

1548952

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи
УДК 629.062: 621.865.8

СЕМЕНОВ СТАНИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ДВУНОГОВОГО
ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

05.02.03 - Системы приводов

05.02.05 - Роботы, манипуляторы и робототехнические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1995

55-30.29

629.062:621.865.8

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Ковальчук А.К.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор, академик Пупков К.А.,
кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник
Буданов В.М.

Ведущее предприятие - ЦНИАГ, г.Москва.

Защита диссертации состоится "___" "___" 1966 г. на
заседании специализированной
государственной технической
комиссии: 107005, Москва, 2-й

С диссертацией можно ознакомиться
Ваши отзывы в двух экземплярах
ба высылать по указанному адресу.

Желающие присутствовать
известить Совет писемным
председателя Совета. Телефон

Автореферат разослан

Ученый секретарь
Совета, к.т.н., доцент

1548952

Подписано к печати 13.

Заказ N 443

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время практически во всех промышленно развитых странах интенсивно ведутся работы по созданию и исследованию шагающих роботов, в том числе и двуногих. Это вызвано тем, что аппараты, снабженные шагающим двигателем, имеют ряд преимуществ перед традиционными транспортными средствами при движении по пересеченной местности, завалам, а также внутри зданий и сооружений, где необходимо перемещаться по лестницам, узким коридорам и шахтам. Антропоморфные механизмы особенно выгодны при действиях в среде, приспособленной для человека.

В связи с развитием атомной энергетики, химической промышленности, боевых средств массового поражения встает задача создания средств, способных заменить человека в опасной для него среде при выполнении спасательных, аварийно-восстановительных и иных работ. Таким средством могут служить двуногие шагающие роботы (ДШР), выполненные по антропоморфной схеме. К антропоморфному ДШР, используемому как средство решения перечисленных выше задач, предъявляется ряд противоречивых трудновыполнимых требований. Так при жестких массогабаритных ограничениях он должен иметь исполнительный механизм с очень большим числом степеней подвижности (более 30), мощный автономный источник энергии, развитую систему чувствления и управления, эффективные средства связи. Исполнительный механизм ДШР имеет древовидную кинематическую структуру и не закреплен к неподвижному основанию, но в процессе движения на него постоянно накладываются внешние связи и воздействуют удары. Внешние силомоментные воздействия, в особенности силы и моменты взаимодействия ДШР с опорной поверхностью, во многом определяют его движение. Поэтому они должны измеряться и использоваться в процессе управления движением ДШР. Требования большой удельной мощности и высокого быстродействия вынуждают использовать электрогидравлический привод (ЭГП).

В процессе выполнения поставленной задачи система ЭГП может работать в различных режимах, в том числе и в режиме квазистатической ходьбы, необходимом для совершения медленных точных движений (например вблизи объекта работ). Важной задачей является исследование динамики систем ЭГП ДШР при данном режиме работы. Актуальность поставленной задачи обусловлена практической значимостью

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1548952

Семенов С.Е. Динамика сист

и малым количеством работ, посвященных ее решению.

Цель работы - разработка и исследование динамики системы электрогидравлических приводов ДШР с силомоментными датчиками стоп в режиме квазистатической ходьбы.

Научные задачи:

1. Разработка математической модели системы электрогидравлических приводов ДШР с древовидным исполнительным механизмом, не закрепленным к неподвижному основанию, учитывающей наложенные внешние связи и воздействие ударов.

2. Разработка принципов управления системой ЭГП ДШР в режиме квазистатической ходьбы.

3. Разработка принципов обработки информации, поступающей от силомоментных датчиков стоп и использования ее в процессе управления.

4. Создание экспериментального комплекса и исследование динамики системы ЭГП ДШР в процессе квазистатической ходьбы.

Объект исследования - лабораторный образец ДШР, созданный на кафедре "Гидромашины, гидропневмоавтоматика и гидропривод" (Э-10) МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Методы исследования. При решении указанных задач в работе используются методы теории автоматического управления, аналитической механики, прикладной гидродинамики, теории матриц, математическое моделирование, а также экспериментальное исследование лабораторного образца ДШР с использованием средств автоматизации эксперимента.

Научная новизна. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований в работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана математическая модель системы ЭГП ДШР с древовидным исполнительным механизмом, не закрепленным к неподвижному основанию, с учетом наложенных внешних связей.

2. Предложен принцип управления ДШР в режиме квазистатической ходьбы, позволяющий в реальном масштабе времени вычислять вектор требуемых обобщенных координат по заданному вектору координат, ориентации переносимой стопы и координат вертикальной проекции центра масс ДШР.

3. Разработан принцип определения координат вертикальной проекции центра масс ДШР по информации, получаемой от силомоментных датчиков (СМД) стоп, учитывающий динамику системы ЭГП и ис-

пользующий специально разработанный критерий, оценивающий возможность использования упрощенных алгоритмов вычисления.

4. Предложен принцип адаптации ДШР к опорной поверхности, позволяющий в двухопорной фазе в реальном масштабе времени по сигналам СМД стоп корректировать движение переносимой стопы и исходные данные, используемые алгоритмом управления.

5. Создан экспериментальный комплекс, позволяющий исследовать динамику системы ЭГП и процессы силового взаимодействия с опорной поверхностью ДШР, перемещающегося в рамках квазистатической ходьбы.

Достоверность результатов. Научные положения и выводы, представленные в работе, обоснованы результатами теоретических и экспериментальных исследований.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением обоснованных допущений, принятых при математическом моделировании системы ЭГП ДШР. Результаты расчетов процессов, протекающих в системе ЭГП ДШР, подтверждены экспериментом, проведенным с использованием современных средств измерения и обработки данных. При расчетах использовались стандартные методы решения систем дифференциальных уравнений.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработанная математическая модель системы ЭГП ДШР может быть использована при исследовании и проектировании перспективных шагающих роботов.

2. Разработанные принципы управления и обработки информации, поступающей от СМД, могут быть использованы при создании систем управления ДШР.

3. Созданный экспериментальный комплекс целесообразно использовать при разработке и испытаниях элементов конструкций и алгоритмов управления двуногими шагающими роботами в режимах статической и динамической ходьбы.

Реализация результатов работы. Разработанные в диссертации теоретические положения, алгоритмы управления и рекомендации по проектированию систем ЭГП ДШР внедрены в в/ч 52688-Р при выполнении госбюджетной НИР "Исследование и разработка роботизированного манекена для оценки герметичности и защитных свойств средств индивидуальной защиты", выполненной по договору 931/1 от 28 февраля 1992 г.

Использование результатов работы при решении названной задачи

подтверждается актом о внедрении.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- научных семинарах кафедры Э-10 МГТУ им. Баумана,
- конференции "Актуальные проблемы повышения качества современного энергомашиностроения" (Москва, 1988 г.),
- 12-й юбилейной конференции молодых ученых "Актуальные проблемы машиноведения" (Москва. ИМАШ, 1989 г.),
- 5-м всесоюзном совещании по робототехническим системам (Геленджик, 1990 г.),
- конференции "Робототехника для экстремальных условий" (С-Петербург, 1995 г.).

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 4-х научных работах.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по результатам каждой из глав, заключения, приложения и списка литературы. Общий объем работы содержит 101 страницу машинописного текста, 13 таблиц, 41 рисунок, список литературы из 57 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** к диссертационной работе обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, методы исследования, изложены основные положения, представляемые автором на защиту.

В **первой главе** производится обзор отечественных и зарубежных работ, посвященных проблеме создания ДШР, который показывает бурный рост интереса к созданию антропоморфных шагающих механизмов, большое количество проводимых экспериментальных и теоретических исследований.

С помощью материалов данного обзора анализируются возможные сферы применения и режимы движения ДШР, оцениваются требования к мощности основных приводов, участвующих в процессе ходьбы, общие требования к системе приводов антропоморфных ДШР, делается вывод о целесообразности использования в ДШР систем электрогидравлических приводов. Отмечается, что эффективность ДШР как средства решения различных задач в экстремальных ситуациях, в значительной степени определяется качеством системы приводов. К системе приводов предъ-

являются особые, часто противоречивые требования, не свойственные для систем приводов других классов машин. Важной является способность работать в различных режимах, в том числе и в следующем по положению. Он необходим для осуществления квазистатической ходьбы, обеспечивающей медленные точные движения вблизи объекта работ.

Анализируются специфические требования, предъявляемые к системе приводов в режиме квазистатической ходьбы. Формулируется вывод о том, что требования к мощности, предъявляемые к системе приводов в динамических режимах движения, обеспечивают большой запас по мощности в режиме квазистатической ходьбы. Это значительно снижает взаимовлияние приводов через исполнительный механизм, делает малозаметным изменение инерционных свойств механизма в процессе движения, что целесообразно использовать при разрастке алгоритмов управления системой приводов в этом режиме.

В работах отечественных авторов не достаточно внимания уделено изучению специфики работы системы приводов ДШР. В должной мере не рассмотрены задачи, поставленные в данной работе. В отечественной литературе практически отсутствуют работы по созданию экспериментальных образцов ДШР с электрогидравлическим приводом, что вызывает необходимость проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Во второй главе разработана математическая модель системы ЭП ДШР. При этом в ней учтены следующие особенности:

- древовидная кинематическая структура исполнительного механизма ДШР;
- незакрепленность ДШР к неподвижному основанию;
- наличие динамических внешних связей, накладываемых на исполнительный механизм;
- возможность изменения внешних динамических связей в процессе движения;
- учитываются удары.

Учтены следующие требования, предъявляемые к математической модели:

- низкая трудоемкость формирования уравнений, позволяющая использовать полученные алгоритмы при управлении ДШР в реальном времени;
- формирование уравнений математической модели в форме Лагранжа;
- использование рекурсивных алгоритмов вычисления коэффициентов матричных уравнений.

В математической модели приняты следующие допущения:

- звенья исполнительного механизма абсолютно жесткие;
- в шарнирах отсутствуют люфты;
- гидравлическая станция питания обладает достаточной мощностью и обеспечивает постоянное давление в линиях питания системы приводов.

Особенностями математической модели кинематики исполнительного механизма ДШР, разработанной в данной диссертации являются: фиктивная кинематическая цепь; специальная система нумерации звеньев и индексации соответствующих переменных.

Фиктивная кинематическая цепь соединяет начало абсолютной системы координат и звено ДШР, содержащее характеристическую точку (в данном случае корпус ДШР). Она содержит три вращательные и три поступательные степени подвижности, находящиеся в основании цепи. Все звенья фиктивной кинематической цепи невесомые, на них не действуют внешние силы, а обобщенные силы в соответствующих степенях подвижности заведомо равны нулю.

Специальная система индексации позволяет произвольным (наиболее наглядным) способом пронумеровать звенья и записать рекурсивные уравнения в наиболее общей форме, избежав при этом сложностей с записью уравнений для узловых звеньев. Для произвольного кинематического дерева, каждому звену которого присвоен индивидуальный номер i , изменяющийся от 0 до N , где N - количество звеньев в дереве, введены следующие индексные функции:

$Pr(i)$ - определяет номер предыдущего звена для звена i ;

$Nnext(i)$ - определяет количество J следующих звеньев для звена i ;

$Next(i, j)$ - определяет номер j -го ($j=1, \dots, J$) следующего звена;

$Fr(i); i=1, 2, \dots, N$ - определяет порядок перебора звеньев в прямой рекурсии;

$Nfr(i)$ - функция, обратная к $Fr(i)$, и определяет порядковый номер звена i в прямой рекурсии;

$Br(i); i=1, 2, \dots, N$ - определяет порядок перебора звеньев в обратной рекурсии;

$Ninf(i)$ - определяет количество звеньев, находящихся на кратчайшем пути от фиктивной стойки до звена i ;

$Inf(i, j)$ - определяет номер звена, порядковый номер которого в наикратчайшей прямой рекурсии, соответствующей звену i , равен j ;

здесь j изменяется в диапазоне $1, 2, \dots, N_{inf}(i)$.

В данной работе эти функции заданы таблично в соответствии с параметрами рассматриваемого ДШР. Кинематическая схема рассматриваемого ДШР с соответствующей системой нумерации приведена на рис 1.

Использование данного подхода позволяет сделать запись уравнений кинематики и динамики древовидного исполнительного механизма ДШР компактной и наглядной вне зависимости от сложности его кинематической структуры. Облегчается описание кинематики незакрепленного к стойке древовидного механизма с помощью рекуррентных соотношений, систем координат Денавита-Хартенберга. При этом используется богатый математический аппарат, разработанный для промышленных роботов, упрощается процесс программирования на ЭВМ.

Элементы матричного уравнения динамики исполнительного механизма ДШР получены с помощью рекурсивных алгоритмов, основанных на использовании уравнений Ньютона-Эйлера. Уравнения неупругих внешних связей, наложенных на исполнительный механизм, получены двойным дифференцированием уравнений голономных связей и однократным дифференцированием неголономных. Для упругих внешних связей записаны матричные уравнения, определяющие их влияние на обобщенные силы в зависимости от текущих обобщенных координат и скоростей исполнительного механизма.

Математическая модель ЭГП определяет зависимость обобщенных сил в управляемых степенях подвижности от управляющих сигналов, поступающих от системы управления, и текущих значений параметров состояния исполнительного механизма ДШР. При этом учитываются сжимаемость жидкости, возможность возникновения кавитации и нелинейный характер трения в уплотнениях гидродвигателей. В качестве исполнительных гидродвигателей приняты гидроцилиндры с непроходными штоками, установленные на исполнительном механизме враспор. Электрогидравлические усилители — двухкаскадные, типа сопло-заслонка-золотник. Их динамические свойства представлены колебательными звеньями второго порядка. Математическая модель ЭГП соответствует приводу, установленному на лабораторном образце ДШР, который рассматривается в данной работе.

Получены также уравнения, описывающие движение ДШР под воздействием ударов и при изменении внешних связей.

Полное матричное уравнение динамики системы ЭГП ДШР приведено к следующему виду:

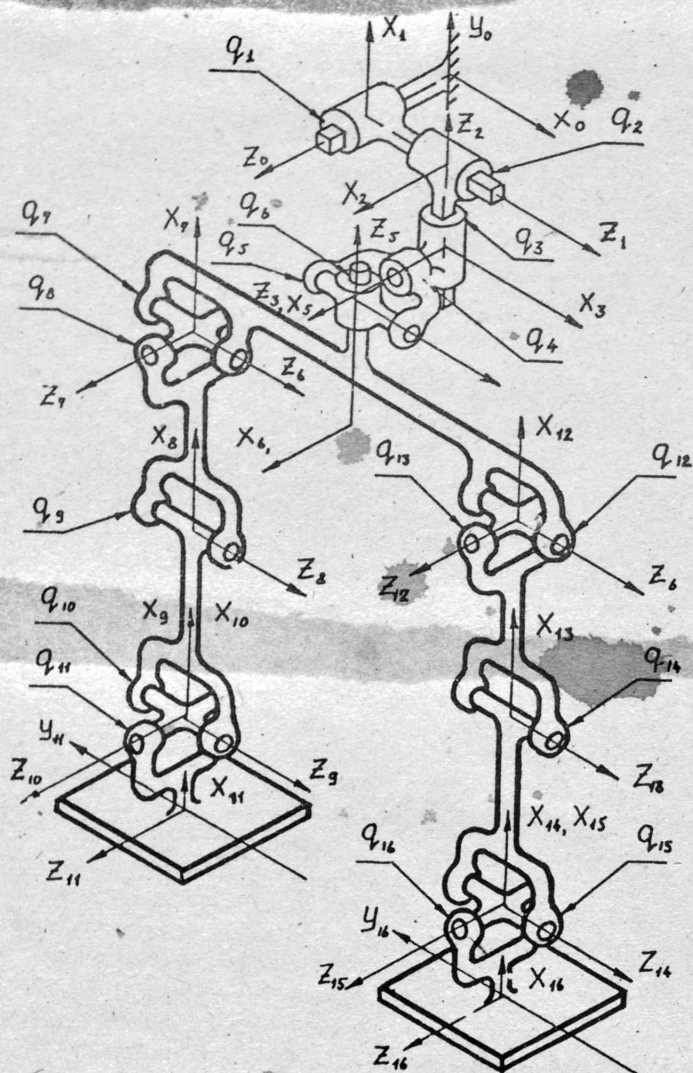


Рис. 1. Кинематическая схема ДПР.

$$\begin{bmatrix} I_{II} & I_{IR}^T & J_I^T \\ \dots & \dots & \dots \\ I_{IR} & I_{RR} & J_R^T \\ \dots & \dots & \dots \\ J_I & J_R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_I \\ \dots \\ \dot{q}_R \\ \dots \\ R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{свI} \\ \dots \\ H_{свR} \\ \dots \\ P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_I \\ \dots \\ H_R \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ Q \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где I – матрица инерции,

J – матрица левых частей уравнений внешних связей относительно ускорений,

$\dot{q}$ – обобщенные ускорения,

R – матрица реакций связей,

$H_{св}$ – матрица внешних упругих связей, наложенных на исполнительный механизм,

H – матрица внешних и центробежных сил,

P – матрица правых частей уравнений связей,

Q – матрица обобщенных сил.

Индексами I и R обозначены соответственно подматрицы, соответствующие фиктивным и реальным звеньям кинематического дерева.

Полученная математическая модель системы ЭП ДШР учитывает основные особенности исполнительных механизмов ДШР, и гидравлических приводных устройств, необходимых для осуществления квазистатической ходьбы. Использование данной математической модели может быть полезно как при проектировании и исследовании системы приводов ДШР, так и в процессе управления его движением.

Третья Глава посвящена разработке принципов управления системой ЭП ДШР в режиме квазистатической ходьбы. Для управления движением ДШР разработаны: алгоритмы решения обратной задачи кинематики ДШР с учетом наложенных внешних связей, положения центра масс исполнительного механизма и кинематических ограничений; принципы использования информации о силах и моментах взаимодействия ДШР с опорной поверхностью. Предложена структура системы ЭП ДШР в режиме квазистатической ходьбы. Произведено исследование на ЭВМ разработанных алгоритмов. С использованием разработанной в предыдущей главе математической модели на ЭВМ проведено моделирование квазистатической ходьбы ДШР, оснащенного предложенной системой приводов, оценены соответствующие энергозатраты.

Предложенный принцип решения обратной задачи кинематики основан на использовании обобщенной обратной матрицы Якоби, учитывающей положение опорной стопы и позволяющий управлять не только перемещением переносимой стопы, но и вертикальной проекции центра

масс ДППР. Это позволяет в процессе движения удерживать центр масс (ЦМ) ДППР над площадью опоры, что необходимо для обеспечения статической устойчивости при использовании кинематических алгоритмов управления. Желаемое приращение обобщенных координат вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta q = J^{-1} \cdot \Delta S,$$

где J^{-1} — обобщенная обратная матрица Якоби,

ΔS — вектор ошибки позиционирования переносимой стопы и вертикальной проекции ЦМ.

Обобщенная обратная матрица Якоби вычисляется по формуле:

$$J^{-1} = A^{-1} J^T (J A^{-1} J^T)^{-1},$$

где J — матрица Якоби, связывающая между собой малые приращения управляемых обобщенных координат и координат и ориентации переносимой стопы, положения вертикальной проекции ЦМ ДППР,

A — симметричная положительноопределенная матрица весовых коэффициентов, которая используется для учета кинематических ограничений в степенях подвижности и обеспечения их нерассогласованного движения.

В диссертации предложен алгоритм формирования такой матрицы Якоби, учитывающий наложенные на ДППР внешние связи. Используемая матрица весовых коэффициентов A — диагональная, причем каждый элемент учитывает текущее значение и направление изменения соответствующей обобщенной координаты. Благодаря этому удается преодолеть кинематическую избыточность исполнительного механизма и удерживать текущие значения обобщенных координат в оптимальных пределах. Кроме того, при выходе какой-либо степени подвижности на упор, для продолжения решения обратной задачи не требуется изменять структуру уравнений. Имеется алгоритм контроля попытки системы управления обработать кинематически нереализуемую конфигурацию исполнительного механизма.

Исследования предложенного принципа решения обратной задачи кинематики ДППР на ЭВМ показали его более высокую эффективность, надежность и низкую трудоемкость по сравнению с ранее предлагавшимися итерационными алгоритмами, основанными на минимизации целевой функции. Это позволяет использовать его для управления системой приводов ДППР в реальном времени с помощью бортовой системы ЭВМ.

Силы и моменты взаимодействия ДППР с опорной поверхностью во многом определяют характер его движения и несут в себе информацию,

которая может быть использована при управлении движением. Величины этих сил зависят от текущей конфигурации исполнительного механизма, скоростей и ускорений в управляемых и неуправляемых степенях подвижности, моментов, развиваемых приводами, характера опорной поверхности.

Во-первых, по информации от силомоментных датчиков стоп можно определить положение точки нулевого момента, которая в процессе квазистатической ходьбы должна всегда находиться в пределах площади опоры.

$$\begin{aligned}x_{OM} &= -M_y / F_z \\ y_{OM} &= M_x / F_z\end{aligned}$$

Здесь x_{OM} и y_{OM} - горизонтальные координаты точки нулевого момента,

M_x , M_y и F_z - проекции сил и моментов, действующих на ДШР со стороны опорной поверхности.

Положение точки нулевого момента может служить критерием для перехода на динамические алгоритмы управления.

Во-вторых, при соблюдении определенных условий, они позволяют вычислить положение вертикальной проекции ЦМ, что делает возможной коррекцию работы кинематического алгоритма управления и позволяет при наличии у ДШР инерциальной системы корректировать ее ошибки. Для этого в данной работе предложен принцип, основанный на использовании упрощенных алгоритмов вычисления с одновременной оценкой степени их точности с помощью специального критерия:

$$x_{ЦМ} = \frac{\frac{J_y}{mZ_{ЦМ}} F_x - M_y}{mg}$$

$$y_{ЦМ} = \frac{\frac{J_x}{mZ_{ЦМ}} F_y + M_x}{mg}$$

$$K = |I_{IR}^T \dot{q}_R|$$

Здесь $x_{ЦМ}$, $y_{ЦМ}$ и $z_{ЦМ}$ - координаты ЦМ ДШР,

m - масса ДШР,

J_x и J_y - моменты инерции ДШР как твердого тела,

F_x , F_y , M_x , M_y - проекции сил и моментов, действующих на ДШР со стороны опорной поверхности,

K — специальный критерий,

I_{IRr}^T — подматрица матрицы инерции, определяющая взаимовлияние неуправляемых поступательных и управляемых степеней подвижности.

В-третьих, соотношение сил и моментов на стопах зависит от характера их контакта с опорной поверхностью (плотности прилегания, перекосов ит.д.). В данной работе предложен принцип определения поправок, которые нужно внести в программное движение для обеспечения более стабильного контакта стоп ДШР с опорной поверхностью. Этот принцип основан на определении взаимного положения стоп и опорной поверхности по сигналам СМД с учетом податливости стоп. Применение соответствующих алгоритмов кроме повышения запаса устойчивости позволяет определять реальный рельеф опорной поверхности в точке постановки переносимой стопы и адаптироваться к нему, что не всегда возможно сделать с помощью других средств очувствления.

Проведенное математическое моделирование показало эффективности разработанных алгоритмов обработки информации о силах и моментах взаимодействия ДШР с опорной поверхностью.

Сделан вывод, что для обеспечения качественной работы системы приводов и обеспечения возможности адаптации ДШР к опорной поверхности с помощью СМД целесообразно использовать податливые стопы.

С использованием предложенных принципов разработана общая структурная схема построения системы приводов ДШР в режиме квазистатической ходьбы (рис. 2). Проведенное математическое моделирование предложенной системы показало ее высокую эффективность. В ходе математического моделирования оценивалась зависимость запаса статической устойчивости ДШР от скорости его движения (при заданных траекториях движения стоп и ЦМ). Анализ развиваемых обобщенных сил и скоростей, а также потребляемой системой ЭП мощности, показал обоснованность сделанных в первой главе оценок и выводов. Подтверждена возможность рассмотрения приводов в режиме квазистатической ходьбы как независимых.

Четвертая глава посвящена разработке экспериментального комплекса и исследованию с его помощью динамики системы ЭП и принципов управления ДШР. Комплекс включает в себя следующие основные части:

- исполнительный механизм,
- насосную станцию,

- систему управления,
- программное обеспечение,
- вспомогательное оборудование.

Исполнительный механизм имеет 10 управляемых степеней подвижности, оснащенных электрогидравлическими следящими приводами. Его масса - 160 кг. Трехпроцессорная система управления под управлением специального программного обеспечения обеспечивает возможность реализации программного движения с одновременной регистрацией поступающих данных по 50 каналам.

В процессе проведения эксперимента ДШР перемещался по ровной горизонтальной поверхности в рамках квазистатической ходьбы. Программа движения, т.е. зависимость изменения управляемых обобщенных координат от времени, была сформирована с помощью описанного в третьей главе алгоритма решения обратной задачи кинематики по тем же исходным данным, что использовались при математическом моделировании. При этом длина шага составляла 0.1 м, темп движения - 1 цикл (два шага) за 15 с. В процессе движения контролировались желаемые и действительные значения обобщенных координат, сигналы, поступающие от силомоментных датчиков стоп. Характер движения ДШР соответствовал тому, что было получено при математическом моделировании.

В процессе экспериментального исследования были решены следующие задачи:

- получены экспериментальные данные о динамике изменения управляемых обобщенных координат в процессе квазистатической ходьбы,
- измерены силы и моменты взаимодействия ДШР с опорной поверхностью и исследовано поведение точки нулевого момента,
- оценена адекватность разработанной математической модели системы ЭП ДШР,
- оценена работоспособность разработанных принципов управления движением ДШР в процессе квазистатической ходьбы.

Результаты исследований, проведенных на экспериментальном комплексе, показали его высокую эффективность, подтвердили адекватность разработанных математических моделей, целесообразность использования предложенных принципов построения системы ЭП и управления при создании перспективных ДШР.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для управления системой ЭП ДШР в реальном времени целесообразно использовать алгоритм, основанный на использовании обобщенной обратной матрицы Якоби, учитывающей положение центра масс ДШР и наличие кинематических ограничений в управляемых степенях подвижности.

2. При проектировании и моделировании исполнительного механизма необходимо учитывать упругий характер контакта стоп с опорной поверхностью. Для обеспечения качественной работы системы приводов, возможности адаптации к опорной поверхности целесообразно использовать податливые стопы, оснащенные силомоментными датчиками.

3. ДШР, спроектированный для движения в режиме динамической ходьбы, в рамках квазистатической ходьбы использует лишь небольшую долю располагаемой мощности приводов, что значительно снижает взаимовлияние приводов через исполнительный механизм, делает малозаметным изменение энергетических свойств механизма вследствие изменения конфигурации в процессе движения.

4. Для определения положения проекции центра масс ДШР на опорную поверхность по сигналам СМД стоп целесообразно использовать упрощенный алгоритм, использующий специальный критерий, позволяющий оценить точность получаемого результата.

5. Для проведения научных исследований и опытно-конструкторских разработок ДШР целесообразно использовать созданный экспериментальный комплекс.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Ковальчук А.К., Семенов С.Е., Яроц В.В., Автоматизированный расчет мощности электрогидравлических приводов двуногого шагающего робота // Актуальные проблемы повышения качества современного энергомашиностроения: Тезисы докладов межреспубликанской студенческой научной конференции. -М., 1988.-С.46.

2. Бакунов Е.В., Ковальчук А.К., Семенов С.Е. Автоматизированный вывод уравнений динамики двуногого шагающего робота // Актуальные проблемы машиноведения: 12 юбилейная конференция молодых ученых. -М., ИМАШ, 1989.-С.15.

3. Ковальчук А.К., Лобачев В.И., Семенов С.Е. Универсальный

комплекс для отработки и исследования двуногих шагающих роботов
//5 Всесоюзное совещание по робототехническим системам. -Геленд-
жик, 1990.-С.98.