

194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21.  
Тел.: 88125526093; 88125839693.

**Vasil'ev Andrey Viktorovich**  
Central R&D Institute of Robotics and Technical Cybernetics.  
E-mail: andrspan@yandex.ru.  
21, Tikhoretsky pr., St. Petersburg, 194064, Russia.  
Тел.: 88125526093; 88125839693.

УДК 629.11.012

**Г.О. Котиев, В.А. Горелов**

### **ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ПО КОЛЕСАМ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

*В статье приведено описание предложенного закона распределения мощности по колесам транспортного комплекса с индивидуальной схемой трансмиссии, позволяющего повысить показатели опорной проходимости. Представлена расчётная схема объекта и основные положения разработанной математической модели, предназначенной для имитационного моделирования прямолинейной динамики по несвязному грунту. Обозначены направления дальнейших исследований.*

*Пробитость; закон распределения мощности; нечеткая логика; математическая модель; имитационное моделирование; трансмиссия; контроллер; затраты энергии.*

**G.O. Kotiev, V.A. Gorelov**

### **THE LAW OF DISTRIBUTION CAPACITY ON WHEELS FOR VEHICLE ROBOTIC COMPLEX**

*In article the description of the offered law of distribution of power on wheels of a transport complex with the individual scheme of the transmission is resulted, allowing to raise indicators of basic passableness. The settlement scheme of object and substantive provisions of the developed mathematical model intended for imitating modelling of rectilinear dynamics on an inconsistent ground is presented. Directions of the further researches are designated.*

*Passableness; the law of distribution of power; fuzzy logic; mathematical model; simulation modeling; transmission; the controller; energy expenses.*

Как известно, движение любого колесного объекта по несвязным грунтам характеризуется большими затратами энергии, обусловленными значительным буксованием ( $S_B$ ) ведущих колес. Такое буксование, связанное с экскавацией грунта и бульдозерным эффектом, приводит к значительным энергетическим затратам. Энергетические потери ( $f_w$ ) значительно возрастают с увеличением коэффициента буксования (рис. 1), а коэффициент свободной тяги ( $\varphi$ ) при этом растет незначительно и имеет определенное предельное значение (рис. 2).

Движение возможно только с определенным ограниченным значением свободной тяги. С ростом буксования тяга перестает увеличиваться, и вся энергия двигателя тратится на преодоление увеличивающейся силы сопротивления движению.

Так как удельная свободная сила тяги определяется соотношением реализуемой силы тяги к нормальной нагрузке на колесе  $P_{Xi}/P_{Zi}$ , то для обеспечения опорной проходимости необходимо обеспечить равенство этого соотношения максимально-му значению коэффициента сцепления  $\varphi_{max}$  для текущего опорного основания.

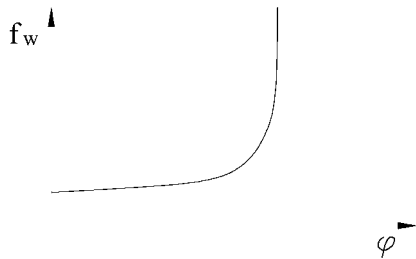


Рис. 1. Зависимость  $f_w = f(\phi)$

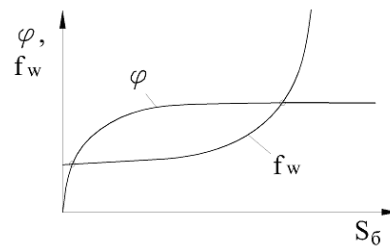


Рис. 2. Зависимости  $\phi(S_B)$  и  $f_w(S_B)$

Однако реализация непосредственного определения коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью при движении крайне затруднительна (хотя робототехнический комплекс и может быть оснащен специальным оборудованием для определения несущей способности грунта). В связи с этим наиболее рациональным является возможность выбора оператором режимов в зависимости от его субъективных оценок условий движения и визуального восприятия свойств опорной поверхности, что в настоящее время реализовано для системы регулирования давления воздуха в шинах. Система же управления подводимой мощностью к колесу определяет текущее соотношение  $P_{Xi}/P_{Zi}$  и сравнивает с выбранным оператором максимальным коэффициентом сцепления для соответствующих дорожных условий, который, в частности, может определяться положением переключателя на приборной панели. Соотношение сил  $P_{Xi}/P_{Zi}$  возможно определять с помощью установки на элементах подвески колесного движителя направленных тензодатчиков, определяющих продольные и вертикальные нагрузки на колесе. Таким образом, регулируя частоту вращения колесного движителя путем управления тягой на колесе, можно обеспечить необходимое значение тяги при минимальных энергозатратах.

Предложенный алгоритм управления приводными двигателями реализуется с помощью аппарата «Fuzzy Logic».

В качестве входного сигнала фаззи-регулятора выбрана величина  $\Delta(P_x / P_z)$ , которая представляет собой относительную разницу между соотношением  $(P_x / P_z)_o$ , выбираемым оператором, исходя из своих представлений о характеристиках опорного основания, и действительной величиной  $(P_x / P_z)_{изм}$ , определяемой с помощью датчикового оборудования:

$$\Delta(P_x / P_z) = \frac{(P_x / P_z)_{изм} - (P_x / P_z)_o}{(P_x / P_z)_o}. \quad (1)$$

Выходным параметром контроллера является  $h$  – положение условного органа управления (педали «газ») для приводного двигателя каждого движителя.

В системе предусмотрено ограничение: скорость при регулировании по соотношению  $P_{Xi}/P_{Zi}$  может быть увеличена, но не больше, чем задано, т.е. из двух выходных значений  $h$  для fuzzy-регуляторов (по скорости  $V$  и по соотношению  $P_{Xi}/P_{Zi}$ ) выбирается меньшее.

Для реализации работы закона, направленного на повышение опорной проходимости, на практике система управления робототехническим комплексом должна быть оснащена: тензодатчиками для определения вертикальной нагрузки на колеса; тензодатчиками для определения продольной нагрузки на колеса; бортовым вычислителем; fuzzy-регулятором.

Построение математической модели движения комплекса рассмотрено на примере трёхосного объекта с индивидуальным, дифференциальным и заблокированным приводом колёс. Расчётная схема прямолинейно динамики, представленная на рис. 3, принята с учётом характера решаемой задачи и описывается соответствующими уравнениями движения (2).

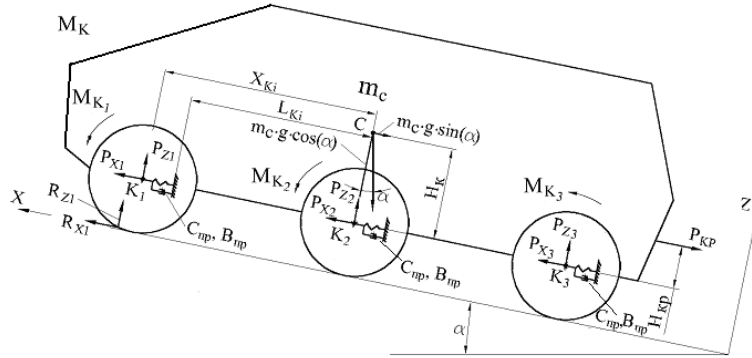


Рис. 3. Расчётная схема движения комплекса

$$\begin{aligned}
 m_c \cdot \dot{V}_{X_c} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^3 P_{X_i} - (m_c \cdot g \cdot \sin(\alpha) + P_{KP}) \\
 I_{k_i} \cdot \dot{\omega}_{k_i} &= M_{K_i} - (1 - S_{B_i})(f_{w_i} + \varphi_i) \cdot R_{Z_i} \cdot r_{ko} \\
 m_{K_i} \cdot a_{X_{K_i}} &= \varphi_i \cdot R_{Z_i} - P_{X_i} - m_{K_i} \cdot g \cdot \sin(\alpha),
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $i = 1, \dots, 3$ ;  $m_c$  – масса объекта;  $m_{K_i}$  – масса колеса;  $I_{k_i}$  – момент инерции колеса;  $i$  – номер колеса;  $\dot{V}_{X_c}$  – продольное ускорение центра масс;  $\dot{\omega}_{k_i}$  – угловое ускорение  $i$ -го колеса;  $a_{X_{K_i}}$  – продольное ускорение центра масс  $i$ -го колеса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$  – угол наклона опорной поверхности;  $r_{ko}$  – радиус колеса в свободном режиме;  $M_k$  – крутящий момент, подводимый к колесу;  $P_{X_i}$  – сила, действующая на корпус автомобиля со стороны колеса по оси  $X$ ;  $P_{KP}$  – сила на крюке;  $f_w = f(\varphi)$  и  $\varphi = f(S_B)$  – тягово-энергетическая и тягово-сцепная характеристика соответственно;  $R_z$  – вертикальная реакция в пятне контакта колеса с опорной поверхностью;  $S_B$  – коэффициент буксования, определяемый по зависимости:

$$S_B = \frac{\omega_k \cdot r_{ko} - V_{xk}}{\omega_k \cdot r_{ko}} = 1 - \frac{r_k}{r_{ko}}; \quad r_k = \frac{V_{xk}}{\omega_k}, \tag{3}$$

где  $\omega_k$  – угловая скорость вращения колеса;  $r_k$  – радиус качения колеса.

Проведенные с помощью имитационного математического моделирования на ЭВМ исследования прямолинейного движения робототехнического комплекса по деформируемому грунту при использовании предложенного закона распределения мощности позволили сделать следующие выводы (в качестве одного из критериев оценки проходимости была выбрана свободная сила тяги на крюке): при благоприятных условиях движения (без нагрузки на крюке и (или) в установившемся режиме) эффективность комплекса, оборудованного системой обеспечения опорной проходимости, не отличается от прототипов со стандартными трансмиссиями (дифференциальной и блокированной). В случае движения с нагрузкой на крюке система обеспечения проходимости, основанная на использовании закона распределения мощности, позволяет реализовать на каждом колесе максимальное значение силы тяги. Исходя из сцепных свойств опорного основания; проведенная по основным принятым критериям сравнительная оценка прототипов с различными схемами трансмиссий подтвердила повышение проходимости робототехнического комплекса, оснащенного системой обеспечения опорной проходимости. При решении транспортных задач на несвязных грунтах; применение системы обеспечения опорной проходимости снижает требования к квалификации оператора по воздействию на органы управления.

Основное направление дальнейших исследований заключается в создании системы распознавания условий движения, которая позволит исключить субъективные оценки дорожных условий, и тем самым, повысить эффективность управления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Наумов В.Н., Рождественский Ю.Л.* Математическая модель взаимодействия металлоупругого колеса с уплотняющимся грунтом // Вопросы расчёта и конструирования гусеничных машин. Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – 1980. – № 339. – С. 84-111.
2. Теория силового привода колес автомобилей высокой проходимости / Под общей редакцией д.т.н., проф. *С.Б. Шухмана* – М.: Агробизнесцентр, 2007. – 336 с.

**Котиев Георгий Олегович**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана.

E-mail: kotievgo@yandex.ru.

105005, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

Тел.: 84992636362.

**Горелов Василий Александрович**

E-mail: gvas@mail.ru.

Тел.: 84992636140; 89032176488.

**Kotiev Georgiy Olegovich**

Bauman Moscow State Technical University.

E-mail: kotievgo@yandex.ru.

5, 2-ya Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia.

Phone: 84992636362.

**Gorelov Vasily Alexandrovich**

E-mail: gvas@mail.ru.

Phone: 84992636140; 89032176488.