



**ШАНЫГИН**  
Сергей Витальевич  
кандидат технических  
наук, доцент  
кафедры  
«Теории механизмов  
и машин»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

## Разработка механической модели двуногого шагающего робота

**С.В. Шаныгин**

*Рассмотрена механическая модель двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног для разработки модели или изучения колебаний.*

**Ключевые слова:** двуногий шагающий робот, опорно-двигательный аппарат, механическая модель, колебания.

*The article offers a mechanical model of the biped walking robot with forward kinematic steams in joints of feet to study fluctuations.*

**Keywords:** biped walking robot, musculoskeletal system, mechanical model, fluctuations.

**В** настоящее время от людей все больше требуется выполнения самых разнообразных работ в тяжелых, опасных, а подчас и несовместимых с жизнью условиях. Для этого постоянно разрабатываются новые средства робототехники. В качестве одного из таких средств может использоваться двуногий шагающий робот (ДШР).

Любой ДШР состоит из двух крупных мехатронных узлов — опорно-двигательного аппарата (ОДА) и корпуса с руками [1]. ОДА представляет собой две ноги, каждая из которых состоит из голени и бедра, в качестве корпуса ОДА используется тазобедренный сустав. О поверхность передвижения ОДА опирается стопой, которая имеет либо жесткое соединение с голенью, либо соединяется с голенью вращательной парой.

В настоящее время существует две группы ДШР — с вращательными кинематическими парами в суставах ног и с поступательными кинематическими парами в суставах ног (рис. 1).

Корпус с руками может выполнять две функции — совершать какую-либо полезную работу и обеспечивать равновесие ДШР при ходьбе. Поскольку ДШР имитирует механическую деятельность человека, то при исследовании и проектировании подобных роботов нельзя абстрагироваться от биомеханики человека, которая исследует движение человека под влиянием различных воздействий [5].

Биомеханика применительно к живым организмам использует основные принципы. Исследование биомеханики человека показывает, что под влиянием различных воздействий человек при движении может находиться в неустойчивом состоянии, которое выражается в колебаниях корпуса [4]. Равновесие человека при его движении по поверхности передвижения поддерживается вестибулярным аппаратом.

У ДШР роль вестибулярного аппарата выполняет система управления, которая обеспечивает поворот рук ДШР таким образом, чтобы удерживать корпус робота, а вместе с ним и ОДА, в равновесии. Характер движения рук ДШР зависит от возможных колебаний, которые возникают при его движении.

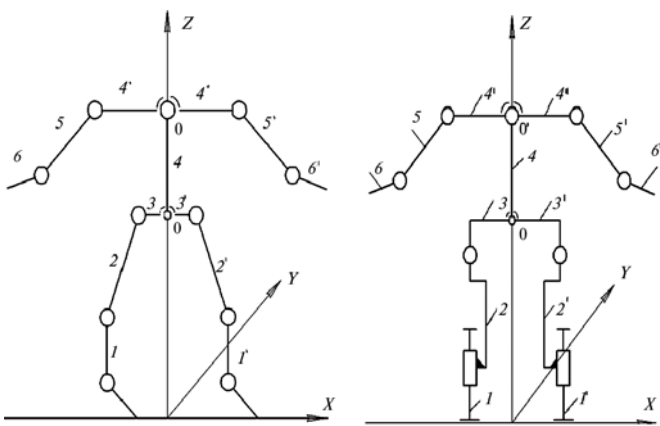


Рис. 1. Схемы ДШР:

*a* — с вращательными кинематическими парами в суставах ног; *б* — с поступательными кинематическими парами в суставах ног

При движении ДШР наблюдаются поперечные колебания корпуса относительно оси, перпендикулярной к сагиттальной плоскости (оси *Y*) и продольные колебания относительно оси *X* (см. рис. 1).

При поперечных колебаниях робот наклоняется в бок — влево или вправо, а при продольных колебаниях — вперед или назад. В зависимости от характера колебаний корпуса, которые предполагается гасить (уравновесивать) движением рук, выбираются направления осей вращения рук (рис. 2).

Вращение руки ДШР вокруг оси *X* гасит продольные колебания, а вращение руки вокруг оси *Y* — поперечные колебания. Для изучения природы колебаний робота составляется механическая модель ДШР.

Механическая модель ДШР зависит от ОДА кинематической схемы. Для стоящего ДШР, у

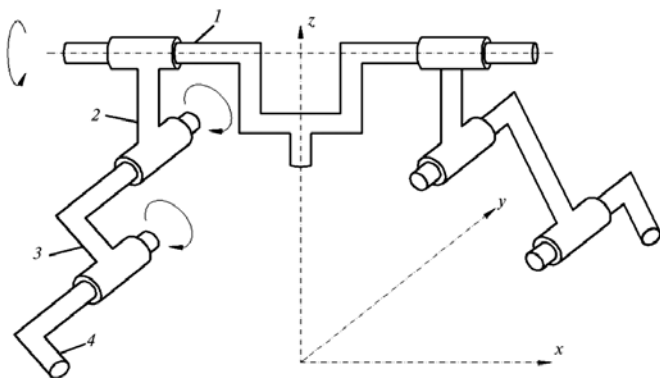


Рис. 2. Пример расположения осей вращательных кинематических пар руки

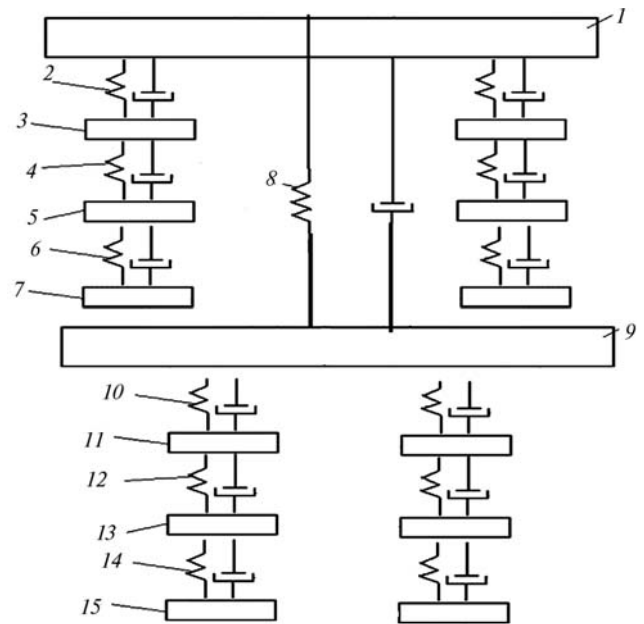


Рис. 3. Механическая модель стоящего ДШР с вращательными кинематическими парами в суставах ног:

1 — ключица; 2 — плечевой сустав; 3 — плечо; 4 — локтевой сустав; 5 — предплечье; 6 — кистевой сустав; 7 — кисть; 8 — позвоночный столб; 9 — таз; 10 — бедренный сустав; 11 — бедро; 12 — коленный сустав; 13 — голень; 14 — голеностопный сустав; 15 — стопа

которого ОДА имеет вращательные кинематические пары пятого класса в суставах ног (см. рис. 1), механическая модель имеет вид, показанный на рис. 3.

Механическая модель стоящего ДШР, у которого суставы ног ОДА имеют поступательные кинематические пары представлена на рис. 4.

Приложенные к механической модели внешние силы вызывают механические напряжения, колебания и деформации [2]. Динамические свойства шагающей системы зависят не только от ее строения, но и от конфигурации робота, а также от внешних воздействий.

При описании процесса распространения колебаний по скелету ДШР с помощью механической модели с сосредоточенными массами число этих масс ограничивают в зависимости от поставленной задачи [3].

При движении ДШР при вертикальных колебаниях возникают угловые и горизонтальные колебания. Для изучения процессов движения, вызывающих колебания, составляют дифференциальные уравнения.

Для описания динамики движения рук ДШР при воздействии на них каких-либо вертикаль-

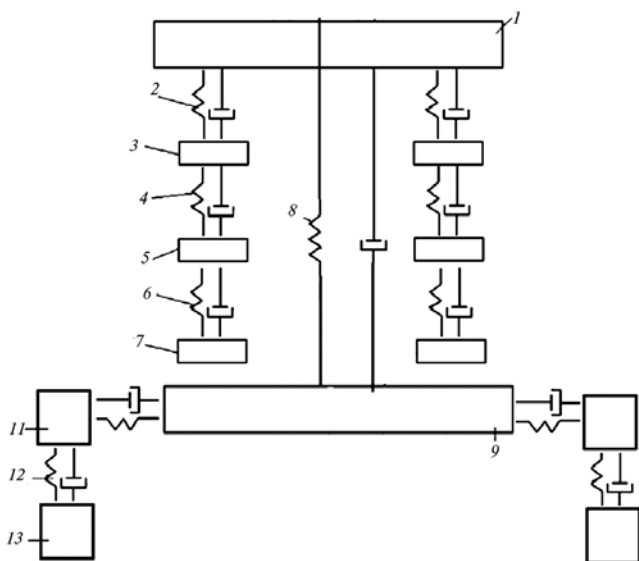


Рис. 4. Механическая модель стоящего ДШР с поступательными кинематическими парами в суставах ног:

- 1 — ключица; 2 — плечевой сустав; 3 — плечо;
- 4 — локтевой сустав; 5 — предплечье; 6 — кистевой сустав; 7 — кисть; 8 — позвоночный столб; 9 — таз;
- 10 — тазобедренный сустав; 11 — бедро;
- 12 — коленный сустав; 13 — голень со стопой

ных сил без учета сил его перемещения, используют дифференциальное уравнение следующего вида:

$$(m_3 + m_5 + m_7)\ddot{q}_3 r + (m_5 + m_7)\ddot{q}_5 r + m_7\ddot{q}_7 r + k_2(\dot{q}_3 - \dot{q}_5 - \dot{q}_7) + k_4(\dot{q}_5 - \dot{q}_7) + k_6\dot{q}_7 + c_2(q_3 - q_5 - q_7) + c_4(q_5 - q_7) + c_6q_7 = 0,$$

где  $k_i$  — коэффициент демпфирования;  $c_i$  — жесткость пружины;  $q_i$  — обобщенные координаты плеча, предплечья руки.

Возмущения возбуждались кратковременно при ударе по руке каким-либо предметом руки. Руки ДШР совершают свободные колебания подобно системе с одной степенью свободы. Колебания описываются классическим дифференциальным уравнением:

$$\ddot{z} + 2n\dot{z} + p^2z = 0.$$

Здесь  $n$  — коэффициент затухания;  $p$  — частота собственных колебаний;  $z$  — вертикальное перемещение колебательной массы.

Решение этого уравнение давно известно. Если рассматривается движение ДШР с поступательными кинематическими парами в суставах ног, то при разработке механической модели необходимо учитывать, что движение происходит

в двух взаимно перпендикулярных плоскостях — голень со стопой перемещаются вдоль вертикальной оси  $X$ , а все остальные части ДШР вместе с бедром перемещаются вдоль оси  $Y$ , перпендикулярной плоскости чертежа (см. рис. 1, б). Это взаимно перпендикулярное направление движения отражено в механической модели, изображенной на рис. 4. При перемещении этого робота дифференциальное уравнение имеет следующий вид:

$$2(m_3 + m_5 + m_7)\ddot{q}_3 + 2(m_3 + m_5 + m_7)\dot{q}_{11} + 2(m_5 + m_7)\ddot{q}_5 r + 2(m_5 + m_4)\dot{q}_{11} + 2m_7(\ddot{q}_7 r + \ddot{q}_{11} r_1) + 2m_{13}\ddot{q}_1 + 2k_2(\dot{q}_3 - \dot{q}_5 - \dot{q}_7 - \dot{q}_{11} r_1) + 2k_4(\dot{q}_5 - \dot{q}_7 - \dot{q}_{11} r_1) + 2k_6(\dot{q}_7 - \dot{q}_{11} r_1) + 2k_{10}\dot{q}_{11} r_1 + 2k_{12}\dot{q}_{11} r_1 + 2c_2(q_3 - q_5 - q_7 - q_{11} r_1) + 2c_4(q_5 - q_7 - q_{11} r_1) + 2c_6(q_7 - q_{11} r_1) + 2c_{10}q_{11} r_1 + 2c_{12}q_{11} r_1 = 0.$$

Решение этого уравнения позволит определить изменение обобщенных координат в процессе движения, а, следовательно, и амплитуду колебания корпуса робота.

При составлении дифференциального уравнения для учета возможных колебаний ДШР при ходьбе необходимо учитывать как постоянно действующие возмущения, так и случайные. Таким образом, в дальнейшем, решение приведенных выше уравнений будет усложняться, однако можно будет учитывать все возможные факторы.

#### Литература

1. Голубятников И.В., Фанталов Ю.И. Кинематика опорно-двигательного аппарата двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног // Вестник МГУПИ. 2008. № 3.
2. Голубятников И.В., Фанталов Ю.И. Определение траектории движения общего центра масс опорно-двигательного аппарата двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног // Вестник МГУПИ, 2008.
3. Голубятников И.В., Шаныгин С.В. Синхронизация движения ног и рук двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног // Вестник МГУПИ, 2008.
4. Смольников П.А. Проблемы механики и оптимизации роботов. М.: Наука, 1991.
5. Беркенблй М.Б., Гульфанд И.П., Фельдман А.Г. Двигательные задачи и работа параллельных программ и интеллектуальные процессы и их моделирование. М.: Наука, 1991. С. 37–54.

Статья поступила в редакцию 07.03.2012