

2. Нет необходимости в отслеживании положения центра масс роя, как например, в алгоритме SWARM.

3. Лёгкая масштабируемость за счёт добавления новых агентов.

Недостаток алгоритма: отсутствие лидера в рое усложняет управление направлением движения колонии.

### ***Выводы***

В данной статье был представлен обзор основных алгоритмов и методик, используемых при построении статичных и динамичных многоагентных систем.

В настоящее время разработка многоагентных систем является перспективным и важным развитием науки и техники. Поэтому с за-видной регулярностью в данной области появляются новые подходы, алгоритмические и технические решения.

УДК 629.36

## **ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ОПОРНЫХ РЕАКЦИЙ ДВУ- НОГОГО ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ НА ДЕФОРМИРУЕМЫХ ГРУНТАХ**

***В.В. Чернышев, Н.Г. Шаронов, И.П. Вершинина,  
А.А. Гончаров***

*Волгоградский государственный технический университет,  
Россия, Волгоград,  
dtm@vstu.ru*

### ***Аннотация***

Рассматриваются результаты динамического моделирования взаимодействия шагающего движителя с деформируемым грунтом, моделируемым вязкоупругопластичной средой. Показано, что при смене стоп опорные реакции шагающих роботов могут существенно превосходить статические. Полученные результаты предполагается использовать для обеспечения устойчивости шагающих роботов на реальных грунтах.

***Ключевые слова:*** механика шагающих роботов, взаимодействие с грунтом, динамическое моделирование.

# DYNAMICS OF CHANGE OF THE SUPPORT REACTIONS BIPED WALKING PROPULSION ON DEFORMABLE GROUNDS

*V V. Chernyshev, N.G. Sharonov, Vershinina, A.A. Goncharov*

*Volgograd State technical University  
Russia, Volgograd,  
dtm@vstu.ru*

## ***Abstract***

The results of dynamic modeling of the walking propeller interaction with an ecologically raw soil are discussed. The soil is modeled by viscous elastic plastic medium. It is shown that at the moment of overstep leg; reactions of the soil under the feet can significantly outperform static. The obtained results are going to be used to ensure the sustainability of walking robots on real grounds.

**Key words:** mechanics of walking robots, interaction with the soil, dynamic modeling.

## ***Актуальность работы***

В работе обсуждаются результаты динамического моделирования взаимодействия шагающего движителя с деформируемым грунтом при периодических режимах движения. Полученные результаты представляют интерес, в частности, для обеспечения устойчивости антропоморфных робототехнических систем, находящих все большее применение при решении социальных проблем.

## ***Основные проблемы и решения***

Основная сложность теоретического анализа динамики взаимодействия любого шагающего движителя с грунтом состоит в достоверном аналитическом описании процесса взаимодействия стопы с грунтом в опорной фазе и при смене стоп. Кроме многообразия грунтов с различными физико-механическими свойствами и конструкции стопы в рассматриваемом случае также необходимо учитывать скорость нагружения грунта [1-3]. Более того, в отличие от традиционных транспортных средств, нет возможности рассматривать динамику взаимодействия движителя с опорной поверхностью без учета динамики всей шагающей машины, совершающей пространственные колебания, вызванные самим шагающим способом передвижения. По этой причине модели грунта, используемые для колеса и гусеницы, для шагающих машин малоприспособны и сложность теоретического определения напряженного состояния и деформации грунта существенно возрастает.

При моделировании шагающий робот рассматривается в виде системы тел — корпуса и невесомого шагающего движителя (рис. 1).

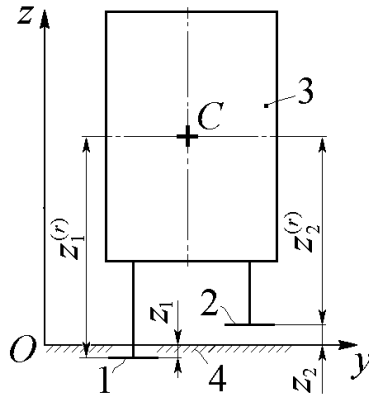


Рис. 1. Расчетная схема робота:

1, 2 — стопы; 3 — корпус шагающего робота; 4 — грунт

Под шагающим движителем понимается группа (не менее двух) кинематически связанных механизмов шагания (ног), снабженных стопами. Рассматривается случай устойчивого движения робота. В качестве расчетной, принимается двуногая схема с вертикальным поступательным движением корпуса. Влиянием курсового и поперечного движения корпуса на опорные реакции пренебрегалось, что соответствует устойчивой ходьбе с небольшой скоростью.

Вертикальное положение стоп определяется переносным движением корпуса машины и их относительным движением по отношению к корпусу

$$z_i = z - z_i^{(r)}, \quad (1)$$

где  $z_i^{(r)} = z_i^{(r)}(t)$  — закон вертикального перемещения стоп в относительном движении ( $i = 1, 2$ );  $z = z(t)$  — закон вертикального движения центра масс корпуса.

При периодических режимах движения робота движение его корпуса происходит под действием создаваемых движителями периодических кинематических возмущений. Их характер определяется относительной траекторией опорных точек механизмов шагания. Зависимости  $z_i^{(r)}(t)$  для механизмов шагания в интервале  $(0, T)$ , где  $T = 2\pi/\omega$  — период цикла,  $\omega$  — частота шагания, аппроксимирова-

лись тригонометрическим полиномом.

При числе механизмов шагания в движителе равном 2, как правило, наиболее существенны члены 2-й гармоники [4, 5]. Тогда закон относительного движения стоп двуногих движителей, при противофазной работе механизмов шагания, можно представить в виде

$$\begin{aligned} z_1^{(r)} &= z_{01} + z_a^{(r)} \cos(2\omega t + \alpha_1), \\ z_2^{(r)} &= z_{01} + z_a^{(r)} \cos(2\omega t + \alpha_1 + \pi), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $z_a^{(r)}$  — амплитуда относительных перемещений стоп в вертикальном направлении;  $\alpha_1$  и  $z_{01}$  — начальная фаза и начальное положение 1-ой стопы относительно корпуса машины.

На динамику шагающей машины существенное влияние оказывают свойства грунта, которые чрезвычайно разнообразны. На характеристики грунта существенное влияние оказывают его пористость, влажность и ряд других параметров. Для шагающего способа передвижения, путем анализа физико-механических свойств, были разработаны реологические модели основных типов почв сельскохозяйственного назначения. Все типы грунтов были подразделены на упругие, вязкоупругие и вязкие.

На базе реологических моделей реального грунта было проведено моделирование динамики опорной фазы и фазы смены стоп двуногого шагающего робота на различных типах грунта. При математическом описании грунта использовалась вязкоупругопластичная модель с различными соотношениями вязких и упругих свойств. Большинство грунтов под действием движителя разрушаются, поэтому в модели учитывалась необратимость пластических деформаций. Для учета сил сопротивления при взаимодействии стопы с грунтом вводится сила  $F_i$ , пропорциональная деформации грунта и сила вязкого трения  $R_i$ , пропорциональная скорости деформации

$$F_i = \begin{cases} c_z z_i U_i & \text{при } \dot{z}_i \leq 0 \\ k_{Cz} c_z z_i U_i & \text{при } \dot{z}_i > 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$R_i = \begin{cases} \mu_z \dot{z}_i U_i & \text{при } \dot{z}_i \leq 0 \\ 0 & \text{при } \dot{z}_i > 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $c_z$  — нормальная жесткость грунта;  $\mu_z$  — коэффициент вязкого

сопротивления;  $k_{Cz} = z_{i\max} / (z_{i\max} - h)$  — коэффициент, характеризующий увеличение жесткости грунта вследствие его пластической деформации;  $z_{i\max}$  — максимальная деформация грунта;  $h$  — глубина следовой дорожки;  $U_i$  — единичная функция, описывающая состояние  $i$ -той ноги, принимающая лишь два значения: 1 в фазе опоры и 0 при переносе.

Считается, что фаза опоры имеет место, если стопа опирается на грунт:

$$U_i = \begin{cases} 1 & \text{при } N_i > 0 \\ 0 & \text{при } N_i \leq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где нормальные реакции грунта под стопами  $N_i(t)$  складываются из упругих (3) и вязких (4) составляющих.

Уравнение вертикального движения корпуса имеет вид

$$m\ddot{z} = N_1 + N_2 - mg, \quad (6)$$

где  $m$  — масса корпуса робота.

Уравнения (1)–(6) образуют систему, определяющую вертикальное движение корпуса и стоп шагающей машины, а также опорные нормальные реакции грунта.

Дифференциальное уравнение (6), с учетом (1)–(5), решалось численно. При моделировании варьировалась тип и скорость нагружения грунта. Учитывалось, что и при небольших скоростях движения скорость нагружения может быть высокой.

Рассматривались следующие типы грунтов. Упругие грунты — жесткие грунты, для которых характерны малая упругая деформация при нагружении и практически полное отсутствие пластической деформации. Для упругих грунтов также характерна малая величина неупругого сопротивления. Вязкоупруголастичные грунты — связные грунты, для которых характерны небольшие размеры упругих деформаций и значительные пластические деформации. При этом может иметь место как малое, так и значительное неупругое сопротивление. Вязкие грунты — грунты, у которых упругие свойства невысоки.

Были получены законы движения стоп  $z_1(t)$ ,  $z_2(t)$  и центра масс корпуса  $z(t)$ , зависимости  $N(t)$  нормальных реакций грунта, а также зависимости от времени их упругих и вязких составляющих.

Полученные временные характеристики привязывались к фазам шага  $\varphi = \omega t$ .

Моделирование показало, что характер колебаний в системе в зависимости от типа грунта и скорости нагружения меняется.

На рис. 2 а и рис. 3 а, например, представлены цикловые зависимости  $z_1(\varphi)$ ,  $z_2(\varphi)$ ,  $z(\varphi)$  характерные для упругих и вязкоупругих грунтов, соответственно, при  $\omega = 1 \text{ с}^{-1}$  и  $z_a^{(r)} = 0,4 \text{ м}$ . Динамика изменения опорных реакций грунта за цикл для тех же грунтов показан на рис. 2, б и рис. 3, б, где  $N_{cm}$  — статические опорные реакции.

Для упругих грунтов, как видно на рис. 2, имеют место, после смены стоп, их колебания на грунте с небольшими амплитудами, которые сравнительно быстро затухают. Колебания сопровождаются изменением опорных реакций, причем их максимальные значения увеличиваются, в сравнении со статическими более чем в 2 раза. Рост нормальных реакций грунта при этом обусловлен только упругими составляющими.

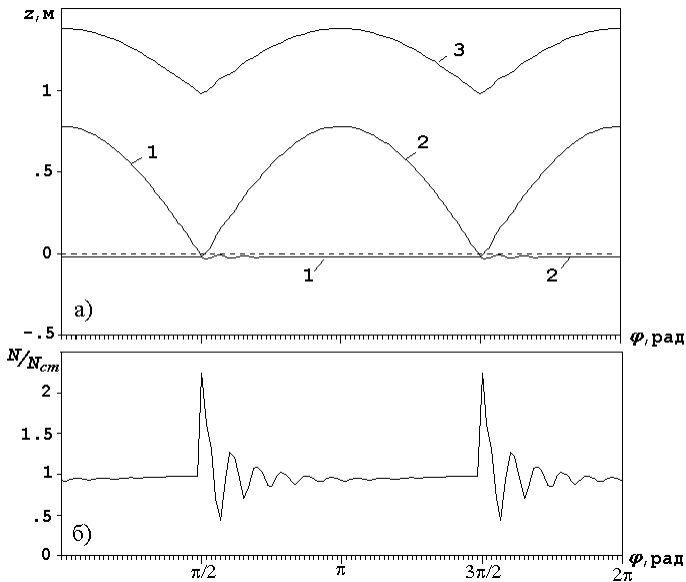


Рис. 3. Цикловые зависимости вертикальных перемещений стоп (кривые 1, 2) и центра масс корпуса (кривая 3) шагающего робота (а) и характер изменения суммарных нормальных реакций грунта за цикл (б) для упругого грунта ( $c_z=500 \text{ кН/м}$ ;  $k_{Cz}=1$ ;  $\mu_z=10 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$ )

Для вязкоупругих грунтов, рис. 3, характер колебаний меняется — имеют место довольно значительные колебания стоп с частотой того же порядка, что и частота шагания. Колебания сопровождаются увеличением максимальных значений опорных реакций, в сравнении со статическими, в 2 раза. Рост нормальных реакции грунта в основном обусловлен упругими составляющими, хотя вязкие составляющие реакций при этом также существенны.

Приведенные в примере значения роста опорных реакций при смене стоп, не являются предельными для шагающих роботов. На грунтах с другими вязкоупругими характеристиками они могут быть выше. При увеличении скорости нагружения, как показало моделирование, максимальные значения опорных реакций также возрастают.

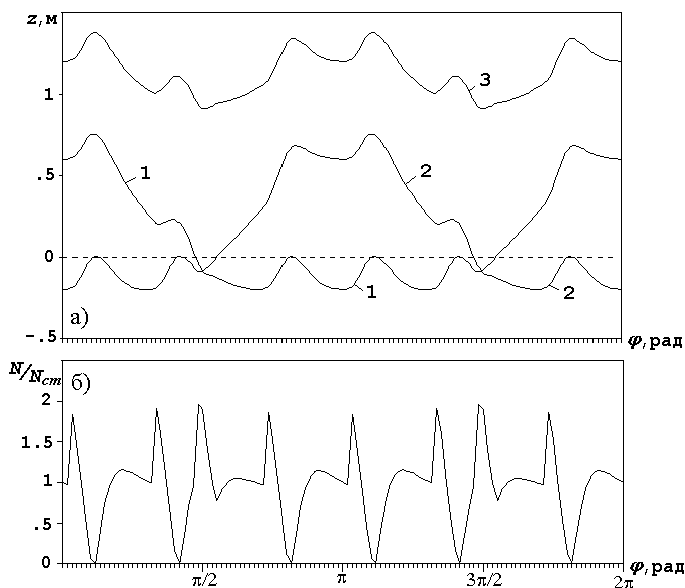


Рис. 5. Цикловые зависимости вертикальных перемещений стоп (кривые 1, 2) и центра масс корпуса (кривая 3) робота (а) и характер изменения суммарных нормальных реакций грунта за цикл (б) для вязкоупругого грунта ( $c_z=50$  кН/м;  $k_{Cz}=2$ ;  $\mu_z=10$  кН·с/м)

### Выводы

Результаты динамического моделирования взаимодействия шагающего движителя с грунтом, моделируемым вязкоупругопластичной средой, показали, что из-за динамичности процесса шагающего способа передвижения, при смене стоп имеет место колебание стоп на грун-

те, причем опорные реакции могут существенно превосходить статические. Эффект имеет место на различных грунтах, хотя характер колебаний в системе в зависимости от типа грунта меняется. По этим причинам при разработке шагающих роботов необходимо учитывать динамику взаимодействия стоп с реальным грунтом. Особенно это важно для двуногих роботов, в частности для роботов антропоморфного типа, для которых проблема обеспечения устойчивости при движении является довольно сложной задачей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-01-97057р-поволжье-а.*

### **Список литературы**

1. Брискин Е.С., Чернышев В.В. Моделирование динамики смены стоп шагающих машин // Искусственный интеллект. — 2009. — № 3. — С. 293-299.

2. Чернышев В.В. Моделирование динамики взаимодействия шагающего движителя с экологически ранимым почвенным покровом // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. — 2012. — № 3. — С. 71-77.

3. Briskin E.S., Zhoga V.V., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Kalinin J.V., Sharonov N.G. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application) // Emerging Trends in Mobile Robotics : proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines / Nagoya Inst. of Technology, Japan. — 2010. — P. 769-776.

4. Чернышев В.В. Пассивное поддрессирование в мобильных робототехнических системах с цикловыми механизмами шагания // Известия вузов. Машиностроение. — 2003. — №1. — С. 31-39.

5. Чернышев В.В. Моделирование динамики шагающей машины с цикловыми движителями как системы твёрдых тел с упругодиссипативными связями // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». — 2010. Т. 11. — № 9. — С. 31-35.