

УДК: 681.5

УРАВНОВЕШИВАНИЕ ДВУНОГОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА С ПОСТУПАТЕЛЬНЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМИ В СУСТАВАХ НОГ С ПОМОЩЬЮ ДВИЖЕНИЯ РУК РОБОТА

Голубятников И.В., Шаныгин С.В.
Московский государственный университет
приборостроения и информатики

В статье рассматриваются возможности обеспечения состояния робота при движении по ровной твердой поверхности.

Ключевые слова: робот, опорно-двигательный аппарат, статическое равновесие, синхронизация.

Двуногий шагающий робот (ДШР) с поступательными кинематическими парами в суставах ног состоит из опорно-двигательного аппарата (ОДА) и корпуса с руками (рис. 1а).

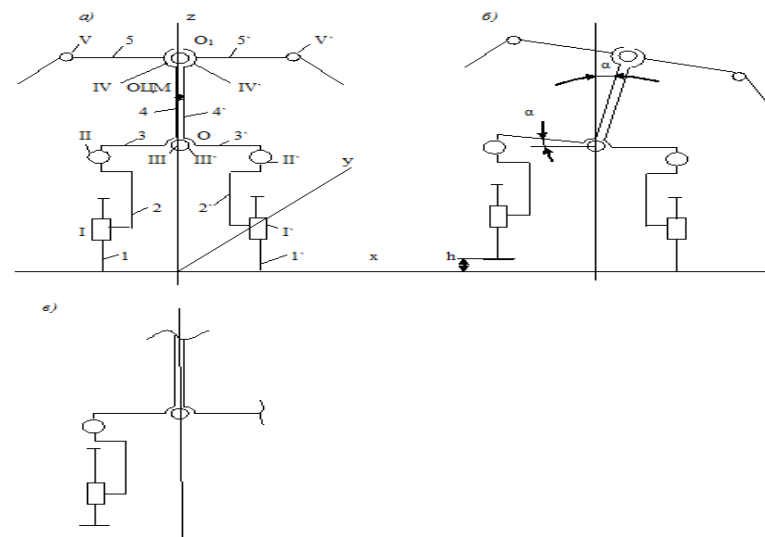


Рис. 1.

ОДА состоит из двух ног (голень 1-1' и бедро 2-2') и таза 3-3', корпус состоит из позвоночного столба 4-4' и рук 5-5'. Голень и бедро, бедро и таз образуют поступательные кинематические пары I-I' и II-II', таз и позвоночный столб, руки и позвоночный столб, руки и позвоночный столб образуют вращательные кинематические пары V-го класса.

Движение ДШР происходит следующим образом: подъем голени на высоту h вдоль оси z , опускание голени, при подъеме и опускании голени бедро с тазом перемещается вдоль оси y (направление движения) на величину шага S' .

При подъеме голени на величину h , таз с корпусом может в зависимости от конструкции кинематической пары голень-бедро (I) либо наклоняться на угол α , либо оставаться в вертикальном положении.

Если конструкция кинематической пары I такова, что голень поднимается вместе с бедром, то таз отклоняется от заданного положения на угол α (рис.1 б), который определяется из выражения $\sin \alpha = \frac{w}{l}$, где l - длина таза. Таким образом, неустойчивое положение робота будет определяться, во-первых, тем, что робот стоит на одной ноге, во-вторых, отклонением корпуса от вертикали на угол α , и, в-третьих, наклоном корпуса при перемещении на шаг в сторону движения. При данной конструкции ноги во время движения робота корпус колеблется относительно осей x и y .

Если конструкция кинематической пары голень-бедро такова, что при подъеме ноги голень вдвигается внутрь бедра (телескопическая конструкция [1]), корпус робота остается в вертикальном положении (рис.1в) и колебания робота будут обусловлены только двумя причинами: неустойчивостью положения, когда робот стоит на одной ноге и наклоном корпуса при перемещении по направлению движения.

В обоих случаях при подъеме-опускании ноги вдоль оси z и перемещении вдоль оси y корпус робота совершает колебания вокруг осей x и y . Эти колебания могут компенсироваться путем вращения рук вокруг осей x и y . Таким образом, рука робота должна образовывать с корпусом две вращательные кинематические пары V-го класса, оси которых направлены вдоль осей x и y (рис.2).

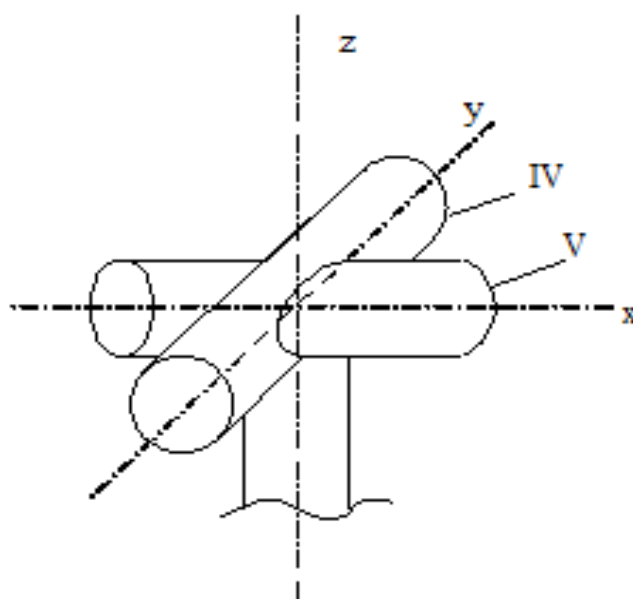


Рис.2.

Амплитуда колебаний рук робота должна быть такой же, как амплитуда колебаний корпуса, но с обратным знаком [2].

Если считать, что каждая рука робота состоит из одного звена 5-5` (рис.1а), то обе руки должны при движении робота выполнять функции шеста эквилибриста. При движении робота вдоль оси y корпус наклоняется вперед относительно точки O на угол β и совершает при этом колебательные движения относительно оси y [3]. При подъеме ноги корпус отклоняется от вертикали на величину α или только совершает колебательные движения относительно оси x за счет неустойчивого состояния робота при опоре на одну ногу [1].

Если не учитывать колебательного процесса робота при его неустойчивом состоянии руки робота должны заставлять отклоняться корпус на углы α_1 и β относительно осей x и y в противоположную сторону с той же скоростью, что и подъем ноги, и перемещение на величину S' .

Угловая скорость вращения рук ω относительно оси y равна угловой скорости ω_k поворота корпуса относительно точки O .

Поскольку корпус робота (позвоночный столб) участвует в двух движениях – поступательное движение вместе с бедром вдоль оси y со скоростью V движения бедра и одновременно вращательное (наклон корпуса) вокруг оси y , то суммарная скорость точки O_1 будет равна $V + \Delta V$, причем надо отметить, что наклон корпуса будет происходить с переменной угловой скоростью ω , так как бедро движется поступательно с переменной скоростью [5]. Угловая скорость наклона равна $\omega = \frac{v}{l_4}$, где V - скорость движения бедра, l_4 - высота позвоночного столба. Дополнительная скорость ΔV каждой точки позвоночного столба равна $\Delta V = \omega l_i$, где l_i - расстояние от точки O (рис.1а) до данной точки. Годограф скоростей всех точек позвоночного столба показан на рис.3.

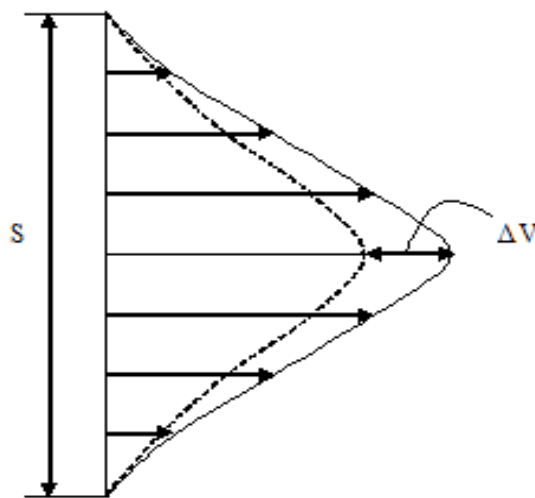


Рис.3.

Угол наклона корпуса $\beta = \frac{S'}{l_4}$, где S' – длина дуги по которой перемещается точка O_1 и равная шагу робота (рис.4).

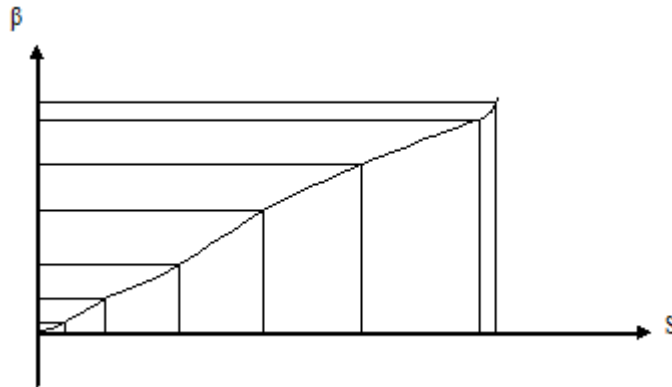


Рис.4.

Переменная скорость ω наклона корпуса (рис.5) приводит к дополнительным колебаниям корпуса, которые будут складываться из собственных и вынужденных колебаний, которые описываются уравнением (1). [6]

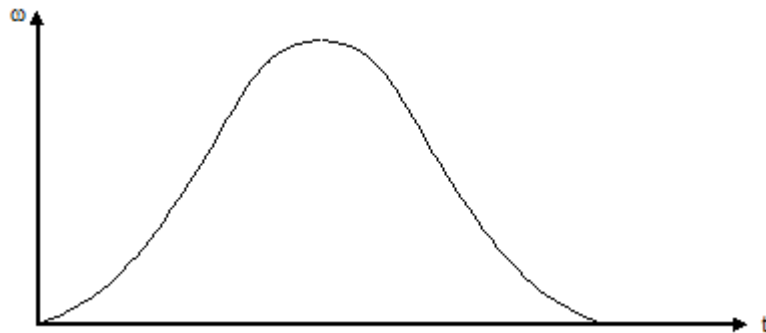


Рис.5.

$$y = y_0 \cos \lambda t + \frac{y_0}{\lambda} \sin \lambda t - \frac{K_1 \omega}{\lambda(\lambda^2 - \omega^2)} \sin \lambda t + \frac{K_1}{\lambda^2 - \omega^2} \sin \omega t, \quad (1)$$

где $y = \frac{\beta}{\beta_c}$, β_c – средняя обобщенная координата, $\beta = \beta(S)$

λ – частота свободных колебаний, $\lambda = \sqrt{\frac{c}{a}}$,

c – коэффициент жесткости;

a – инерционный коэффициент (приведенная масса или приведенный момент инерции) $K_1 = \frac{Q_c}{a\beta_c}$,

Q_c – средняя обобщенная сила, или средний обобщенный момент

ω – угловая частота, $\omega = 2\pi\lambda$

Два первых слагаемых описывают свободное колебание, и если закон движения бедра предусматривает движение без скачков скорости (заданная синергия движения) и при начальных условиях $y_0 = \dot{y}_0 = 0$ эти слагаемые равны нулю.

Третье слагаемое описывает гармонические колебания, происходящие с собственной частотой λ , но с амплитудой, зависящей от частоты вынужденных колебаний.

Четвертое слагаемое описывает вынужденные колебания с частотой ω и амплитудой A , равной

$$A = \frac{K_1}{\lambda^2 - \omega^2}. \quad (2)$$

Инерционный коэффициент, а зависит от ускорения движения бедра и приведенного момента инерции $I_{пр}$.

Если учитывать только колебания верхней части робота (без учета колебаний ОДА, то есть считаем, что позвоночный столб вместе с руками колеблется относительно ОДА ДШР), то приведенный к оси O_1 момент инерции будет равен:

$$I_{пр} = I_4 \left(\frac{\omega_4}{\omega} \right)^2 + I_5 \left(\frac{\omega_5}{\omega} \right)^2 + I_5' \left(\frac{\omega_5'}{\omega} \right)^2 + m_4 \left(\frac{V}{\omega} \right)^2, \quad (3)$$

где I_i – центральный момент инерции соответствующих звеньев относительно осей, проходящих через центры масс звеньев;

m_4 – масса позвоночного столба;

V – скорость бедра.

Поскольку рассматриваем колебания корпуса в одной плоскости, то при определении приведенного момента инерции учитываем центральные моменты инерции. Если же считать, что корпус колеблется относительно осей x , y и z , то в этом случае необходимо учитывать тензор инерции звена Q_i , равный

$$Q_i = \begin{vmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{vmatrix} \quad (4)$$

I_{xy} , I_{xz} , I_{zy} – центробежные моменты инерции.

$$I_{xy} = \sum m_i x_i y_i; \quad I_{xz} = \sum m_i x_i z_i; \quad I_{yz} = \sum m_i y_i z_i$$

Характер изменения скорости V и ускорения a бедра в процессе движения показан на рис.6.

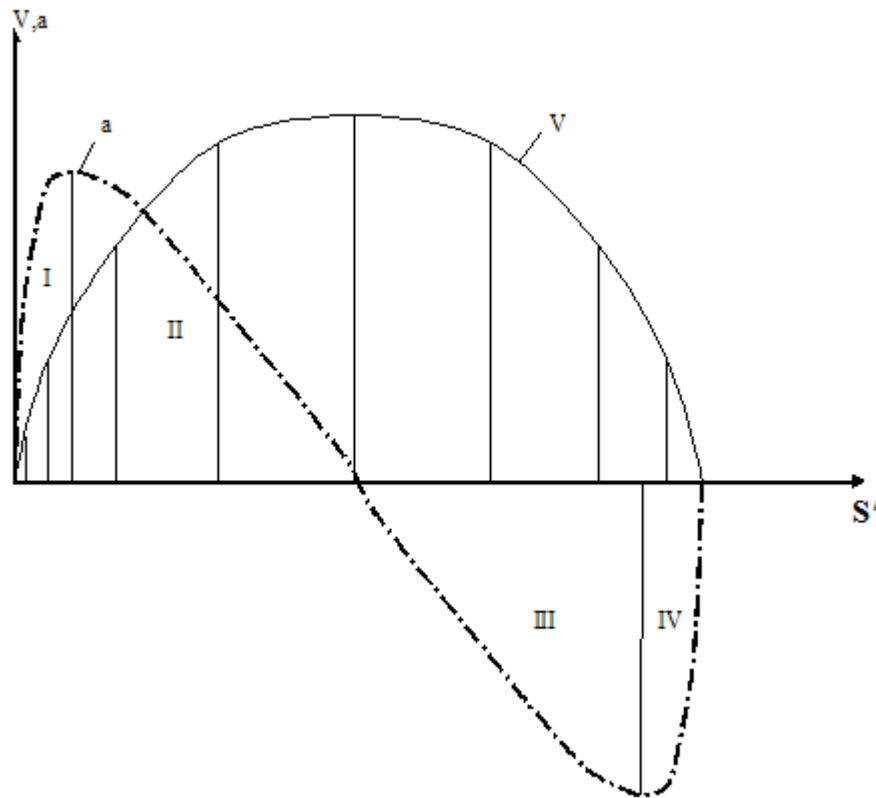


Рис.6.

Амплитуда колебания корпуса будет окончательно равна:

$$A = \frac{Q_c}{\left[I_4 + I_5 (U_{54})^2 + I_5' (U_{5'4})^2 + m_4 \frac{l_4^2}{4} \right] (\lambda^2 - \omega^2) \beta_0}, \quad (5)$$

где $U_{54}, U_{5'4}$ – передаточные функции.

Если учитывать ускорения, с которыми перемещается бедро, то все движение можно разбить на четыре участка:

- участок движения I, где ускорение увеличивается;
- участок движения II, где ускорение уменьшается;
- участок движения III, где ускорение меняет знак и увеличивается;
- участок движения, где ускорение со знаком «минус» уменьшается.

Для каждого участка амплитуда колебаний корпуса может быть определена следующим образом, при синусоидальном изменении ускорения [5]:

$$A_1 = -A_3 = A_{ст} \left[\frac{4t_i(T-t_i)}{0,5T^2} + \frac{8}{\lambda^2(0,5T)^2} (1 + \cos \lambda t) - \frac{4}{\lambda^2 t_i^2} \sin \lambda t \right] \quad (6)$$

$$A_2 = -A_4 = A_{ст} \left[1 - \frac{T_1 - t_i}{(0,5T_1)^2} - \frac{8}{\lambda^2(0,5T_1)^2} (1 + \cos \lambda t) + \frac{4}{\lambda^2 t_i^2} \sin \lambda t \right], \quad (7)$$

где t_1 – соответственно равно t_1, t_2, t_3 и t_4 ;

T – период движения;

$A_{ст}$ – амплитуда при статическом приложении инерционных сил.

$$A_{ст} = \Delta_i + \Delta_{ик}$$

Δ_i – перемещение корпуса от деформаций под действием инерционных сил на корпус.

$$\Delta i_k = \Delta \beta \cdot l_4$$

Кривые изменения приведенного момента инерции в процессе движения ДШР и совмещенные кривые изменения ускорения позвоночного столба (4) и амплитуды колебаний корпуса показаны на рис.7 и рис.8.

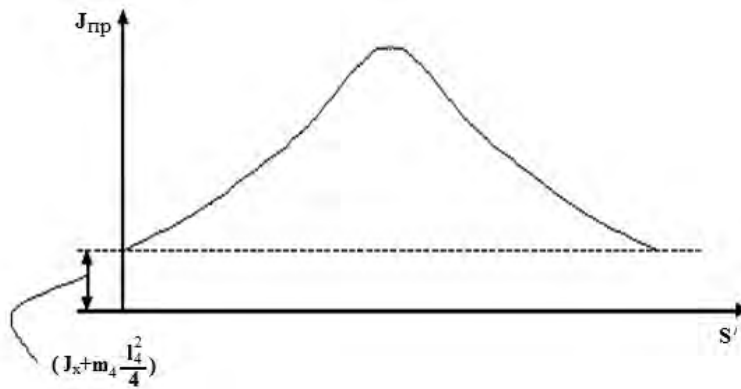


Рис.7.

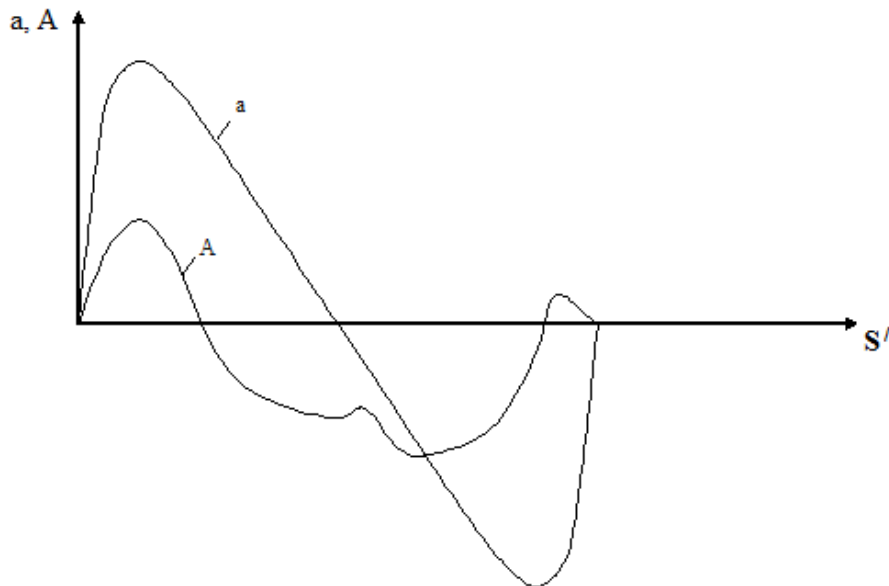


Рис.8.

Угловые скорости ω_5 и ω_5' поворота рук вокруг оси O_1 (рис.1а) (относительно оси y) определяются из условия обеспечения устойчивого состояния ДШР в процессе движения. Управляющее воздействие Q_c , обеспечи-

вающее управление приводами рук ДШР должно быть таким, чтобы, во-первых, амплитуда колебаний корпуса была бы минимизирована, и, во-вторых, амплитуда должна к концу шага затухать.

Определяем из уравнений (6) и (7) амплитуды колебаний для всех участков движения ДШР, после этого из уравнения (5) определяем управляющее воздействие на каждом интервале движения

$$Q_c = A_i \left[I_4 + m_4 \frac{i_4^2}{4} + I_5 (U_{54})^2 + I_5 (U_{5'4})^2 \right] (\lambda^2 - \omega^2) \beta_0 \quad (8)$$

Минимизировать амплитуду колебаний корпуса при одном и том же управляющем воздействии можно путем увеличения передаточных функций, то есть можно регулировать колебательный процесс изменением скоростей вращения рук.

Более сложно будет решаться задача с учетом колебаний ОДА при подъеме ноги.

Литература

1. Голубятников И.В., Фанталов Ю.И. *Определение траекторий движения общего центра масс опорно-двигательного аппарата двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими параметрами в суставах ног*. М.: Вестник МГУПИ серия «Технические и естественные науки», 2008.
2. Голубятников И.В., Шаныгин С.В. *Синхронизация движения ног и рук двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими параметрами в суставах ног*. М.: Вестник МГУПИ серия «Технические и естественные науки», 2008 N13.
3. Голубятников И.В., Фанталов Ю.И., Шаныгин С.В. *Колебательные процессы, возникающие при движении двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими параметрами в суставах ног*// М.: Вестник МГУПИ серия «Технические и естественные науки», 2008.
4. Голубятников И.В., Шаныгин С.В. *Связь кинематических параметров рук и ног двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими параметрами в суставах ног*.
5. Голубятников И.В., Фанталов Ю.И. *Кинематика опорно-двигательного аппарата двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими параметрами в суставах ног* // М.: Вестник МГУПИ серия «Технические и естественные науки», 2008.
6. Левицкий Н.И. *Колебания в механизмах*. М.: Наука, 1988.

BALANCING OF A WALKING BIPED ROBOT WITH FORWARD KINEMATIC PAIRS IN THE JOINTS OF LEGS WITH ROBOT'S HANDS MOVEMENT HELP.

*I. Golubyatnikov, S. Shanygin.
The Moscow state university
Instrument making and computer science*

The article describes possibilities of keeping the robot stable at its movements across a firm surface.

Keywords: Robot, Musculoskeletal, static balance, synchronization.