

Технология и технологические машины



КОВАЛЬЧУК

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

УДК 681.5

Стабилизация движения двуногого шагающего робота управлением моментами на стопах

А.К. Ковальчук

Описан алгоритм стабилизации движения двуногого шагающего робота с управлением моментами на стопах, обеспечивающий его движение по различным требуемым траекториям в условиях внешних силовых возмущений на исполнительный механизм и при отличии положения опорной поверхности от ожидаемой.

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

The article describes an algorithm of movement stabilization of a biped walking robot with torque on feet control, ensuring its movement along various desired trajectories under external force disturbances on an actuating mechanism, and when a bearing surface position differs from the expected one.

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

Для обеспечения устойчивой ходьбы антропоморфных двуногих шагающих роботов (ДШР) применяются различные методы стабилизации их движения по требуемой траектории. Среди них можно

отметить дополнительное управляемое отклонение корпуса, дополнительное управляемое движение переносимой ноги, управление моментами на стопах робота [1]. В данной статье описывается стабилизация движения исполнительного механизма ДШР (рис. 1), созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика» (Э10) [2], путем управления моментами на стопах.

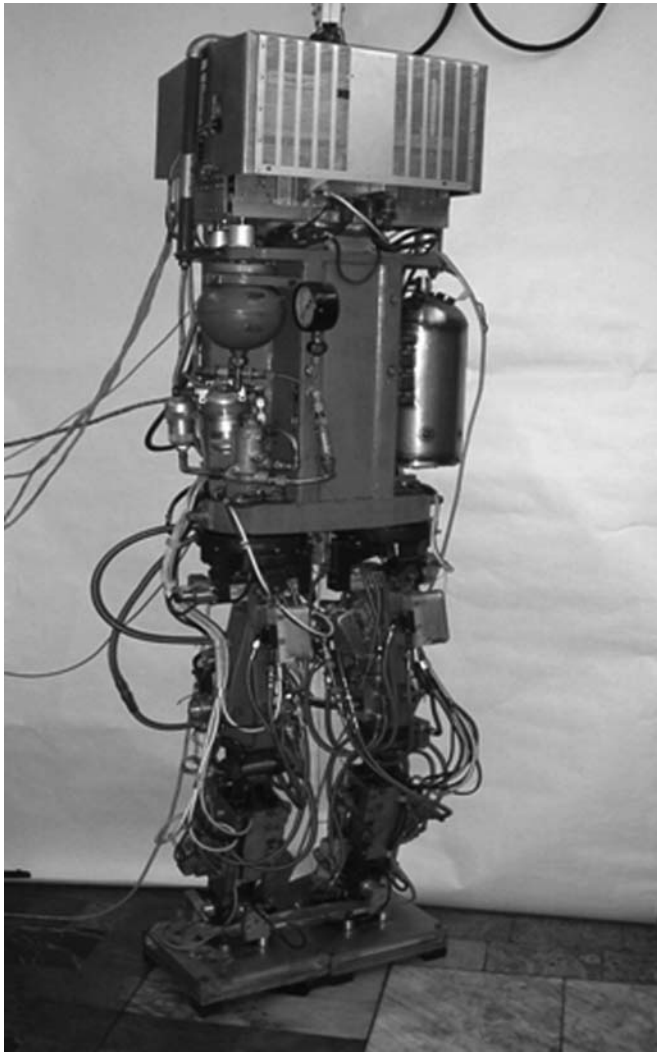


Рис. 1. Лабораторный ДШР (вид спереди)

Исполнительный механизм робота (высота 2,2 м, вес 220 кг) состоит из корпуса и двух ног, имеет 12 степеней подвижности, оснащенных электрогидравлическими следящими приводами (ЭГСП), замкнутыми обратными связями по положению. В качестве исполнительных гидродвигателей используются гидроцилиндры

с непроходными штоками. Потоками жидкости в полости гидроцилиндров управляют электрогидравлические усилители типа «сопло—заслонка—золотник». В качестве датчиков угла поворота во все шарниры исполнительного механизма установлены синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы, работающие в режиме фазовращателей. На корпусе робота на виброизолированной платформе установлены датчики системы ориентации: три маятниковых акселерометра и три гироскопических датчика угловой скорости.

Применение на исполнительном механизме ДШР электрогидравлических приводов, следящих по положению, обеспечивает движение робота с большими скоростями [3]. Однако во время движения ДШР неизбежно возникают отклонения от расчетных траекторий. Это происходит в том числе по следующим причинам:

- алгоритм расчета траектории использует упрощенную модель динамики робота;
- во время движения на робот действуют различные неучтенные силы;
- опорная поверхность имеет форму, отличную от принятой в модели;
- приводы имеют ограниченную динамическую точность.

При рассматриваемом в настоящей публикации способе стабилизации для удержания исполнительного механизма ДШР на заданной траектории движения по горизонтальной плоскости производится управление моментами, действующими на стопы ДШР со стороны опорной поверхности. Для создания требуемого управляющего момента на стопах ДШР расположены упругие элементы. Они позволяют создавать заданный момент, действующий на исполнительный механизм со стороны опорной поверхности, путем задания соответствующих ему угловых положений стоп. Разработанная система стабилизации положения робота формирует требуемые моменты на стопах, вращающие робот на заданную траекторию движения, и соответствующие им угловые положения стоп ДШР. Система стабилизации по-

ложения состоит из трех контуров управления (рис. 2). Первый контур замкнут по положению корпуса с коррекцией по угловой скорости (ПД-регулятор), второй контур замкнут по моменту на стопе (ПИ-регулятор) и третий замкнут обратной связью по обобщенным координатам ДШР в сочленениях, снабженных ЭГСП с замкнутыми обратными связями по положению.

В процессе движения несоответствие углового положения корпуса ДШР заданному определяется по рассогласованию двух матриц углового положения корпуса — матрицы $R_{корп}$, полученной от модуля формирования траектории движения (заданное положение), и матрицы $R_{корп\ изм}$, вычисленной системой ориентации (СО) робота (определенное положение) (см. рис. 2). На основании полученной разницы, а также угловой скорости корпуса робота ω , измеренной СО робота, вычисляется изменение момента $M_{тр\ об}$, действующего на ДШР со стороны опорной поверхности, необходимое для возвращения корпуса робота на его заданную траекторию движения. Это изме-

нение момента обрабатывается регулятором момента, который преобразует разницу между требуемым моментом и реальным, измеренным силомоментными датчиками стоп, в необходимые довороты стоп. Дополнительные угловые перемещения стоп, определяющие корректирующий момент, действующий со стороны опорной поверхности на робот, задаются матрицами ${}^{\Gamma ст} R_{дов}$, на которые умножаются матрицы требуемых угловых положений стоп $R_{\Gamma ст}$, задаваемые модулем формирования траектории движения робота.

Матрицы итоговых положений стоп определяются в соответствии с выражением

$$T_{ст} = T_{\Gamma ст} {}^{\Gamma ст} A_{ст}, \quad (1)$$

где $T_{ст} = \begin{bmatrix} R_{ст} & \bar{p}_{ст} \\ 000 & 1 \end{bmatrix}$ — матрица итогового положения стопы;

$T_{\Gamma ст} = \begin{bmatrix} R_{\Gamma ст} & \bar{p}_{\Gamma ст} \\ 000 & 1 \end{bmatrix}$ — матрица положения стопы, задаваемая генератором траектории;

${}^{\Gamma ст} A_{ст} = \begin{bmatrix} {}^{\Gamma ст} R_{дов} & 0 \\ 000 & 1 \end{bmatrix}$ — матрица пе-

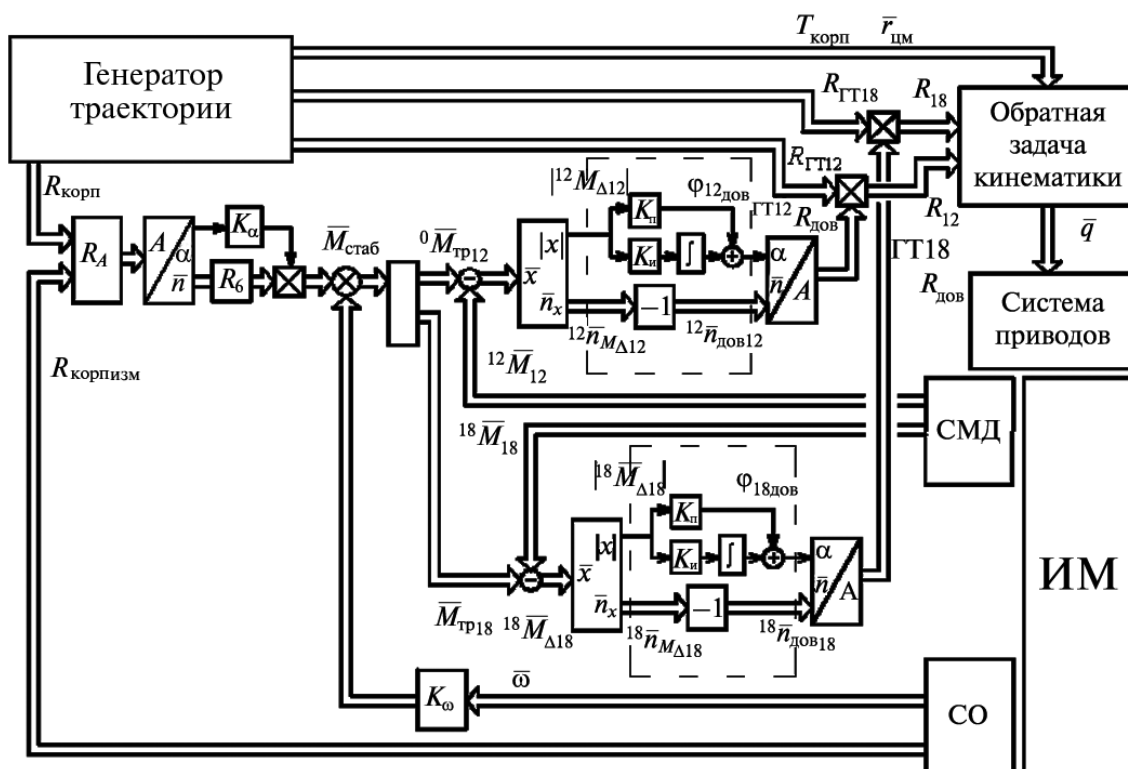


Рис. 2. Структурная схема системы стабилизации исполнительного механизма ДШР

перехода из системы координат стопы в ее итоговом положении в систему координат стопы в положении, задаваемом генератором траектории.

Скорректированные таким образом матрицы положений стоп ${}^0T_{ст}$ поступают в блок решения обратной задачи кинематики и используются для определения итогового вектора обобщенных координат, обеспечивающего требуемое положение робота и необходимый момент на опорной стопе. Вектор требуемых обобщенных координат обрабатывается контуром управления системой ЭГСП, замкнутых обратными связями по положению.

Значения параметров контура моментного ПИ-регулятора (обведен пунктиром на рис. 2) определяются исходя из качества переходного процесса (на имитационной модели ДШР [2]) при отклике контура на ступенчатое изменение требуемого момента на стопе. Переходный процесс при ступенчатом изменении требуемого момента, соответствующий приведенным значениям параметров, показан на рис. 3.

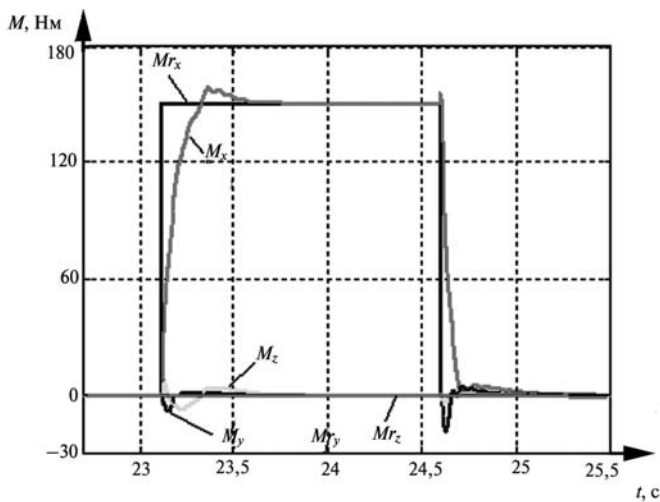


Рис. 3. Переходный процесс момента на стопе ДШР при подаче на вход ступенчатого воздействия вдоль оси x :

M'_k — требуемый момент на стопе относительно оси k ;
 M_k — измеренный момент на стопе относительно оси k

Для проверки работы системы стабилизации ДШР были проведены экспериментальные исследования на его лабораторном образце. Оценивалось качество переходных процессов отклонения углового положения корпуса от

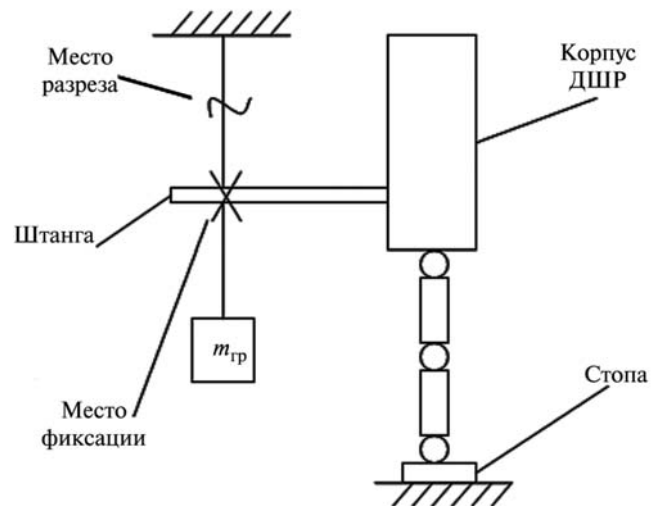


Рис. 4. Схема нагружения ДШР внешним моментом

заданного при ступенчатом приложении к нему внешнего момента и при ступенчатом изменении углового положения опорной поверхности.

Для оценки качества подавления разработанной системой стабилизации влияния изменяющихся внешних сил и моментов, приложенных к ДШР, проводился эксперимент в следующей постановке (рис. 4).

К исполнительному механизму прикрепляется горизонтальная штанга. Рядом на струне подвешивается груз массой $m_{гр} = 5$ кг. ДШР устанавливается на ровной горизонтальной поверхности таким образом, чтобы штанга касалась струны и расстояние от струны до центра масс робота составляло 1 м. При включенной системе стабилизации струна прикрепляется к штанге, включается режим записи переходных процессов, и часть струны, соединяющая штангу с подвесом, перерезается. В результате исчезает сила, уравнивающая вес груза, и робот оказывается под действием внешнего момента

$$M_{вн} = m_{гр} l_{гр},$$

где $m_{гр}$ — масса подвешенного груза; $l_{гр}$ — расстояние от оси струны до центра масс робота.

Под действием этого момента робот отклоняется от заданного положения, и система стабилизации начинает уменьшать возникшую дополнительную ошибку.

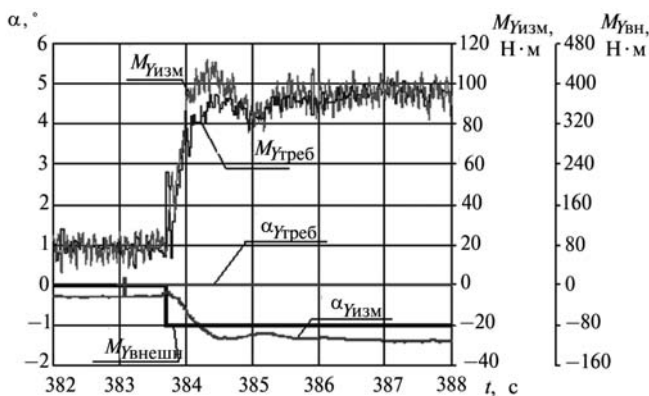


Рис. 5. Переходные процессы в системе стабилизации ДШР под действием внешнего момента, приложенного вокруг оси Y (ДШР стоит на правой ноге):

$\alpha_{утреб}$ — требуемый угол наклона корпуса вокруг оси Y ; $\alpha_{уизм}$ — отработанный угол наклона корпуса вокруг оси Y ; $M_{увнешн}$ — внешний момент вокруг оси Y , приложенный к роботу; $M_{утреб}$ — требуемый момент на стопах робота вокруг оси Y , синтезированный системой стабилизации; $M_{уизм}$ — отработанный момент на стопах робота вокруг оси Y , синтезированный системой стабилизации

Сопровождающие процесс выравнивания корпуса робота переходные процессы записываются в память компьютера системы управления. По этим данным построены графики, приведенные на рис. 5. На графиках видно, что переходные процессы по углам обладают незначительной колебательностью и близки к апериодическим. Опыт работы с лабораторным ДШР показал, что данное качество системы стабилизации чрезвычайно важно для успешной работы системы управления ходьбой в целом. Длительность переходных процессов составляет не более 3 с, что сопоставимо с длительностью шагового цикла. Угловая погрешность стабилизации корпуса не превышает 1° , что обеспечивает устойчивое движение в режиме динамической ходьбы.

В процессе управления движением ДШР при ходьбе на него также могут действовать возмущения, связанные с отклонением формы опорной поверхности от ожидаемой. Это может проявиться при постановке переносимой стопы на опорный участок, ориентация которого недостаточно хорошо известна, или если

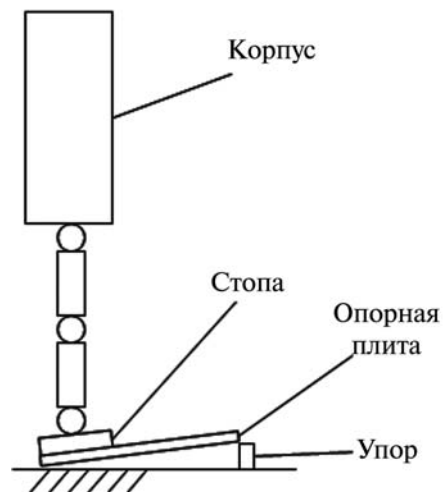


Рис. 6. Схема эксперимента с изменением угла наклона опорной поверхности

в опорной фазе под опорной стопой опорный участок изменяет свою пространственную ориентацию (ходьба по подвижному основанию). Качество работы системы стабилизации в подобных ситуациях может быть оценено по переходным процессам в системе стабилизации, возникающим при ступенчатом изменении уг-

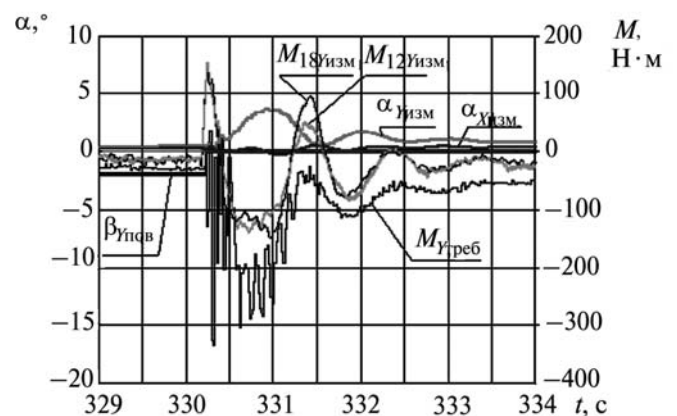


Рис. 7. Переходные процессы в системе стабилизации ДШР вследствие ступенчатого изменения угла наклона опорной поверхности к горизонту $\beta_{упов}$ вокруг оси Y (ДШР стоит на двух ногах):

$\beta_{упов}$ — угол наклона опорной поверхности вокруг оси Y ; $\alpha_{лизм}$, $\alpha_{уизм}$, $\alpha_{уизм}$ — измеренные углы наклона корпуса соответственно вокруг осей X и Y ; $M_{утреб}$ — требуемый момент на стопах робота вокруг оси Y , синтезированный системой стабилизации; $M_{18уизм}$ — отработанный момент вокруг оси Y на левой стопе робота; $M_{12уизм}$ — отработанный момент вокруг оси Y на правой стопе робота

ла наклона опорной поверхности под опорной стопой. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 6.

ДШР с включенной системой стабилизации устанавливается на наклонную плиту, один край которой опирается на упор, обеспечивающий заданный угол наклона плиты. Включается запись переходных процессов, и упор выдергивается. Плита падает и занимает горизонтальное положение за время порядка 0,07 с, что более чем на порядок меньше постоянной времени системы стабилизации. Проведенная оценка показала незначительное влияние на переходный процесс вертикальной составляющей движения. Полученные в результате эксперимента переходные процессы приведены на рис. 7. Робот стоял на двух ногах, и опорная плита поворачивалась вокруг оси Y на 2° . В результате возникала ошибка по углу наклона корпуса, которую система стабилизации начала подавлять. Установившееся значение ошибки по углу корпуса не превышало 1° .

Выводы

Экспериментальные исследования системы стабилизации показали, что разработанная структура системы стабилизации, а также реа-

лизирующие ее алгоритмы и программы, работоспособны и обладают достаточной для реализации ходьбы эффективностью.

Разработанная структура системы стабилизации обеспечивает управление требуемыми моментами на стопах ДШР с электрогидравлическими приводами, замкнутыми обратными связями по положению.

Разработанная структура системы стабилизации позволяет управлять угловым положением корпуса при движении исполнительного механизма ДШР с ЭГСП по горизонтальной плоскости в одноопорной и двухопорной фазах движения ДШР при изменяющихся внешних силовых воздействиях на исполнительный механизм и при отклонении углового положения опорной поверхности от прогнозируемого.

Литература

1. Sensory reflex control for humanoid walking Quiang Huang and Yoshihiko Nakamura, Member, IEEE transactions on robotics. Vol. 21. № 5. 2005. P. 977—984.
2. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Управление исполнительными системами двуногих шагающих роботов. М.: МИПК МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 160 с.
3. 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. P. 484—490.

Статья поступила в редакцию 03.03.2011 г.