

УДК 681.5

## Формирование упрощенной траектории движения двуногого шагающего робота

**А.К. Ковальчук, Д.Б. Кулаков, С.Е. Семенов**

*Предлагается методика формирования траектории движения исполнительного механизма двуногого шагающего робота в режиме динамической ходьбы. Траектория формируется в виде периодических циклов движения, описываемых кусочными гармоническими функциями с малым числом изменяемых параметров.*

**Ключевые слова:** двуногий шагающий робот, траектория движения, гармонические функции, синтез управления движением.

*The article presents a method of forming a motion path of an actuator of a bipedal walking robot in the dynamic walking mode. The path is formed as periodic cycles of motion, described by piecewise harmonic functions with a small number of variable parameters.*

**Keywords:** bipedal walking robot, motion path, harmonic functions, motion control synthesis.

Для проведения научно-исследовательских работ, направленных на изучение динамики двуногих шагающих роботов (ДШР), в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика» (Э10) совместно с Межотраслевым институтом повышения квалификации (при участии авторов) создан лабораторный исследовательский стенд ДШР [1]. Исполнительный механизм робота (рис. 1) состоит из корпуса и двух ног, имеет 12 степеней подвижности, оснащенных электрогидравлическими следящими приводами (ЭГСП). Высота исполнительного механизма ДШР составляет 2,2 м, вес 220 кг.

Применение ЭГСП обусловлено их преимуществами, по сравнению с другими типами приводов, по удельной мощности и динамическим характеристикам, что является особенно важным при создании ДШР больших размеров и масс. В корпусе ДШР размещены насосная станция, аппаратура системы управления, аппаратура системы ориентации. В стопы ног встроены силомоментные датчики. Снизу на стопах для увеличения податливости закреплены резиновые накладки. Энергопитание осуществляется по кабелю от внешнего источника трехфазного напряжения (200 В, 400 Гц). Программное обеспечение системы управления выполняется на трех совместно работающих ЭВМ, объединенных в локальную сеть Ethernet.

Задача синтеза динамически устойчивого движения ДШР чрезвычайно сложна. Насколько можно судить, к настоящему времени в общем виде она не решена. Однако управление динамической ходьбой



**КОВАЛЬЧУК**  
Александр Кондратьевич  
кандидат технических наук, доцент,  
директор МИПК  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



**КУЛАКОВ**  
Дмитрий Борисович  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



**СЕМЕНОВ**  
Станислав Евгеньевич  
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой  
«Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

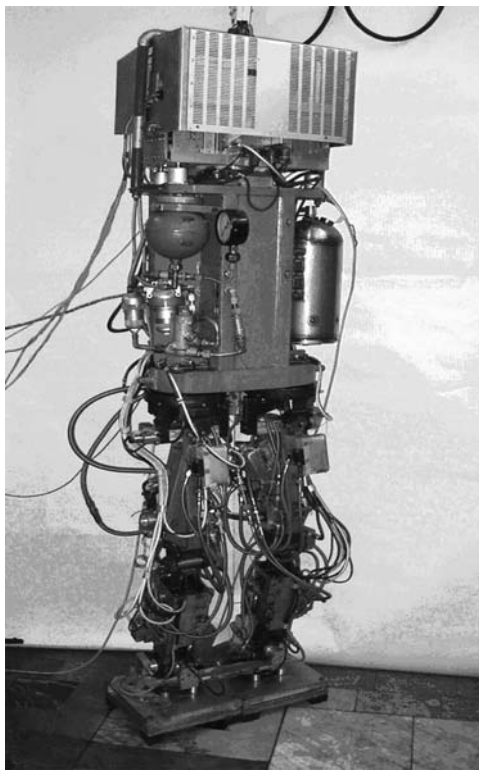


Рис. 1. Лабораторный ДШР (вид спереди)

можно осуществить, используя различные частные подходы. В данной статье представлена методика синтеза программных траекторий движения ДШР, позволяющая производить оптимизацию его движения путем варьирования относительно небольшого числа параметров. При этом исследования, направленные на изучение реализуемости и оптимальности синтезируемой траектории, проводятся с использованием имитационной математической модели ДШР [1, 2].

На рис. 2 приведена кинематическая схема исполнительного механизма ДШР, а также показано расположение абсолютной и связанных систем координат. Ось  $z$  абсолютной системы координат направлена вверх, робот движется вдоль оси  $x$ . Поскольку исполнительный механизм ДШР не закреплен на неподвижном основании, для описания положения исполнительного механизма ДШР в окружающем пространстве были введены фиктивные звенья с тремя поступательными и тремя вращательными сочленениями, соединяющие неподвижную абсолютную систему координат с корпусом робота.

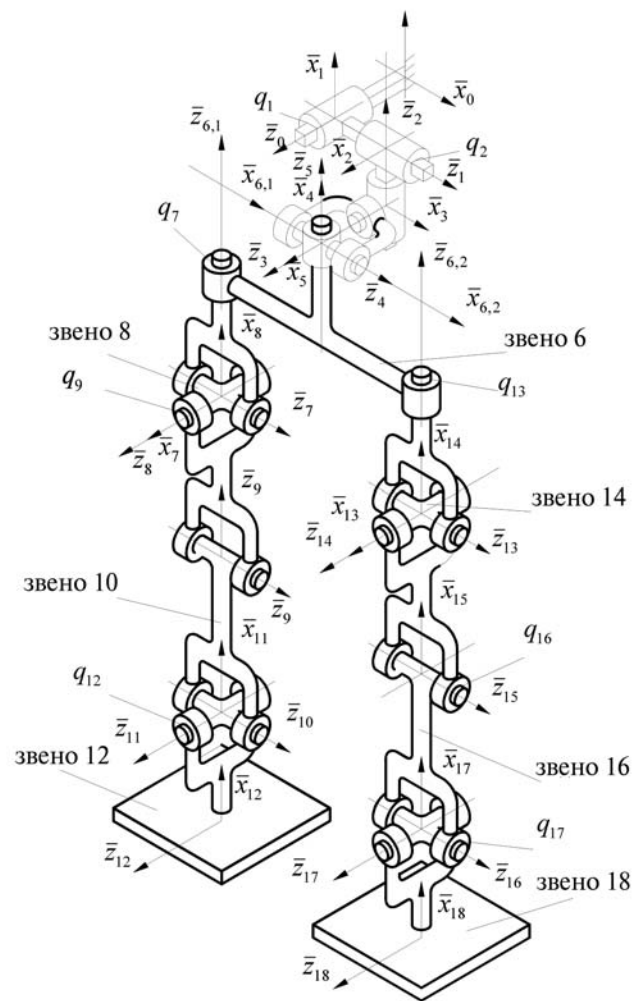


Рис. 2. Кинематическая схема ДШР и назначение связанных систем координат

В работе [3] описан принцип синтеза программных траекторий движения ДШР с помощью упрощенной математической модели. На рис. 3 и рис. 4 приведены графики изменений линейного положения начал связанных систем координат корпуса и переносимой стопы, являющихся результатом решения краевой задачи для движения ДШР, представленного упрощенной аналитической математической моделью, с постоянной средней скоростью по горизонтальной поверхности [3]. Основным недостатком формирования траектории ДШР по упрощенной математической модели является то, что в ней не учитываются инерционные свойства всех звеньев исполнительного механизма, что приводит к определенным сложностям в вопросах ее применения на реальном исполнительном механизме ДШР.

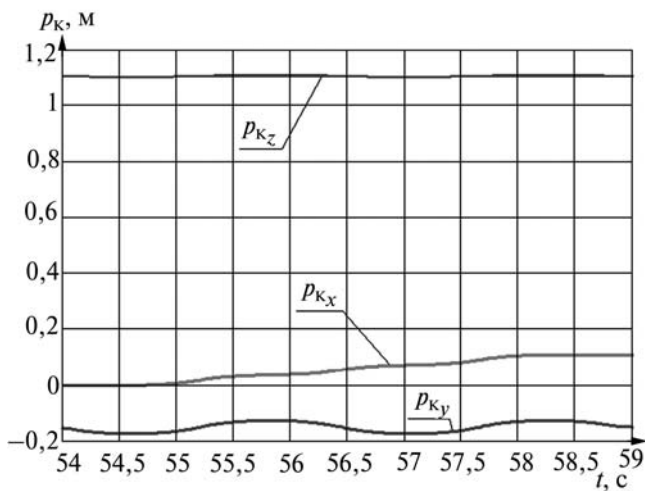


Рис. 3. Изменение положения начала системы координат корпуса, полученное в результате решения краевой задачи для движения ДШР, представленного упрощенной аналитической математической моделью

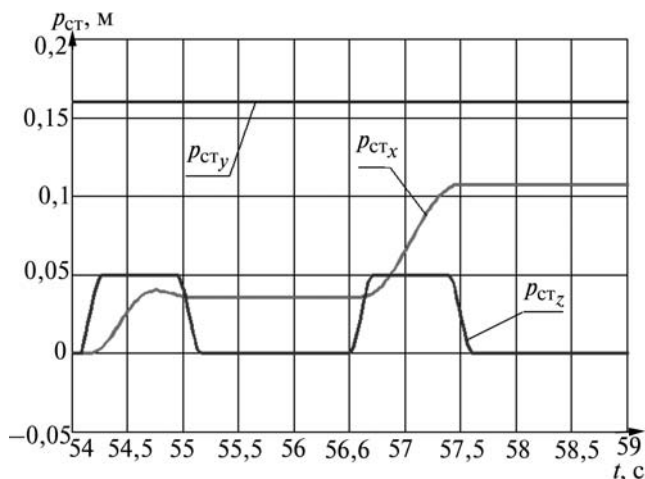


Рис. 4. Изменение положения начала системы координат переносимой стопы, полученное в результате решения краевой задачи для движения ДШР, представленного упрощенной аналитической математической моделью

Для формирования указанной траектории движения ДШР в режиме динамической ходьбы авторами предложена и реализована методика, основанная на кусочной аппроксимации траектории движения ДШР, полученной с помощью упрощенной аналитической математической модели (рис. 3 и рис. 4), отрезками прямых и синусоид. Рассмотрим данную процедуру на примере разработанного лабораторного ДШР.

Положение ДШР в декартовом пространстве в каждый момент времени определяется 11-мерным вектором положения  $\bar{S}$ :

$$\bar{S} = (x_{ст}, y_{ст}, z_{ст}, \alpha_{ст}, \beta_{ст}, \gamma_{ст}, x_{цм}, y_{цм}, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k)^T, \quad (1)$$

где  $(x_{ст}, y_{ст}, z_{ст})^T$  — координаты начала системы координат переносимой стопы в абсолютной системе координат;  $(\alpha_{ст}, \beta_{ст}, \gamma_{ст})^T$  — углы ориентации переносимой стопы в абсолютной системе координат;  $(x_{цм}, y_{цм})^T$  — проекция центра масс ДШР на плоскость  $OXY$  абсолютной системы координат;  $(\alpha_k, \beta_k, \gamma_k)^T$  — углы, определяющие ориентацию корпуса робота.

Движение ДШР в декартовом пространстве задается как программное изменение во времени координат вектора положения  $\bar{S}$  (1). Процесс формирования траектории движения представляется в виде определения последовательности кадров положения. Каждый кадр положения определяется значением вектора положения  $\bar{S}$  робота в декартовом пространстве в данный момент времени. Движение ДШР представляется как прохождение роботом положений в декартовом пространстве, определенных в последовательности кадров положений (рис. 5). Частота следования кадров задается в соответствии с требуемой точностью позиционирования робота в пространстве и динамическими свойствами исполнительного механизма.

Изменения значений компонент вектора положения (КВП)  $\bar{S}$  (1) (с частотой дискретизации по времени, равной частоте следования кадров положений) определяются соответствующими функциями изменений переменных положения (ФИПП). Каждая ФИПП в общем случае может состоять из последовательности элементов ФИПП, представляющих собой простые функции с малым числом определяющих их параметров (рис. 6). Начало и продолжительность изменения  $i$ -й КВП, определяемого  $j$ -м элементом  $i$ -й ФИПП, определяется временем  $t_{bj}$  и  $T_{ij}$  соответственно.

Поскольку при ходьбе ДШР его движение состоит из повторяющихся элементов (подъемы-опускания ног, перенос центра масс с одной ноги на другую), то представим траекторию его движения в виде последовательных однотипных

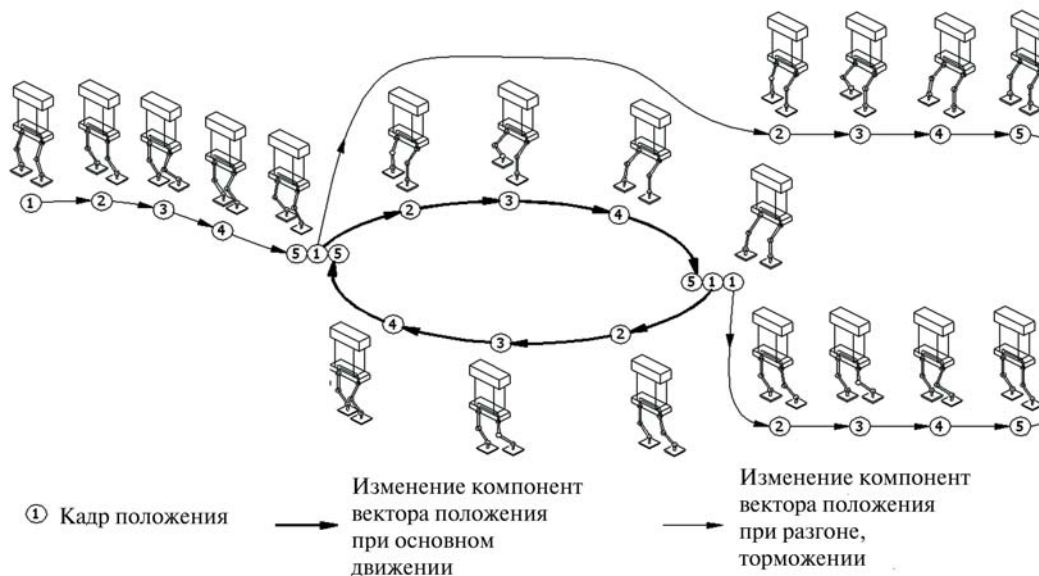


Рис. 5. Представление движения ДШР в виде последовательности кадров положений

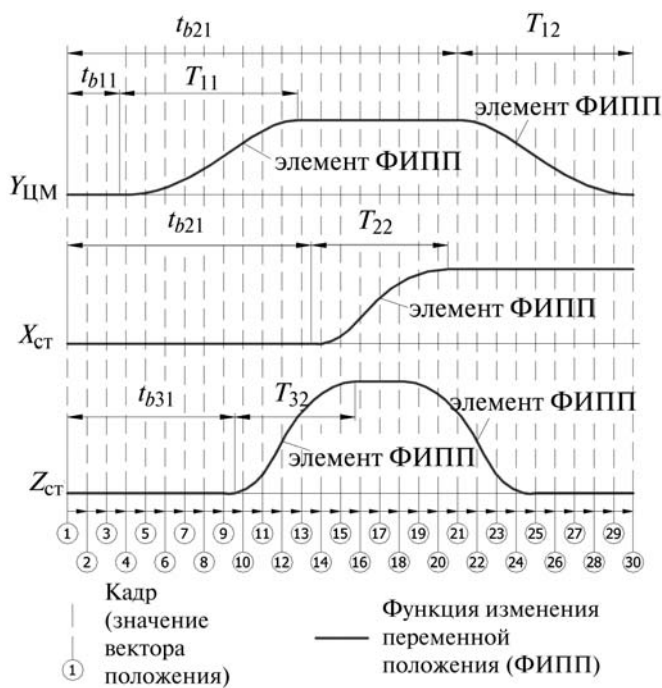


Рис. 6. Временная диаграмма изменений компонент вектора положения  $X_{\text{ЦМ}}$ ,  $X_{\text{ст}}$ ,  $Z_{\text{ст}}$ , определяемых элементами функций изменения переменных положения

векторных ФИПП  $\bar{S}(t)$  (с постоянным составом элементов ФИПП). Такую векторную ФИПП  $\bar{S}(t)$ , определяющую траекторию движения робота в пределах шага, определим как модуль движения ДШР.

Модуль движения состоит из функций изменений следующих компонент вектора положения  $\bar{S}(t)$ :

- перенос центра масс исполнительного механизма в продольном направлении ( $x_{\text{ЦМ}}(t)$ );
- перенос центра масс исполнительного механизма в поперечном направлении с переносимой стопы на опорную ( $y_{\text{ЦМ}}(t)$ );
- подъем переносимой стопы ( $z_{\text{ст}}(t), \alpha_{\text{ст}}(t), \beta_{\text{ст}}(t), \gamma_{\text{ст}}(t)$ );
- дополнительное угловое отклонение корпуса ДШР от первоначально заданного положения ( $\alpha_{\text{к}}(t), \beta_{\text{к}}(t), \gamma_{\text{к}}(t)$ );
- перенос переносимой стопы ( $x_{\text{ст}}(t), y_{\text{ст}}(t), \alpha_{\text{ст}}(t), \beta_{\text{ст}}(t), \gamma_{\text{ст}}(t)$ );
- опускание переносимой стопы ( $z_{\text{ст}}(t), \alpha_{\text{ст}}(t), \beta_{\text{ст}}(t), \gamma_{\text{ст}}(t)$ );
- возвращение углового положения корпуса ДШР к первоначально заданному значению ( $\alpha_{\text{к}}(t), \beta_{\text{к}}(t), \gamma_{\text{к}}(t)$ ).

Таким образом в нашем случае модуль движения состоит из 21 элемента ФИПП, определяющих изменения 11 КВП в пределах одного шага ДШР.

Из анализа траектории движения ДШР, полученной с помощью упрощенной аналитической модели (рис. 3 и рис. 4), видно, что изменения переменных положения ДШР  $\bar{S}(1)$  в декартовом пространстве хорошо аппрокси-

мируются кусочными гармоническими функциями. В нашей работе все элементы ФИПП, аппроксимирующие изменения переменных положения ДШР, имеют вид

$$\Delta s(\tau_s) = A_s (1 - \cos(\omega_s \tau_s)).$$

ФИПП для каждой КВП в пределах модуля движения определяется выражением

$$s_i(t) = s_i(t_{\text{нц}}) + \sum_{j=1}^{N_i} A_{S_{ij}} (1 - \cos(\omega_{S_{ij}} \tau_{S_{ij}})) \times \left[ \frac{\tau_{S_{ij}} + |\tau_{S_{ij}}|}{2|\tau_{S_{ij}}|} \right] \times \left[ \frac{(T_{ij} - \tau_{S_{ij}}) + |T_{ij} - \tau_{S_{ij}}|}{2|T_{ij} - \tau_{S_{ij}}|} \right], \quad (2)$$

где  $s_i(t)$  — функция изменения  $i$ -й КВП ( $i$ -я ФИПП);  $N_i$  — количество элементов, составляющих  $i$ -ю ФИПП;  $A_{S_{ij}} = \frac{H_{ij}}{2}$  — амплитуда гармонического закона изменения  $i$ -й КВП на  $j$ -м элементе соответствующей ФИПП;  $H_{ij}$  — требуемое изменение  $i$ -й КВП на  $j$ -м элементе соответствующей ФИПП;  $\omega_{S_{ij}} = \frac{\pi}{T_{ij}}$  — частота гармонического закона изменения  $i$ -й КВП на  $j$ -м элементе соответствующей ФИПП;  $T_{ij}$  — продолжительность  $j$ -го элемента  $i$ -й ФИПП;

$\tau_{S_i} = t - (t_{\text{нц}} + t_{b_i})$  — относительное время  $j$ -го элемента  $i$ -й ФИПП;  $0 < \tau_{S_{ij}} < T_{ij}$ ;  $t$  — текущее время движения ДШР;  $t_{\text{нц}}$  — время начала модуля движения;  $t_{b_{ij}}$  — время начала  $j$ -го элемента  $i$ -й ФИПП относительно времени начала модуля движения (рис. 6).

Формирование траектории ходьбы ДШР сводится к определению параметров  $t_{b_{ij}}$ ,  $T_{ij}$ ,  $H_{ij}$  элементов ФИПП на каждом шаге робота (для каждого модуля движения). Эти параметры определяются при исследовании движения робота на имитационной (наиболее подробной) математической модели.

На рис. 7 представлены изменения КВП и параметры, характеризующие элементы ФИПП в пределах одного модуля движения ДШР. Условные обозначения, приведенные на рис. 7:

- $X_{\text{цм}}, Y_{\text{цм}}$  — координаты центра масс робота;
- $x_{12}, x_{18}, y_{12}, y_{18}, z_{12}, z_{18}$  — координаты начал систем координат стоп в абсолютной системе координат;
- $\alpha_{\text{кх}}$  — угол наклона корпуса во фронтальной плоскости;
- $t_{b_{\text{цм}}}$  и  $T_{\text{цм}}$  — момент начала поперечного движения центра масс робота и длительность движения центра масс робота;

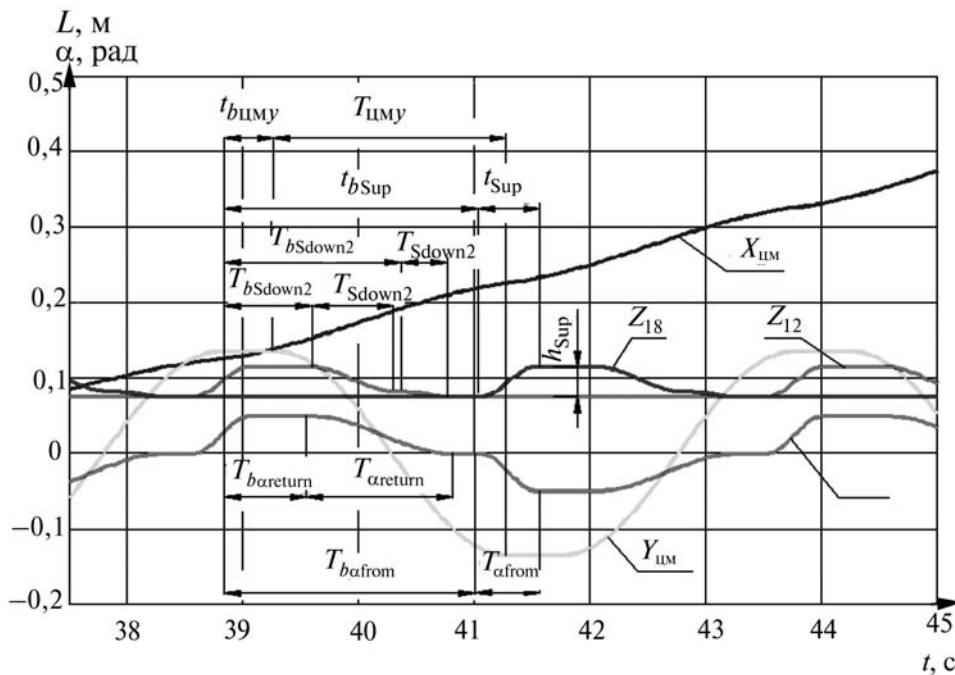


Рис. 7. Параметры ФИПП, определяющих модуль движения ДШР

$T_{bSup}$  и  $T_{Sup}$  — время начала и продолжительность фазы подъема левой стопы;

$T_{bSdown1}$  и  $T_{Sdown1}$  — время начала и продолжительность фазы быстрого опускания правой стопы;

$T_{bSdown2}$  и  $T_{Sdown2}$  — время начала и продолжительность фазы замедленного опускания правой стопы;

$t_{bakxfom}$  и  $t_{akxfom}$  — время начала и продолжительность фазы корректирующего наклона корпуса;

$t_{bakxreturn}$  и  $T_{akxreturn}$  — время начала и продолжительность фазы возврата корпуса к вертикальному положению;

$h_{Sup}$  — величина подъема переносимой стопы.

Таким образом, траектория на конечных отрезках времени становится функцией относительно небольшого числа параметров, по которым ее можно тем или иным способом скорректировать и оптимизировать с использованием имитационной математической модели робота, а также по результатам эксперимента. Кроме того, такой способ представления траектории движения ДШР позволяет «наслаивать» дополнительные корректирующие параметризованные движения исполнительного механизма, с помощью которых компенсируется влияние неучтенных в упрощенной аналитической модели динамических эффектов (в качестве такого движения с успехом использован наклон корпуса). Трудоемкость вычисления этих траекторий невелика, что позволяет формировать отрезки движения в реальном масштабе времени непосредственно в процессе ходьбы ДШР.

Коррекция траектории движения исполнительного механизма ДШР производится по результатам исследования подробной имитационной математической модели. Критерии качества могут быть самые разнообразные. Применительно к лабораторному ДШР, разработанному авторами, в качестве критерия качества синтезируемой траектории движения выбраны функции моментов на стопах робота, которые по абсолютной величине должны быть минимальными, а в идеале нулевыми на всем протяжении ходьбы. Таким способом обеспечивается «запас на стабилизацию» по моментам на стопах, необходимый для удержания

робота на выбранной траектории в процессе движения.

## Коррекция движения ДШР с использованием инерционных свойств исполнительного механизма

При ходьбе робота неучтенные в упрощенной математической модели динамические эффекты оказывают сильное влияние на характер его движения. Так, при подъеме переносимой стопы силы инерции «утягивают» робот в сторону переносимой стопы, опускание переносимой стопы приводит к обратному результату: робот «выносит» наружу. Одним из способов преодоления этих возмущений является придание роботу завышенных скоростей и ускорений в поперечном направлении, но при этом происходит сильное раскачивание корпуса и трудно получить устойчивую ходьбу с требуемыми скоростями перемещения в продольном направлении. Вторым способом компенсации сил инерции, возникающих при перемещении переносимой стопы по вертикали, является встречное угловое перемещение корпуса ДШР. При повороте корпуса возникает инерционный момент, направленный вокруг оси поворота, в направлении, противоположном направлению углового ускорения корпуса. Величина момента определяется инерционными свойствами исполнительного механизма и величиной придаваемого углового ускорения корпуса. Варьируя параметры соответствующего элемента движения, можно в значительной степени компенсировать возмущения при подъеме и опускании переносимой стопы. Этот прием позволил уменьшить взаимосвязь подъема и опускания переносимой стопы с переносом центра масс робота в поперечном направлении.

Для определения требуемого углового положения корпуса вводится вспомогательная система координат направления движения (СКНД) (рис. 8). Это подвижная система координат, назначаемая по следующим правилам:

- начало СКНД находится в середине проекции на горизонтальную плоскость вектора, соединяющего центры стоп;

- ось  $OZ$  СКНД направлена вертикально;

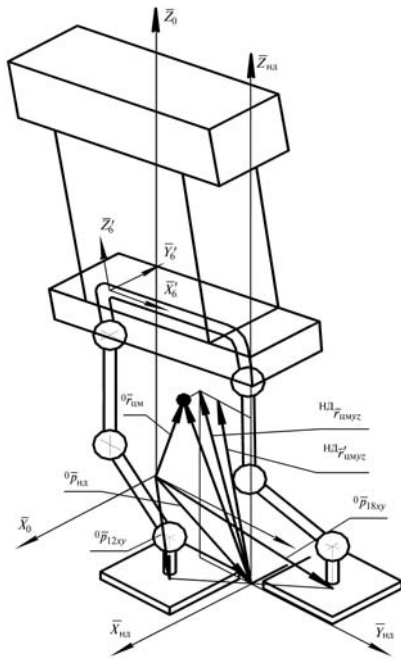


Рис. 8. Формирование заданного углового положения корпуса

— ось  $OX$  СКНД совпадает с направлением движения ДШР в данный момент времени, которое задается генератором траектории.

Положение СКНД робота характеризуется матрицей  $T_{нд}$ :

$$T_{нд} = \begin{pmatrix} {}^0R_{нд} & {}^0\bar{p}_{нд} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^0\bar{x}_{нд} & {}^0\bar{y}_{нд} & {}^0\bar{z}_{нд} & {}^0\bar{p}_{нд} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Первоначальное угловое положение корпуса  ${}^{нд}R'_6 = \begin{pmatrix} {}^{нд}\bar{x}'_6 & {}^{нд}\bar{y}'_6 & {}^{нд}\bar{z}'_6 \end{pmatrix}$  определяется относительно СКНД направлением от начала СКНД до центра масс. Плоскость  $OXZ$  системы координат корпуса совпадает с плоскостью  $OYZ$  СКНД, и орты осей системы координат корпуса, определяющей его первоначально задаваемую ориентацию, определяются в СКНД выражениями:

$${}^{нд}\bar{z}'_6 = \frac{{}^{нд}\bar{r}'_{цм\ yz}}{\left| {}^{нд}\bar{r}'_{цм\ yz} \right|}, \quad {}^{нд}\bar{y}'_6 = -1, \\ {}^{нд}\bar{x}'_6 = {}^{нд}\bar{y}'_6 \times {}^{нд}\bar{z}'_6,$$

где  ${}^{нд}\bar{r}'_{цм\ yz} = T_{yzH} \cdot T_{нд}^{-1} \cdot {}^0\bar{r}_{цм}$ ;  ${}^0\bar{r}_{цм}$  — требуемое положение центра масс, определяемое гене-

ратором траектории движения ДШР, выраженное в абсолютной системе координат;  $T_{yzH} = \text{diag}(0 \ K_H \ 1 \ 1)$  — матрица, определяющая проекцию центра масс робота на плоскость  $OYZ$  системы координат направления движения робота, учитывающая недоворот корпуса. (Здесь и далее при преобразовании векторов с помощью матрицы  $T_{4 \times 4}$  используются обобщенные векторы.)

Недоворот корпуса относительно определенного начального углового положения вносится для уменьшения углового раскачивания робота при ходьбе. Определяется коэффициентом недоворота  $K_H$ , который выступает в качестве варьируемого параметра ходьбы и может меняться при синтезе походки.

Для нахождения итогового требуемого углового положения корпуса, определяемого матрицей  ${}^0R_6$ , осуществляем его отклонение от первоначально заданной ориентации, определяемой матрицей  ${}^{нд}R'_6$ , на углы доворота  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$ ,  $\gamma(t)$ , задаваемые генератором траектории движения ДШР, относительно осей  ${}^{нд}\bar{x}'_6$ ,  ${}^{нд}\bar{y}'_6$ ,  ${}^{нд}\bar{z}'_6$  соответственно.

$${}^0R_6 = {}^0R_{нд} \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} {}^{нд}R'_6.$$

Введенные углы доворота  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$ ,  $\gamma(t)$  входят в качестве компонент в вектор положения ДШР  $\bar{S}$  (1).

Авторами был проведен синтез траектории движения лабораторного ДШР при динамической ходьбе с разгоном на начальном участке траектории. В ходе синтеза были определены параметры элементов ФИПП, обеспечивающие ходьбу ДШР с характеристиками, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристики динамической ходьбы**

Средняя скорость движения ДШР	0,08 м/с
Величина подъема переносимой стопы	0,04 м
Величина продольного переноса переносимой стопы за один шаг	0,4 м
Расстояние между центрами стоп в поперечном направлении	0,35 м
Величина переноса ЦМ ДШР в поперечном направлении	0,29 м
Максимальный угол дополнительного отклонения корпуса ДШР от заданного углового положения во фронтальной плоскости	0,05 рад

На рис. 9 показаны ФИПП, определяющие траекторию движения ДШР. Параметры элементов ФИПП (2) приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры функций изменения компонент вектора положения ДШР**

$t_{b_{\text{IMx}}}$	0 с	$T_{\text{IMx}}$	2,48 с	$A_{Sx}$	0,2 м
$t_{b_{\text{IMy}}}$	0,5 с	$T_{\text{IMy}}$	2 с	$A_{\text{CMY}}$	0,73 м
$T_{b\text{Sup}}$	2,25 с	$T_{\text{Sup}}$	0,5 с	$A_{\text{Sup}}$	0,02 м
$t_{b\text{Sdown1}}$	3,25 с	$T_{\text{Sdown1}}$	0,75 с	$A_{\text{Sdown1}}$	0,016 м
$t_{b\text{Sdown2}}$	4 с	$T_{\text{Sdown2}}$	0,5 с	$A_{\text{Sdown2}}$	0,004 м
$t_{b_{\alpha_{\text{cx}} \text{ return}}}$	2,25 с	$t_{\alpha_{\text{cx}} \text{ return}}$	0,5 с	$A_{\alpha_{\text{cx}} \text{ form}}$	0,025 рад
$t_{b_{\alpha \text{ return}}}$	3,25 с	$T_{\alpha \text{ return}}$	1,25 с	$A_{\alpha_{\text{cx}} \text{ return}}$	0,025 рад

Значения КВП из кадров траектории движения передаются в программные модули решения обратной задачи кинематики, где траектория движения ДШР в декартовом пространстве преобразуется в траекторию движения в пространстве обобщенных координат. При этом дополнительно учитываются довороты стоп относительно первоначально заданных угловых положений, обеспечивающие требуемые моменты для стабилизации движения ДШР при ходьбе.

**Выводы**

Предложенная методика синтеза алгоритмов управления движением исполнительного механизма робота, основанная на представлении изменения переменных его состояния

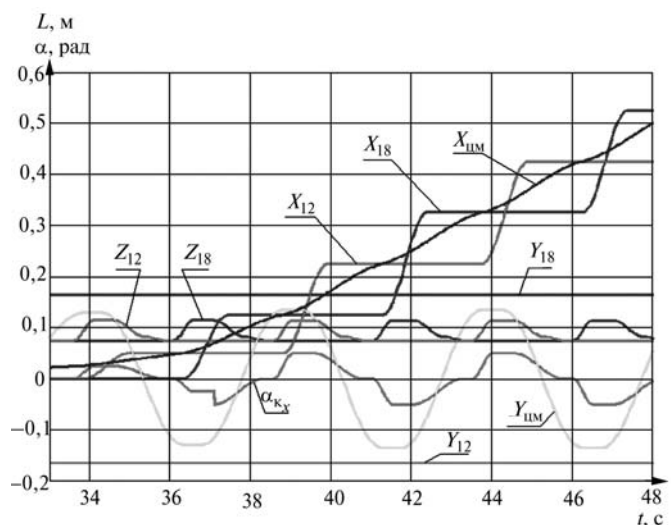


Рис. 9. Траектория движения ДШР в декартовом пространстве при ходьбе:  $X_{\text{CM}}$ ,  $Y_{\text{CM}}$  — координаты центра масс робота;  $x_{12}$ ,  $x_{18}$ ,  $y_{12}$ ,  $y_{18}$ ,  $z_{12}$ ,  $z_{18}$  — координаты начал систем координат стоп;  $\alpha_{\text{cx}}$  — угол наклона корпуса во фронтальной плоскости

в виде комбинации гармонических функций, позволяет получать реализуемые траектории движения ДШР.

Для компенсации инерционного воздействия неучтенных в упрощенной модели динамических эффектов необходимо управлять дополнительным изменением пространственной конфигурации исполнительного механизма ДШР.

**Литература**

1. Исследование принципов управления и стабилизации двуногих шагающих роботов в режиме динамической ходьбы: Отчет по проекту РНП 2.1.2.730. Федеральное агентство по образованию / Руководитель А.К. Ковальчук. Исполнители: Медведев В.С., Шахтарин Б.И., Семенов С.Е. и др. РК № 01200703234. М., 2007. 134 с.
2. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Управление исполнительными системами двуногих шагающих роботов. Теория и алгоритмы / Под ред. А.К. Ковальчука. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 160 с.
3. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Ломакин В.О. Синтез функций управления ходьбой двуногого шагающего робота при помощи упрощенной математической модели // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. М., 2010. № 1.
4. Loffler K., Gienger M., Pfeiffer F. Sensor and Control Design of a Dynamically Stable Biped Robot // Robotics and Automation. 2003. Proceeding. ICRA apos; 03. IEEE International Conference. W.t. 2003. Vol. 1. Issue 14—19. P. 484—490.

Статья поступила в редакцию 16.02.2011 г.