

УДК 629.1.033.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ С ЭКОЛОГИЧЕСКИ РАНИМЫМ ПОЧВЕННЫМ ПОКРОВОМ¹

*Чернышев В. В.*²

DYNAMICS MODELING OF THE WALKING PROPELLER INTERACTION WITH AN ECOLOGICALLY RAW SOIL COVER

Chernyshev V. V.

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 when introducing new soil conservation technologies in irrigated agriculture.

Keywords: soil conservation technologies, walking propeller, interaction with the soil, dynamic modeling.

Введение

Одной из наиболее острых проблем земледелия продолжает оставаться деградация почвенного покрова. Одной из причин процессов эрозии и уплотнения почвы, приводящей к ее деградации, является широкое использование колесных машин. Наиболее остро эта проблема стоит в орошаемом земледелии. Колесо в условиях переувлажненного грунта не обладает достаточной проходимостью, разрушает верхний почвенный слой и оставляет колею значительного размера. Это приводит к уменьшению коэффициента полезного использования почвы, а также к потерям воды, которая либо скапливается в колее, либо уходит с поля по этим своеобразным каналам, вызывая водную эрозию почвы. С точки зрения энергозатрат колесный тип передвижения также не является ресурсосберегающим. При поливе колеса дождевальной машины не могут выбраться из колеи, заполненной водой и грязью. В результате движение происходит в наиболее тяжелых, с точки зрения энергозатрат, условиях.

Шагающие движители, благодаря дискретному и близкому к статическому взаимодействию стопы с опорной поверхностью, в меньшей мере разрушают почву и облада-

ют более высокими возможностями по проходимости [1, 2]. Также имеет место снижение энергозатрат на сопротивление движению — для шагающих движителей, в отличие от колесных и гусеничных, грунт не является препятствием для передвижения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование [3]. По этим причинам представляется привлекательным применение шагающих машин при внедрении новых почвосберегающих технологий в земледелии.

В Волгоградском государственном техническом университете разработаны несколько шагающих машин, предназначенных для работы на слабых и экологически ранимых грунтах, в частности, шагающие опоры [4] для многосекционной дождевальной машины «Кубань» (рис. 1).

Шагающие машины базируются, в основном, на простейших шагающих движителях с одной управляемой степенью свободы. Движитель состоит из двух механизмов шагания циклового типа, кинематически жестко связанных и работающих в противофазе. В каждый момент времени хотя бы один из механизмов шагания находится в контакте с грунтом, таким образом, коэффициент режима такого движителя равен 1. Использование цикловых движителей позволяет не забо-

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (11-08-97061).

²Чернышев Вадим Викторович, д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической механики Волгоградского государственного технического университета; e-mail: dtm@vstu.ru.



Рис. 1. Опытный образец шагающей опоры дождевальная машины

тяться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость управляемой системы адаптации. В результате машины имеют минимальное число управляемых степеней свободы и становятся существенно проще и на порядок дешевле зарубежных аналогов с адаптивным управлением [5]. Высокая проходимость, простота конструкции и надежность делают возможным создание и широкую эксплуатацию шагающих машин с цикловыми движителями уже в настоящее время.

Опытные образцы шагающих опор были испытаны в условиях реальной эксплуатации в составе 13-секционной дождевальной машины «Кубань» кругового действия. Полевые испытания показали, что в условиях слабого грунта шагающий движитель по показателям грунтовой и профильной проходимости намного превосходит колесный [6]. Было выяснено, что значения среднего давления на грунт, рекомендованные для колесных машин повышенной проходимости (0,015–0,02 МПа), могут быть для шагающих машин увеличены. Достаточно высокая грунтовая проходимость шагающих опор в условиях переувлажненной почвы имела место уже при давлении на грунт 0,04 МПа. По показателям экологичности шагающий движитель также существенно превосходит колесный. Глубина следовой дорожки шагающих опор при испытаниях составляла всего

5–20 % от глубины колеи колесных движителей, причем на следовой дорожке продолжала расти поливаемая культура. Вместе с тем глубина колеи оказалась больше ожидаемой, определенной из условия статического взаимодействия стопы с грунтом.

В работе моделируется механизм взаимодействия шагающего движителя с грунтом с учетом динамичности процесса.

1. Расчетная динамическая модель

Основная сложность теоретического анализа динамики взаимодействия 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. Более того, в отличие от традиционных колесных и гусеничных транспортных средств, нет возможности рассматривать динамику взаимодействия шагающего 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 малоприменимы.

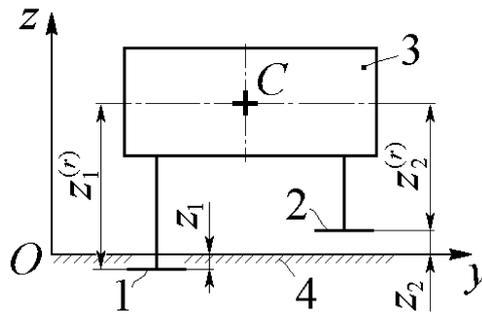


Рис. 2. Расчетная схема шагающей машины: 1, 2 — стопы; 3 — корпус шагающей машины; 4 — грунт

годны и сложность теоретического определения напряженного состояния и деформации грунта существенно возрастает.

При моделировании шагающая машина рассматривается в виде системы тел — корпуса и побортно объединенных невесомых шагающих движителей. Под шагающими движителями понимается группа (не менее двух) кинематически связанных механизмов шагания (ног), снабженных стопами. Рассматривается случай статически устойчивых машин. В качестве расчетной, принимается 2-х ногая схема с вертикальным поступательным движением корпуса (рис. 2). Влиянием курсового движения на динамику изменения опорных реакций пренебрегалось, что соответствует ходьбе с небольшой скоростью.

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

$$z_i = z - z_i^{(r)}, \quad (1.1)$$

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

Движение корпуса машины происходит под действием создаваемых движителями кинематических возмущений. Их характер определяется относительной траекторией опорных точек механизмов шагания. При моделировании рассматривались режимы с периодическим движением ног. Зависимости $z_i^{(r)}(t)$ для цикловых механизмов шагания в интервале $(0, T)$, где $T = 2\pi/\omega$ — период цикла, ω — угловая скорость ведущего звена (частота шагания), аппроксимировались тригонометрическим полиномом.

При числе механизмов шагания в движителе, равном 2, как правило, наиболее суще-

ственны члены 2-й гармоники [7]. Тогда закон относительного движения стоп 2-х ног движителей при противофазной работе механизмов шагания можно представить в виде

$$\begin{aligned} z_1^{(r)} &= z_{01} + z_a^{(r)} \cos(2\omega t + \alpha_1), \\ z_2^{(r)} &= z_{01} + z_a^{(r)} \cos(2\omega t + \alpha_1 + \pi), \end{aligned} \quad (1.2)$$

где $z_a^{(r)}$ — амплитуда относительных перемещений стоп в вертикальном направлении; α_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 разработаны реологические модели основных типов почв сельскохозяйственного назначения. Все типы почвогрунтов подразделялись на упругие, вязкоупругие и вязкие.

На базе реологических моделей проведено моделирование динамики опорной фазы и фазы смены стоп шагающих машин для различных типов почвогрунтов. При математическом описании грунтов используется 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

$$F_i = \begin{cases} c_z z_i U_i & \text{при } \dot{z}_i \leq 0, \\ k_{Cz} c_z z_i U_i & \text{при } \dot{z}_i > 0, \end{cases} \quad (1.3)$$

$$R_i = \begin{cases} \mu_z \dot{z}_i U_i & \text{при } \dot{z}_i \leq 0, \\ 0 & \text{при } \dot{z}_i > 0, \end{cases} \quad (1.4)$$

где c_z — нормальная жесткость грунта; μ_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

$$U_i = \begin{cases} 1 & \text{при } N_i > 0, \\ 0 & \text{при } N_i \leq 0, \end{cases} \quad (1.5)$$

где нормальные реакции грунта под стопами $N_i(t)$ складываются из упругих (1.3) и вязких (1.4) составляющих.

Уравнение поступательного движения корпуса вдоль оси Oz имеет вид

$$m\ddot{z} = N - mg, \quad (1.6)$$

где m — масса корпуса шагающей машины; $N = N_1 + N_2$ — суммарная нормальная реакция грунта под стопами.

Уравнения (1.1)–(1.6) образуют систему, определяющую вертикальное движение корпуса и стоп шагающей машины, а также опорные нормальные реакции грунта.

2. Результаты моделирования

Дифференциальное уравнение (1.6), с учетом (1.1)–(1.5), решалось численно. При моделировании варьировалась тип и скорость нагружения грунта. Учитывалось, что и при небольших скоростях движения скорость нагружения может быть высокой. Дело в том, что при смене ног, когда обе стопы находятся на грунте, из-за неравномерности движения их опорных точек по траектории, горизонтальные составляющие относительных скоростей стоп различаются. В результате под одной из стоп может иметь место локальное разрушение (срыв) грунта с потерей тягово-цепных свойств [8]. По этой причине в шагающих движителях циклового типа при синтезе траектории опорных точек стремятся обеспечить мгновенность смены стоп.

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. К ним можно отнести большинство почвогрунтов, представляющих из себя смесь песка, глины и перегноя с небольшим добавлением других веществ. Вязкие грунты — грунты, у которых упругие свойства невысоки. К ним можно отнести жидкую грязь и практически все типы органических грунтов в переувлажненном состоянии. Для поливного земледелия наибольший интерес представляют 2 последних типа грунта.

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 представлялись в функции от угла поворота ведущего звена движителя $\varphi = \omega t$, что позволяло привязать опорные реакции к фазам шага.

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

На рис. 3а, 4а и 5а представлены цикловые зависимости $z_1(\varphi)$, $z_2(\varphi)$, $z(\varphi)$ характерные для упругих, вязкоупругих и вязких грунтов, соответственно, при $\omega = 1 \text{ с}^{-1}$, $z_{01} = 1$ и $z_a^{(r)} = 0,4$ м. Характер изменения суммарных опорных реакций грунта за цикл для тех же грунтов показан на рис. 3б, 4б и 5б, где N_{cm} — статические опорные реакции.

Для упругих грунтов, как видно на рис. 3, 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.

Для вязкоупругих грунтов, рис. 4, характер колебаний меняется — имеют место довольно значительные колебания стоп с частотой того же порядка, что и частота шага. Колебания сопровождаются увеличением максимальных значений опорных реакций, в сравнении со статическими, в 2 раза.

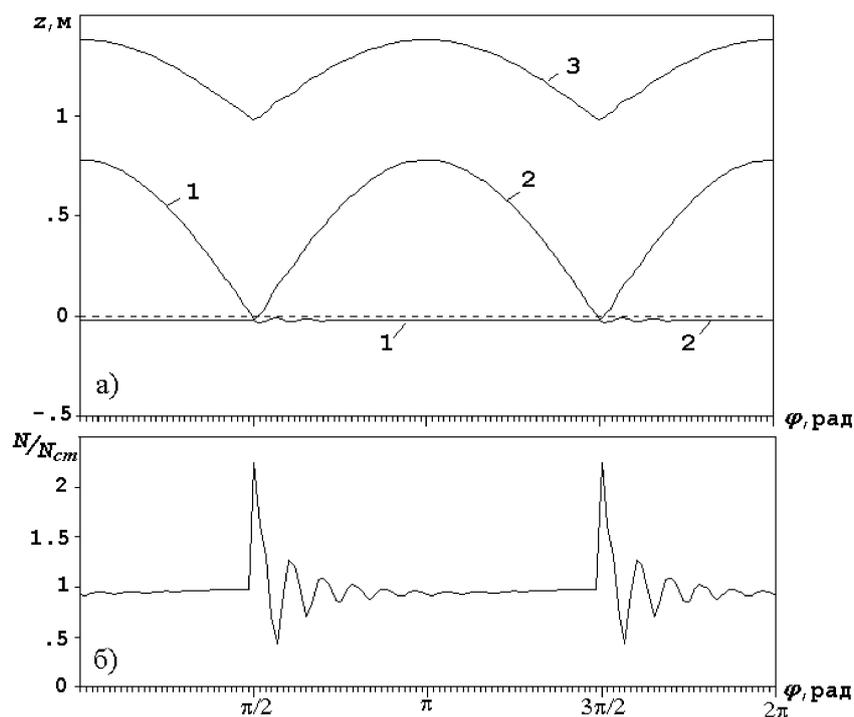


Рис. 3. Цикловые зависимости вертикальных перемещений стоп (кривые 1, 2) и центра масс корпуса (кривая 3) шагающей машины (а) и характер изменения суммарных нормальных реакций грунта за цикл (б) для упругого грунта ($c_z=500$ кН/м; $k_{Cz}=1$; $\mu_z=10$ кН·с/м)

Рост нормальных реакции грунта в основном обусловлен упругими составляющими, хотя вязкие составляющие реакций при этом также существенны. Для наглядности на рис. 4 представлен вязкоупругий грунт с довольно слабой несущей способностью.

Для вязких грунтов, рис. 5, имеет место постепенное, в течение полупериода (шага), погружение стоп в грунт. Существенное увеличение опорных реакций, более чем в 2 раза по сравнению со статическими, имеет место только в момент смены стоп. В этом случае наиболее существенны вязкие составляющие реакций грунта.

Для большинства реальных почвогрунтов в переувлажненном состоянии будет наблюдаться промежуточный вариант между вторым и третьим рассмотренным случаем.

Приведенные значения роста опорных реакций при смене стоп, не являются предельными для шагающих машин. На грунтах с другими вязкоупругими характеристиками они могут быть выше. При увеличении скорости нагружения, как показали результаты моделирования, максимальные значения опорных реакций также возрастают.

Заключение

Результаты динамического моделирования взаимодействия шагающего движителя с грунтом, моделируемым вязкоупругопластичной средой, показали что, из-за динамичности процесса, опорные реакции могут существенно, в несколько раз, превосходить статические. Причем эффект имеет место на различных грунтах, хотя характер колебаний в системе в зависимости от типа грунта существенно меняется. Указанная особенность шагающего способа передвижения с одной стороны позволяет реализовать, в определенные моменты цикла, повышенные тяговые усилия и является одной из причин высокой грунтовой проходимости шагающих машин, а с другой стороны может оказывать негативное воздействие на экологически ранимый почвогрунт. По этой причине динамике взаимодействия стоп с грунтом необходимо учитывать при разработке шагающих машин для новых почвосберегающих технологий в земледелии.

Литература

1. Брискин Е.С., Жога В.В., Чернышев В.В., Малолетов А.В. Основы расчета и проекти-

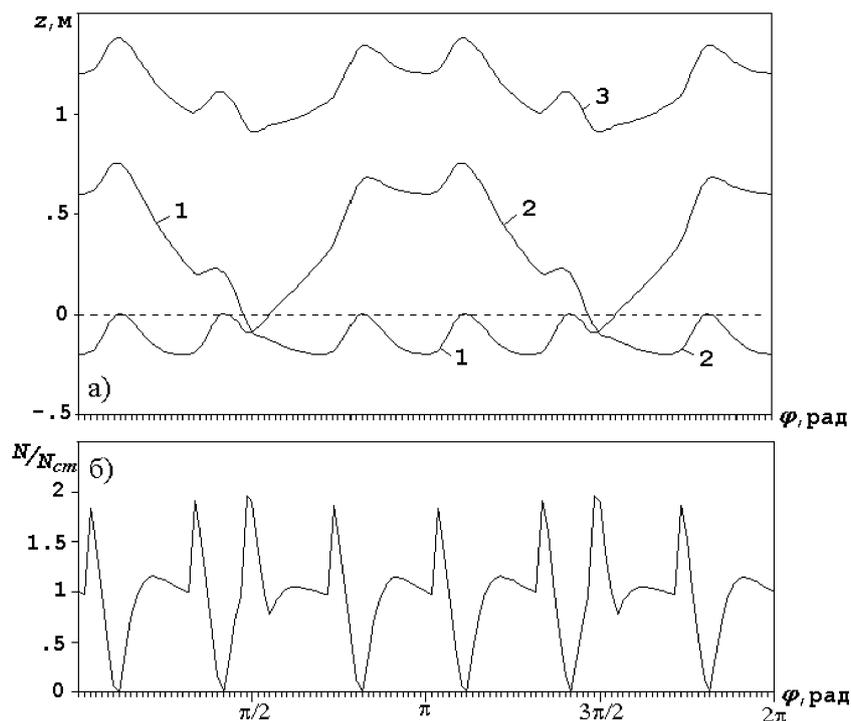


Рис. 4. Цикловые зависимости вертикальных перемещений стоп (кривые 1, 2) и центра масс корпуса (кривая 3) шагающей машины (а) и характер изменения суммарных нормальных реакций грунта за цикл (б) для вязкоупругого грунта ($c_z=50$ кН/м; $k_{Cz}=2$; $\mu_z=10$ кН·с/м)

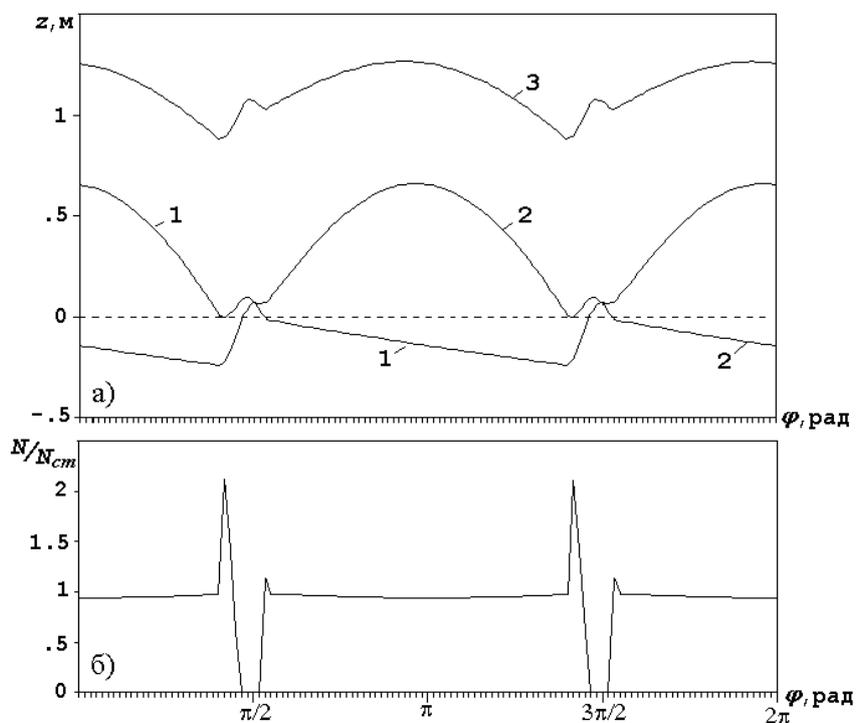


Рис. 5. Цикловые зависимости вертикальных перемещений стоп (кривые 1, 2) и центра масс корпуса (кривая 3) шагающей машины (а) и характер изменения суммарных нормальных реакций грунта за цикл (б) для вязкого грунта ($c_z=10$ кН/м; $k_{Cz}=10$; $\mu_z=100$ кН·с/м)

- рования шагающих машин с цикловыми движителями. М: Машиностроение, 2006. 164 с.
2. *Briskin E.S., Zhoga V.V., Chernyshev V.V. et al* 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, Nagoya, Japan, 2010. P. 769-776.
 3. *Чернышев В.В.* Сравнительная оценка энергоэффективности движения колёсных и шагающих роботов // Матер 4-й Всеросс. конф. по проблемам управления МКПУ-2011. М.; Таганрог, 2011. Т. 2. С. 271–274.
 4. *Брискин Е.С., Русаковский А.Е., Чернышев В.В. и др.* Пат. 2108708 РФ, МПК 6 А 01 G 25/09, В 62 D 57/02 Самоходная тележка многоопорной дождевальная машины.
 5. *Чернышев В.В.* Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти // Безопасность жизнедеятельности. 2003. №5. С. 28–30.
 6. *Брискин Е.С., Чернышев В.В., Жога В.В., Малолетов А.В.* Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины. Тракторы и сельхозмашины. 2011. №9. С. 27–31.
 7. *Чернышев В.В.* Пассивное поддрессирование в мобильных робототехнических системах с цикловыми механизмами шагания // Известия вузов. Машиностроение. 2003. №1. С. 31–39.
 8. *Брискин Е.С., Чернышев В.В., Фролова Н.Е.* О позиционной зависимости тягово-сцепных свойств шагающих машин с цикловыми движителями // Тракторы и сельхозмашины. 2009. №6. С. 21–25.

Ключевые слова: почвосберегающие технологии, шагающий движитель, взаимодействие с грунтом, динамическое моделирование.

Статья поступила 18 января 2012 г.

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

© Чернышев В. В., 2012