

For citation:

Yuschenko A. S. Collaborative Robotics — State of Art and New Problems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 812–819.

DOI: 10.17587/mau.18.812-819

References

1. **Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R.** ed. *Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016*, Springer, LNAI 9812, 254 p.
2. **The Robot Report**, available at: <http://www.therobotreport.com>
3. **Smirnov A., Kashevnik A., Mikhailov S., Mironov M., Petrov M.** Smart M3-Based Robot Interaction Scenario for Coalition Work, *Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 199–207.
4. **Mikhailov B. B., Nazarova A. V., Yuschenko A. S.** *Avtonomnye mobil'nye roboty — navigatsiya i upravlenie* (Autonomous mobile robots- navigation and control), *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2016, no. 2 (175), pp. 48–67 (in Russian).
5. **Kharlamov A., Ermishin K.** Voice Dialogue with a Collaborative Robot Driven by Multimodal Semantics, *Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 225–233.
6. **Yuschenko A. S.** Dialogue Mode of Robot Control on the Base of Fuzzy Logic, *Transaction of the Conference Extreme Robotics*, S-Pb., Politechnika service, 2015, pp. 143–146 (in Russian).
7. **Volodin Yu. S., Mikhailov B. B., Yuschenko A. S.** *Nechetkaya klassifikatsiya prepyatstviy mobil'nym robotom s ispol'zovaniem televizionnoi sistemy prostranstvennogo zreniya* (Fuzzy classification of obstacles by mobile robot with 3D computer vision system), *Proceedings of International Conference "Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence"*, 2011, vol. 1, pp. 372–380 (in Russian).
8. **Vorotnikov S. A., Ermishin K. V.** *Mul'tiagentnaya sensornaya sistema servisnogo mobil'nogo robota* (Intelligent Control System of a Service Mobile Robot), *Vestnik BMSTU Priborostroenie*, 2012, Special iss. 6 "Robotic Systems", pp. 50–59 (in Russian).
9. **Yuschenko A. S.** *Dialogovoe upravlenie robotami na osnove nechetkoi logiki* (Dialogue Mode of Robot Control on the Base of Fuzzy Logic), *Transaction of the Conference Extreme Robotics*, S-Pb., Politechnika service, 2015, pp. 143–146 (in Russian).
10. **Yuschenko A. S.** *Intellektual'noe planirovanie v deyatel'nosti robotov* (Intelligent Planning of Work of Robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 3, pp. 5–18 (in Russian).
11. **Magazov S. S.** *Kognitivnye protsessy i modeli* (Cognitive processes and models), Moscow, LKI, 2007, 248 p. (in Russian).
12. **Gerasimov V. N.** *K voprosu upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota v dinamicheskoi srede* (To the problem of a mobile robot control in the dynamic environment), *Robototekhnika i Technicheskaya Kibernetika*, 2014, no. 1 (2), pp. 44–51 (in Russian).
13. **Yuschenko A. S., Tachkov A. A.** *Integrirovannaya sistema upravleniya pozharным razvedyvatel'nym robotom* (An integrated Control System of a Fire Reconnaissance Robot), *Vestnik BMSTU Priborostroenie*, 2012, Special iss. 6 "Robotic Systems", pp. 106–111 (in Russian).
14. **Deveterikov E. A., Mikhailov B. B.** *Vestnik BMSTU Priborostroenie*, 2012, Special iss. 6 "Robotic Systems", pp. 68–82 (in Russian).
15. **Zhonin A. A.** *Algoritmy obucheniya menedzhera dialoga rechevoi dialogovoi sistemy upravleniya robotom* (Training Algorithm for dialogue manager of a speech dialogue system), *Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence, Proceedings of International Conference*, 2011, pp. 395–406 (in Russian).
16. **Majewski M., Kacalak W.** Speech-Based Interfaces with Augmented Reality and Interactive Systems for Controlling Mobile Cranes, *First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 89–98.
17. **Yuschenko A., Vorotnikov S., Konyshev D., Zhonin A.** Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication. *Interactive Collaborative Robotics, First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 133–142.
18. **Hiroshi Ishiguro Laboratories** — Robots, available at: <http://www.geminoid.jp/en/robots.html> (date of access 01.08.2014).
19. **Neurobotiks** — *Alisa Zelenogradova*, available at: <http://neurobotics.ru/robotics/antropomorfic-robots/alice> (date of access 01.08.2014).
20. **Ekman P., Friesen W., Hager J.** Facial Action Coding System (FACS), available at: <http://www.paulekman.com/facs/>, 2002 (date of access 01.08.2014).
21. **Yuschenko A. S.** *Sostoyaniye i perspektivy dialogovogo upravleniya robotami* (The state of art and perspectives of robot dialogue control), *Proceedings of Institute of psychology RAN "Actual problems of trade psychology and ergonomics"*, iss. 7, ed. Oboznov A. A. and Zhuravlev A. L., Moscow, Institute of psychology RAN, 2015, pp. 408–423 (in Russian).

УДК 531.8

DOI: 10.17587/mau.18.819-824

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., gradet@ipmnet.ru,

И. Л. Ермолов, д-р техн. наук, проф. РАН, ст. науч. сотр.,

М. М. Князьков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **Е. А. Семенов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

А. Н. Суханов, мл. науч. сотр.,

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), Москва

Силовое взаимодействие мобильного нагруженного робота с грунтом¹

Исследованы силовые взаимодействия с различными грунтами как отдельного нагруженного мобильного робота, так и группы роботов. Рассмотрено взаимодействие с грунтом через колесную систему корпуса робота с грузом и взаимодействие отдельного нагруженного колеса с грунтом. Приведены результаты моделирования взаимодействия нагруженного робота с различными грунтами.

Ключевые слова: мобильный робот, грунтовая поверхность, силовое взаимодействие, система сил, особенности движения, проскальзывание

¹ Работа поддержана грантом РФФИ № 16-29-04199 офи_м.

Введение

До настоящего времени ведутся дискуссии о силах, действующих на колесные механизмы. Различные точки зрения в основном касаются природы сил инерции, трактовки координат точек приложения сил при проскальзывании колес и сил трения качения, нахождения коэффициентов этих сил. В работах [1, 2, 6] силы инерции рассматриваются как действующие на колесо силы, в других работах, например [3, 4], считается, что силы инерции на самом деле не действуют, а являются результатом действия других внешних сил.

В ряде работ сила сцепления колеса с грунтом заменяется "продольной силой, параллельной поверхности дороги", или заменяется касательной реакцией дороги [5]. На самом деле сила сцепления колеса с грунтом является физической силой, составляющие которой рассматриваются как проекции на оси координат.

Природа силы трения качения довольно сложна, и ее изучение и уточнение продолжают. В работе [7] рассматривается в качестве причины возникновения трения качения взаимное частичное проскальзывание поверхности колеса и основания, что означает проявление сил сопротивления качению по поверхности контакта. Движения нагруженного робота в зависимости от назначения и доставки груза могут происходить не только по условно абсолютно жесткому грунту, но и, чаще всего, по деформируемому грунту, а поверхность его может быть не горизонтальной и неоднородной. Однако часто вместо действительной физической природы грунта рассматриваются упрощенные механические модели и проводятся многочисленные экспериментальные исследования, в основном производителями автомобилей.

Под силой сопротивления качению будем в дальнейшем понимать выражение $F_k = f_0 \frac{Q}{r} = fQ$, где Q — вес робота и груза, приходящийся на одно колесо, r — радиус колеса, $f = \frac{f_0}{r}$ — коэффициент сопротивления качению колеса. На эту величину смещается точка соприкосновения колеса с грунтом от вертикальной составляющей силы веса Q при движении со скольжением. В зарубежной и отечественной литературе имеются различные данные нахождения коэффициента f [9]. Поэтому, чтобы избежать этой неопределенности, иногда силу трения качения выражают через момент M трения качения, считая, что касательное усилие расходуется на преодоление действия силы и момента M нормальных усилий. Тогда $F_k = \frac{M}{r}$.

В статье рассматриваются силы, действующие на колеса нагруженного мобильного робота при движении по грунтам.

Анализируются различные случаи сил взаимодействия колеса с деформируемым грунтом, и при-

водится условие движения нагруженного мобильного робота без проскальзывания. Приводятся показатели и параметры движения колесного нагруженного мобильного робота, связанные с основными особенностями движения.

Силы, действующие на нагруженный мобильный робот

В общем случае мобильный робот может двигаться по горизонтальной или наклонной поверхности. В системе нагружения груз не закреплен на платформе робота и удерживается в результате превышения силы трения по сравнению с силой, вызывающей скольжение. Действующие здесь силы — веса груза и робота, приложенные в точках центров масс груза и платформы, силы кулонова трения и трения скольжения, возникающие в поверхности соприкосновения груза и платформы, приложенные тяговые усилия к ведущим колесам и силы реакции дороги. Избежать скольжения незакрепленного груза относительно платформы робота можно при условии недостижения критического угла α наклона местности, $\alpha < \alpha_{кр}$, и выполнения условия непревышения силой скольжения силы кулонова трения, т.е. $F_T \geq F_c(\alpha)$, F_T — тяговая сила робота на ведущих колесах; R_x и R_z — касательная и нормальная реакции дороги, параллельные и перпендикулярные поверхности движения; F_H — сила сопротивления разгону, F_P — сила сопротивления подъему (рис. 1). Приведенная на рис. 1 ситуация идеальная, поскольку груз должен быть гарантированно закреплен.

В случае закрепления груза можно считать, что центры масс груза весом G_1 и робота весом G_2 совпадают и общий вес равен сумме $G = G_1 + G_2$. Для показанной схемы нагружения и взаимодействия сил проектируется система управления исходя из обычных условий эксплуатации.

В ситуации, когда один сплошной груз переносится двумя роботами или группой роботов [8], в зависимости от рельефа местности, например при преодолении уклонов, могут возникать моменты сил, действующие на груз через платформу робота, что может привести к поломке закрепленного груза или платформы. В этом случае в разрабатываемой системе управления должны быть предусмотрены компенсирующие воздействия на выравнивание груза относительно платформы за

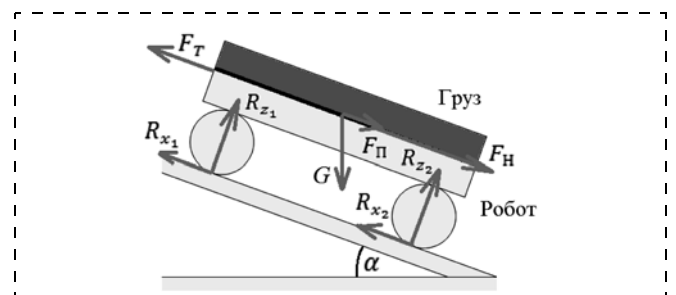


Рис. 1. Силы, действующие на нагруженный робот при подъеме

счет действующих сил и наличия упругого податливого звена разной жесткости, в том числе управляемой упругости или жесткости.

В связи с тем, что рельеф местности, по которой движется нагруженный робот, заранее неизвестен, также требуется введение дополнительного звена в системе управления, предусматривающего выравнивание или компенсацию за счет введения дополнительного момента первоначального положения груза относительно корпуса робота.

Проектируя все силы, действующие на нагруженный робот, на горизонтальную поверхность, получим уравнение движения нагруженного робота:

$$R_{x_2} + R_{x_1} - F_{\Pi} - F_B - F_H = 0. \quad (1)$$

Учитывая, что $F_K = f(R_{z_1} + R_{z_2})$, $F_g = F_K + F_{\Pi}$, получим:

$$F_T - F_K - F_{\Pi} - F_B - F_H = 0 \\ \text{или } F_T - F_g - F_B - F_H = 0. \quad (2)$$

Здесь $F_H = \frac{G}{g} \dot{v} \delta$; $\dot{v}$ — ускорение робота, δ — коэффициент учета вращающихся масс; F_B — внешние силы; $F_{ki} = fR_{zi}$ — сила трения (сила сопротивления качению, $i = 1, 2$); f — коэффициент силы трения; F_g — сила сопротивления дороги, $F_g = fG \cos \alpha + G \sin \alpha = G(f \cos \alpha + \sin \alpha)$, т.е.

$$F_g = F_K + F_{\Pi}; \quad (3)$$

$$F_{\Pi} = G \sin \alpha;$$

F_x — продольная сила, параллельная поверхности;
 F_z — вертикальная нагрузка.

При равномерном движении робота

$$F_T - F_g - F_B = 0. \quad (4)$$

Силовое взаимодействие колес мобильного робота с грунтом

Для обеспечения надежного движения нагруженного колесного робота по сложным грунтам или движения двух или нескольких роботов, несущих общий груз, существенное значение имеет анализ сил, действующих на колесо робота со стороны грунта. Рассмотрение силового взаимодействия колеса робота с грунтом особенно важно при совершении маневров, обходе препятствий, поворотах, разворотах, резких изменениях скоростей в целях принятия соответствующих мер, исключающих проскальзывание или предотвращающих потери устойчивости. Проблема повышения устойчивости и надежности движения колесных транспортных средств решается в течение многих лет в автомобильной и других отраслях промышленности многими разработчиками в соответствии с разработанными подходами [10]. Решение этой проблемы в мобильной робототехнике связано с учетом особенностей движения нагруженных роботов, среди которых необходимо отметить повышенную автономность, мобильность, маневренность, надеж-

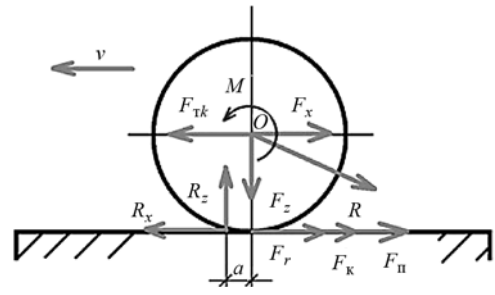


Рис. 2. Силы взаимодействия ведущего колеса нагруженного робота при качении по недеформируемой поверхности

ность перемещения в экстремальных и недетерминированных условиях окружающей среды. Одной из главных мер является исключение проскальзывания [1, 2].

В общем случае, принимая во внимание рекомендации автомобилестроителей, отметим, что на колесо нагруженного робота действуют следующие силы (рис. 2) при движении по прямой:

F_{Tk} — сила тяги, приложенная к колесу;

Q — вес робота и груза, приходящийся на одно колесо;

m — масса робота и груза, приходящаяся на одно колесо;

F_K — сила сопротивления качению, $F_K = fQ$, f — коэффициент сопротивления качению;

F_r — сила сцепления колеса с грунтом, $F_r = Q\mu_0$;

μ_0 — коэффициент сцепления колеса с грунтом; силы F_x и F_z и момент M действуют на колесо со стороны робота;

F_z — вертикальная нагрузка на колесо;

силы R_x и R_z действуют на колесо со стороны дороги — касательная и нормальная реакции дороги;

R_x — продольная сила, параллельная поверхности;

F_{Π} — внешние силы сопротивления;

R — результирующая реакция.

Сила тяги колеса равна сумме всех действующих физических сил:

$$F_{Tk} = \sum_{i=1}^n F_i; F_{Tk} = m\dot{v} + F_K + F_r + F_{\Pi}. \quad (5)$$

В зависимости от режима качения колеса сила F_x может быть направлена как в сторону движения робота, так и в противоположную. R_x — касательная реакция дороги — считается положительной, если направлена в сторону движения, и отрицательной, если направлен наоборот.

Наличие проскальзывания при движении колеса (рис. 3) приводит к появлению пятна контакта "а". Проскальзывание значительно ухудшает динамику нагруженного робота.

Уравнение моментов, действующих на колесо, имеет вид

$$M_k = J\ddot{\phi} + m\dot{v}r + fQr + \mu_0Qr + M_{\Pi}. \quad (6)$$

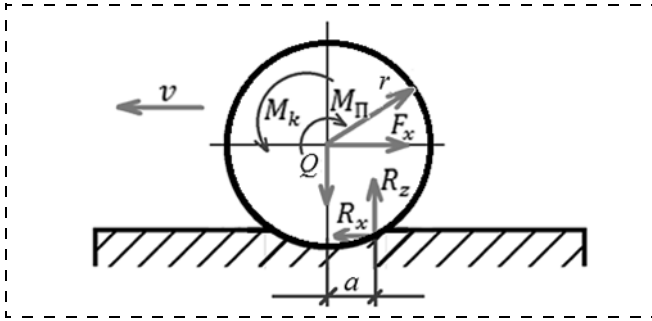


Рис. 3. Силы взаимодействия колеса нагруженного робота с деформируемым грунтом

Учитывая, что физический смысл проскальзывания колеса есть непревышение приводным моментом на колесе момента сил трения в продольном направлении, получим, что условием отсутствия проскальзывания является следующее условие:

$$M_k \leq \mu_c R_z r. \quad (7)$$

Здесь M_k — приводной момент на колесе; r — радиус колеса; R_z — нормальная реакция веса колеса и груза, приходящегося на одно колесо; μ_0 — коэффициент сцепления колеса с грунтом; M_{Π} — момент всех внешних сил; μ_c — коэффициент трения в продольном направлении.

Неравенство означает, что проскальзывание не возникает, если приводной момент не превышает момент сцепления с поверхностью, т.е. приложенные к точке контакта колесо — грунт силы не превышают предельное значение силы трения, а значит, и силы сцепления. Если тяговая сила больше силы сцепления, то робот движется со скольжением ведущих колес.

При возникновении проскальзывания силы трения уменьшаются. Экспериментально было показано [1], что коэффициент $\mu(\lambda)$ продольной силы трения подчиняется закону Гаусса, т.е.

$$\mu(\lambda) = \mu_c e^{-(\lambda^2)/b} = \mu_c \exp(-(\lambda^2)/b), \quad (8)$$

где b — коэффициент, получаемый экспериментально.

В литературе, относящейся к автомобилестроению [2, 5], коэффициент проскальзывания определяется как следующее отношение: $\lambda = \frac{\dot{\phi}r - v_p}{\max(v_p, \dot{\phi}r)}$, где ϕ —

угол поворота колеса, v_p — линейная скорость колеса робота, v_c — линейная скорость колеса робота, r — радиус колеса, μ_c — коэффициент трения в продольном направлении. Проскальзывание отсутствует, если $\dot{v}_p = \dot{v}_c = \dot{\phi}r$. В случае движения с проскальзыванием $v_c = \dot{\phi}r > v_p$. Заметим, что линейная скорость v_p робота равна линейной скорости колеса v_c без проскальзывания. Движущий момент, вызывающий проскальзывание, равен $M_k = \mu_c \exp(-(\lambda^2)/b) Qr$.

Результаты параметрического моделирования

Следуя данным, приведенным в работе [3], на рис. 4–6 (см. третью сторону обложки) представлены расчетные номограммы, позволяющие определить влияние грунта и отношения сил на некоторые параметры робота и показатели проходимости, зависящие от грунта. Зависимость давления в пятне контакта $q_{\text{ш}}$ от геометрических параметров шины показана на рис. 4. Эта зависимость приведена в соответствии с изменением ширины и высоты профиля шины колеса робота:

$$q_{\text{ш}} = \pi h_{\Gamma} \frac{(p_0 + p_w)}{2b} \left(\frac{B}{H} + \frac{3H}{2B} \right) \left(1 - \frac{h}{B} \right). \quad (9)$$

Здесь h_{Γ} — глубина колеи, м; h — прогиб шины, м; p_0 — давление на грунт от жесткости каркаса шины, 10^5 Па; p_w — внутреннее давление воздуха в шине, 10^5 Па; b — ширина протектора шины, м; B — ширина профиля шины, м; H — высота профиля шины, м.

На рис. 5 представлено изменение коэффициента сопротивления качению f в зависимости от прогиба и нагрузки на колесо:

$$f = 3,5 p_0 \psi h^2 (B^2 + 1,5 H^2) \frac{B - 0,3h}{P H B^2} + 0,6 q z \frac{b + b_{Ki}}{P}. \quad (10)$$

Здесь ψ — коэффициент свободной силы тяги; h — прогиб шины, м; P — нагрузка, Н; q — вертикальная координата неровностей микропрофиля, м; z — среднеквадратичное значение перемещения; b_{Ki} — ширина протектора колеи, м; b — ширина протектора шины, м; H — высота профиля шины, м; p_0 — давление на грунт от жесткости каркаса шины, 10^5 Па.

Зависимость нагрузки p на колесо от деформации шины и типа грунта (рис. 6):

$$p = \frac{E h_{\Gamma}}{\frac{2 E h_{\Gamma}}{\pi p_{so}} \arctg\left(\frac{\pi(H_{\Gamma} - h_{\Gamma})}{2 b_{\text{пр}}}\right) + a b_{\text{пр}} \arctg \frac{H_{\Gamma} - h_{\Gamma}}{a b_{\text{пр}}}}. \quad (11)$$

Здесь E — модуль деформации; h_{Γ} — глубина колеи; H_{Γ} — глубина мягкого слоя грунта; p_{so} — давление в колесе; $b_{\text{пр}}$ — ширина протектора; $a = 0,64(1 + b_{\text{пр}}/H_{\Gamma})$ — коэффициент проходимости.

В таблице приведены параметры различных типов грунтов, по которым может двигаться мобильный робот.

Параметры грунтов

Тип грунта	Модуль деформации E , МПа
Суглинок мягкопластичный	6
Суглинок тугопластичный	19
Песок средней крупности, рыхлый	20
Песок средней крупности, средней плотности	28
Песок средний, рыхлый	15
Песок мелкий, средней плотности	25
Песок мелкий, плотный	35

Заключение

Проведено исследование силовых взаимодействий нагруженного мобильного робота с грунтовыми поверхностями. То же самое можно отнести к группам роботов. Рассматривалось взаимодействие с грунтом корпуса робота с навесным грузом через колесную систему и взаимодействие отдельного нагруженного колеса с грунтом. Учтены особенности движения нагруженного мобильного робота, рассмотренные в выполненных ранее многочисленных исследованиях производителей автомобилей.

На основе анализа подходов к пониманию природы действующих на нагруженный мобильный робот сил был обоснован выбор системы сил. Несмотря на то, что в ряде отечественных и зарубежных работ [1–3] силы инерции считаются действующими силами, в нашем исследовании предложено трактовать силы инерции как фиктивные силы, которые не являются силами взаимодействия тел в природе, что было впервые показано в работах [5, 7] академиком А. Ю. Ишлинским. Ведутся дискуссии относительно физической природы пятна контакта [2, 9], а также о силах сцепления колеса с грунтом [1, 6]. Сила сцепления колеса с грунтом считается нами физической силой, составляющие этой силы являются проекциями на оси координат. Движение робота по инерции трактуется как такое, которое может быть вызвано

только в результате внешних приложенных сил. Обоснованная система сил включает силы тяги, веса, трения качения, трения скольжения, сцепления колеса с грунтом, внешние силы.

Список литературы

1. Zielinska T., Chmielniak A. Synthesis of Control Law Considering Wheel-Ground Interaction and Contact Stability // Proceed. of Twelfth Int. Conf. of Climbing and Working Robots. CLAWAR-2012 Turkey, 9–11 Nov. 2012. Mobile Robotics: Solutions and Challenges, World Scientific. 2012. P. 1039–1046.
2. Okada T., Tezuka S., Wada H. Smooth Walk of a Skid-Steering Vehicle Consisting of Feet Jointed to Each Wheel RIM // Proceed. of CLAWAR-2015 Conf., USA, 23–26 July, 2015. Adaptive Mobile Robotics. P. 585–594.
3. Вольская Н. С. Оценка проходимости колесных машин при движении по неровной грунтовой поверхности. М.: МГИУ, 2007. 215 с.
4. Ишлинский А. Ю. Механика. Идеи, задачи, приложения. М.: Наука, 1985. 624 с.
5. Вахламов В. К. Конструкция, расчет и эксплуатационные свойства автомобилей. М.: Академия, 2007. 560 с.
6. Muro T., O'Brien J. Terramechanics, Land Locomotion Mechanics. Tokyo: A. A. Balkema Publishers, 2004.
7. Ишлинский А. Ю. Трение качения // Прикладная математика и механика. 1938. Т. 2, Вып. 2. С. 245–260.
8. Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Соболевников С. А., Суханов А. Н. О научных задачах выполнения транспортных операций группой мобильных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 3. С. 57–62.
9. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. М: Машиностроение, 1981. 232 с.
10. Беккер М. Г. Введение в теорию систем "местность—машина": Пер. с англ. / Под ред. В. В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1973. 520 с.

Force Interaction between Soil and Loaded UGV

V. G. Gradetskiy, gradet@ipmnet.ru, I. L. Ermolov, ermolov@ipmnet.ru,
M. M. Knyazkov, ipm_labrobotics@mail.ru, E. A. Semenov, sim1165@mail.ru,
A. N. Sukhanov, sukhonov-artyom@yandex.ru,
A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: Ermolov Ivan L., Dr. Sc., Professor RAS, Leading Researcher,
Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ermolov@ipmnet.ru

Accepted on September 05, 2017

This paper presents results of research of force interaction with various soil surfaces for a loaded UGV and for a group of UGVs. To ensure the reliable motion of a loaded wheel-based UGV over soil or the movement of two or more robots carrying a common cargo it is essential to analyze forces acting on the robot's wheel from the ground. The interaction with the soil of a robot with a hinged load was considered through the wheel system as the interaction of a loaded wheel with a soil. The peculiarities of the motion of a loaded UGV in the previously performed studies of automobile design field were taken into account. Basing on the analysis of different approaches to understand the nature of forces acting on the loaded mobile robot, the choice of forces was considered. The force of the wheel-ground cohesion is considered to be a physical force. The components of this force are projections on the coordinate axes. Motion of the robot is caused only by external applied forces. System of forces includes traction, weight, rolling friction, sliding friction, grip of the wheel with the ground, external forces. Because of unknown terrain along which moves the loaded robot, it is also necessary to include an additional unit in the control system, providing compensation of the initial torque to the initial position of the cargo regarding the robot's hull. Results of force interaction simulation of a loaded robot with various types of soil are presented.

Keywords: loaded mobile robot, soil, terrain, force interaction, force system, features of motion, slippage

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 16-29-04199 ofr_i.

For citation:

Gradetskiy V. G., Ermolov I. L., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N. Force Interaction between Soil and Loaded UGV,

Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 819–824.

DOI: 10.17587/mau.18.819-824

References

1. Zielinska T., Chmielniak A. Synthesis of Control Law Considering Wheel-Ground Interaction and Contact Stability, *Proceed. of Twelfth Int. Conf. of Climbing and Working Robots. CLAWAR-2012 Turkey*, 9–11 Nov. 2012, Mobile Robotics: Solutions and Challenges, World Scientific, 2012, pp. 1039–1046.
2. Okada T., Tezuka S., Wada H. Smooth Walk of a Skid-Steering Vehicle Consisting of Feet Jointed to Each Wheel RIM, *Proceed. of CLAWAR-2015 Conf.*, USA, 23–26 July, 2015, Adaptive Mobile Robotics, pp. 585–594.
3. Vol'skaya N. S. *Ocenka prohodimosti kolesnyh mashin pri dvizhenii po nerovnoj gruntovoy poverhnosti* (Passability evaluation for wheeled vehicles moving on rough terrain), Moscow, MGIU, 2007, 215 p. (in Russian).
4. Ishlinskij A. Yu. *Mekhanika. Idei, zadachi, prilozheniya* (Mechanics. Ideas, tasks, applications), Moscow, Nauka, 1985, 624 p. (in Russian).
5. Vahlamov V. K. *Konstrukciya, raschet i ehkspluatatsionnye svoystva avtomobilej* (Design, analysis and operational properties of cars), Moscow, Akademiya, 2007, 560 p. (in Russian).
6. Muro T., O'Brien J. *Terramechanics, Land Locomotion Mechanics*, Tokyo, A. A. Balkema Publishers, 2004.
7. Ishlinskij A. Yu. *Trenie kacheniya. Prikladnaya matematika i mekhanika* (The rolling friction. Applied mathematics and mechanics), 1938, vol. 2, iss. 2, pp. 245–260 (in Russian).
8. Agejkin Ya. S. *Prohodimost' avtomobilej* (Passability of cars), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 232 p. (in Russian).
9. Bekker M. G. *Vvedenie v teoriyu sistem "mestnost'-mashina"* (Introduction to the theory of "terrain-vehicle" systems), Ed. by V. V. Gus'kova, Moscow, Mashinostroenie, 1973, 520 p. (in Russian).
10. Gradeckij V. G., Ermolov I. L., Knyaz'kov M. M., Semenov E. A., Sobol'nikov S. A., Suhanov A. N. *O nauchnyh zadachah vypolneniya transportnyh operacij gruppoj mobil'nyh robotov* (On the scientific tasks for the transport operations for group of mobile robots), *Robototekhnika i Tekhnicheskaya Kibernetika*, 2016, no. 3, pp. 57–62 (in Russian).

УДК 004.9

DOI: 10.17587/mau.18.824-828

С. Ф. Сергеев, д-р психол. наук, проф., sspost@mail.ru,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Методологический базис проектирования симбиотических сред тренажеров мехатронных и робототехнических систем¹

Рассматриваются вопросы методологии проектирования обучающих сред сетевых тренажеров, включающих симбиотические формы взаимоориентации, взаимодополнения и взаимодействия систем естественного и искусственного интеллекта для подготовки операторов мехатронных и робототехнических систем.

Ключевые слова: обучающая среда, обучающая ориентация, симбиотические формы интеллектуальных объединений

Проблема обеспечения эффективной профессиональной подготовки операторов робототехнических и мехатронных систем, действующих в условиях супервайзерского, дистанционного и непосредственного управления с использованием систем интерфейса на базе виртуальной, дополненной и индуцированной реальности, по настоящее время не теряет своей актуальности и имеет самостоятельное значение, несмотря на широкое внедрение тренажеров и технологий компьютерного обучения [1]. Ранее ожидалось, что роль человека в сложных системах будет непрерывно снижаться в связи с переходом к автоматическому и автономному управлению. Однако данные прогнозы не оправдались. Более того, наблюдается парадоксально интенсивное включение человека в различные формы ориентирующей и управляющей коммуникации, возникающей в системах управления роботами и в интеллектуальных эргатических средах [2]. Появилась необходимость в обучении операторов принятию и реализации решений,

групповым и коллективным видам деятельности в симбиозе со сложными техногенными средами, наделенными искусственным интеллектом. Возникли новые виды учебной деятельности, связанные с постановкой задач и созданием целевых установок интеллектуальным агентам автоматических систем, а также с формированием и управлением миссиями роботов и систем с высокой степенью автономности. Это, в частности, задачи, связанные с супервайзерским управлением, требующие развития эффективных форм коммуникации машины и человека. Можно сказать, что в настоящее время тренажерное обучение объединяется с информационным изучением профессиональной среды, включением в нее, получением и применением знаний. Отметим также, что деятельность операторов робототехнических систем протекает в режиме реального времени и ошибки оператора на любых этапах ее осуществления могут привести к невыполнению задачи.

Интеллектуализация техногенной среды жизнедеятельности человечества сопровождается появлением технологий моделирования практически всех аспектов профессионального и учебного опыта, что снимает технологическую компоненту проблемы подбора в тренажерах, длительное время считавшуюся основной при создании средств профессиональной подготовки операторов сложных

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 25.8444.2017/БЧ по проекту "Инженерно-психологическое проектирование тренажеров и обучающих систем на базе симбиотических полимодальных техногенных сред" и поддержана грантом РФФИ (проект 16-08-00313).