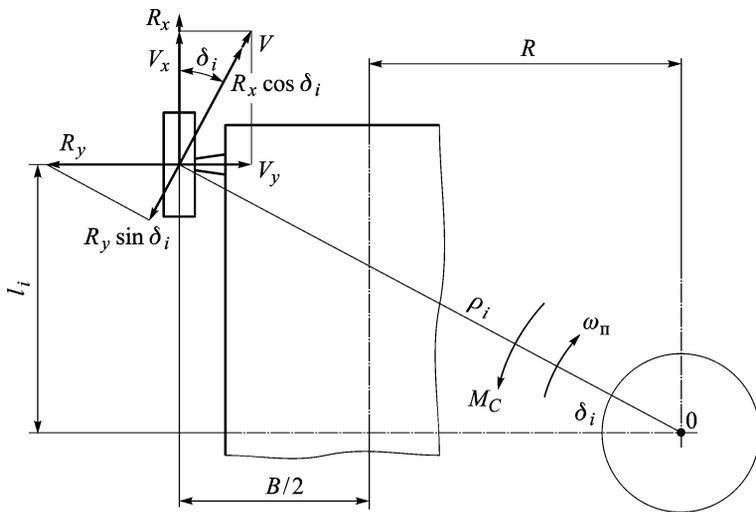


Рис. 5. Расчетная схема бортового поворота  $i$ -го колеса [11]

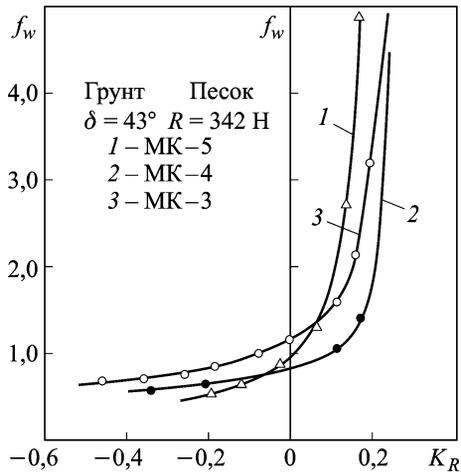


Рис. 6. Влияние жесткости образца МУК на потери энергии [11]

$$v_C = 0,5r_0 [\omega_2 (1 - s_2) + \omega_1 (1 - s_1)];$$

$$\omega_{\Pi} = \frac{r_{\text{в.к}}}{B} [\omega_2 (1 - s_2) + \omega_1 (1 - s_1)];$$

$$R = \frac{v_C}{\omega_{\Pi}};$$

$$C_x = M\omega_{\Pi}^2 R;$$

$$C_y = M\omega_{\Pi}^2 \chi;$$

$$\sum R_{z2i} = 0,5Mg + C_y \frac{h_{\text{ц.м}}}{B};$$

$$\sum R_{z1i} = Mg - \sum R_{z2i};$$



леса. Результирующие реакции определяются из уравнений

$$R_{x1i} = R_{z1i}K_{\tau1i};$$

$$R_{x2i} = R_{z2i}K_{\tau2i};$$

$$R_{y1i} = R_{z1i}\mu_{1i};$$

$$R_{y2i} = R_{z2i}\mu_{2i}.$$

Полученные реакции дают возможность найти момент сопротивления повороту машины вокруг центра масс

$$M_C = \sum_1^m R_{y1i}l_i + \sum_1^m R_{y2i}l_i$$

и тяговые усилия по бортам

$$P_1 = 0,5C_x - \frac{M_C}{B} + \sum_1^m R_{z1i}f_{1i};$$

$$P_2 = 0,5C_x + \frac{M_C}{B} + \sum_1^m R_{z2i}f_{2i},$$

где  $f_{1i}$  и  $f_{2i}$  — коэффициенты сопротивления движению, в общем случае зависящие от режима движения, скольжения, углов увода (в рамках решаемой задачи их можно считать постоянными и равными коэффициентам сопротивления прямолинейному движению).

Рассмотрим математическую модель плоскопараллельного движения РТК в общем виде:

$$m(\dot{v} + v\omega) = \sum F_x;$$

$$m(\omega - \dot{v}) = \sum F_y;$$

$$J_z\dot{\omega} = \sum M_z,$$

где  $v$  — скорость робота в направлении продольной оси  $C_x$ ;  $v$  — боковая скорость центра масс РТК;  $\omega$  — угловая скорость вращения центра масс относительно вертикальной оси  $z$ ;  $m$  — масса РТК;  $J_z$  — момент инерции РТК относительно вертикальной оси  $z$ , проходящей через центр масс;  $\sum F_x$  и  $\sum F_y$  — суммы проекций всех внешних сил, действующих на РТК со стороны дороги, на координатные оси;  $\sum M_z$  — сумма моментов внешних сил, действующих на РТК со стороны дороги, относительно вертикальной оси  $z$ .

В случае совмещения осей  $Ox$  и  $Oy$  с продольной и поперечной осями РТК соответственно получим следующие уравнения динамики

движения РТК:

$$m\dot{v}_x = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m R_{xij} - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m R_{fij} - P_k;$$

$$m\dot{v}_y = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m R_{yij};$$

$$J_z \dot{\omega} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m R_{xij} \frac{B}{2} - M_C.$$

В этих уравнениях используются следующие обозначения:  $\dot{\omega}$  – угловое ускорение РТК относительно оси  $z$ ;  $\dot{v}_x, \dot{v}_y$  – ускорение РТК в продольном и поперечном направлениях;  $R_{xij}, R_{fij}, R_{yij}$  – проекции силы сопротивления движению на продольную ось РТК;  $P_k$  – сила на крюке;  $\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m R_{xij} \frac{B}{2}$  – поворачивающий момент, создаваемый продольными реакциями.

На основе представленной системы уравнений, описывающей динамику движения РТК, решена прямая задача САУД.

**Заключение.** Таким образом, сформулированы задачи, решаемые САУД. Это, во-первых, моделирование динамики РТК с учетом особенностей взаимодействия движителя с опорным основанием, во-вторых, определение типа грунта в полевых условиях. Авторами были рассмотрены различные способы получения параметров опорного основания и предложена методика определения ДГУ на основе динамических воздействий со стороны опорного основания. Разработан принцип работы САУД при использовании характеристик тягово-сцепных свойств и потерь энергии для различных условий взаимодействия движителя с грунтом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010 // Труды науч.-техн. конф.-сем. Вып. 4 / Под ред. Р.Р.Назирова. – М.: КДУ, 2011. – 328 с.
2. ГОСТ 19912–2001 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 13 с.
3. ASAE standards EP542. Soil cone penetrometer: procedures for using and reporting data obtained. – St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2000.
4. ASAE standards S313.3. Soil cone penetrometer. – St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2000.
5. Garciaño L. O., Upadhyaya S. K., Jones R. A. Measurement of soil parameters useful in predicting tractive ability // Journal of Terramechanics. – 2010. – Vol. 47. – P. 295–305.

6. W i l l s B. The design and development of a hydraulic bevameter // Journal of Terramechanics. – 1964. – Vol. 1. – P. 91–97.
7. W o n g J. Y. Terramechanics and off-road vehicles: 2nd edition. – Kidlington, Oxford: Elsevier, 2010. – 468 p.
8. U p a d h y a y a S. K., W u l f s o h n D., M e h l s c h a u J. An instrumented device to obtain traction related parameters // Journal of Terramechanics. – 1993. – Vol. 30. – P. 1–20.
9. N a m a J. S., P a r k Y. J., K i m K. U. Determination of rating cone index using wheel sinkage and slip // Journal of Terramechanics. – 2010. – Vol. 47. – P. 243–248.
10. С е р е б р е н н ы й И. В. Повышение проходимости автомобиля за счет рационального распределения потоков мощности по колесам: Дис. . . канд. техн. наук. – М., 2009. – 161 с.
11. М а ш к о в К. Ю. Метод оценки тягово-сцепных качеств специального транспортного средства в режиме бортового поворота на стадии проектирования: Дис. . . канд. техн. наук. – М., 1991. – 165 с.
12. С м и р н о в Г. А. Теория движения колесных машин: Учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 353 с.

Статья поступила в редакцию 23.03.2012