

И 86 736

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

УДК 629.11.012: 621.865.8

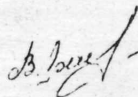
ЯРОЦ ВАЛЕРИЯ ВЛАДИМИРОВИЧ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВУНОГИМ ПЕШАЮЩИМ РОБОТОМ
С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ПРИВОДАМИ

05.02.03 – Системы приводов

05.02.05 – Роботы, манипуляторы и робототехнические
системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники
РСФСР, д.т.н., профессор

Прокофьев В.Н.

Научный консультант - кандидат технических наук,
доцент КОВАЛЬЧУК А.К.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор,
академик ПУПКОВ К.А.
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
БУДАНОВ В.М.

Ведущее предприятие - ЦНИМАиГ, г.Москва

Защита диссертации состоится "28" декабря " 1992 г.
на заседании специализированного
ордена Ленина, ордена
Красного Знамени госуда
Н.Э.Баумана по адресу
С диссертацией мож
Баумана.

Ваши отзывы в двух
высылать по указанном
Исходящие присутств
вестить Совет письмам
седателя Совета. Теле
Автореферат разося

Ученый секретарь с
Совета, к.т.н., до

Подписано к печати
Заказ № 603

М 86736

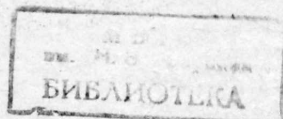
Актуальность. Выполнение различного рода работ в экстремальных средах всегда связано с присутствием человека. В соответствии с проводимыми на кафедре "Гидромашины, гидрорезовоавтоматика и гидропривод" (3-10) МГТУ им. Н.Э.Баумана научно-исследовательскими работами в 1985 году начата разработка электрогидравлического двуногого шагающего манипуляционного робота (ДШР), способного выполнять поставленные перед ним задачи, а в ряде случаев - избавить человека от необходимости присутствовать в экстремальной среде. К настоящему времени при непосредственном участии автора создан исполнительный механизм (педипуляторы) данного робота, который именуется в дальнейшем как двуногий шагающий робот (ДШР).

Достигнутый к настоящему времени уровень по теории управления движением статически устойчивых шагающих роботов, создание соответствующей элементной базы вычислительной техники, разработка бортовых систем управления движением и достижения в области систем управления электрогидравлических следящих приводов (ЗГСП) сделали реальным создание экспериментальных образцов двуногих шагающих роботов с электрогидравлическими приводами.

Следует подчеркнуть, что существующие в настоящее время манипуляционные роботы имеют соотношение грузоподъемности к собственной массе 1:6 - 1:20. Педипуляторы же автономного ДШР (которые можно рассматривать как специализированные манипуляторы) должны обеспечивать перенос не только собственной массы, но и массы автономного источника энергии, гидравлической станции питания, системы управления и полезной нагрузки (исследовательской аппаратуры, груза или орудий труда). Одним из факторов, сдерживающих использование ДШР, являются вопросы стабилизации двуногого шагающего робота во время ходьбы, а также резкое увеличение энергозатрат на его перемещение с ростом скорости движения.

Этим определяется актуальность исследования кинематики и динамики, анализа и синтеза систем стабилизации и управления движением статически и динамически неустойчивых двуногих шагающих роботов, необходимых конструктору при их проектировании для оптимизации конструкции.

Имеется значительное количество работ, посвященных решению проблем управления динамическими режимами движения роботов, перемещающихся с помощью ног, и проблем их создания. Работы по



создании таких роботов ведутся в СНГ, США, Японии, Франции, Англии, Италии, Югославии и Китае.

Актуальность темы диссертации подтверждена тем, что она подготовлена по результатам работ, полученных при выполнении государственной научно-технической программы "Интеллектуальные системы", а также в ходе выполнения ряда других хозяйственных НИР.

Цель работы - разработка системы управления двуногого шагающего робота и реализация на ее основе алгоритмов управления его движением на экспериментальном комплексе.

Объект исследования - двуногий шагающий робот, созданный на кафедре "Гидромашины, гидронепневоавтоматика и гидропривод" (9-10) МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методы исследования. При решении указанных задач в работе используются методы теории автоматического управления, аналитической механики и динамики, прикладной гидродинамики, математическое и графическое моделирование, а также экспериментальное исследование на полунатурном моделирующем комплексе.

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

- методика определения требований к точности управления ДНР вблизи объекта работ;
- разработана обобщенная математическая модель двуногого шагающего робота, включающая в себя математическую модель исполнительного механизма, гидропривода и алгоритмы управления;
- разработан алгоритм управления ДНР, позволяющий осуществлять статическую ходьбу робота по ровной горизонтальной поверхности;
- создан статически устойчивый двуногий шагающий робот с электрогидравлическими приводами, служащий основой для дальнейших исследований систем управления ДНР.

Достоверность результатов. Результаты аналитических исследований подтверждены при графическом моделировании движения ДНР на персональной ЭВМ типа IBM PC.

Рациональный выбор кинематической схемы исполнительного механизма, а также результаты теоретических исследований подтверждены при экспериментальном исследовании ходьбы двуногого шагающего робота в режиме статической устойчивости по ровной горизонтальной поверхности.

Исследования основаны на современных средствах измерения и

методах обработки результатов экспериментальных данных.

Практическая ценность работ состоит в следующем:

- предложенная методика определения требований к точности управления ДНР вблизи объекта работ позволяет обоснованно назначить требования к точности системы управления;
- разработанные математические модели системы управления ДНР могут быть использованы при проектировании перспективных шагающих роботов;
- разработаны научно-методические основы, необходимые для создания систем управления ДНР с элементами искусственного интеллекта, которые представляют интерес при проектировании систем управления ДНР.

Разработанные принципы построения экспериментального комплекса являются эффективным средством отработки и сравнительного анализа различных систем управления на ранних стадиях проектирования.

Реализация результатов работы. Разработанные в диссертации теоретические положения, методики и рекомендации по проектированию электрогидравлических двуногих шагающих роботов внедрены:

- в Московском авиационном институте им.С.Орджоникидзе при выполнении госбюджетной научно-технической программы "Интеллектуальные системы" (Раздел: "Разработка теории построения и моделирования интеллектуальных систем"; II. "Разработка теории построения и экспериментальное исследование на полунатурном моделирующем комплексе интеллектуального двуногого шагающего манипуляционного робота и интеллектуальных подвижных роботов других типов"), выполняемой по Приказу N 701 от 3.08.89 г. Госкомитета СССР по народному образованию;
- в НПО Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии.

Использование результатов работы при решении названных задач подтверждается актами о внедрении.

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

- ежегодных научных семинарах кафедры 3-10 МГТУ им.Н.Э.Баумана (1986-1991 гг.);
- межвузовской научно-технической конференции "Прогрессивные технологии и конструкции, механизация и автоматизация производственных процессов в машино- и приборостроении" (Калуга, 1987 г.);

- межреспубликанской студенческой научной конференции "Актуальные проблемы повышения качества современного энергомашиностроения" (Москва, 1988 г.);

- XII Юбилейной конференции молодых ученых Института машиноведения АН СССР "Актуальные проблемы машиноведения" (Москва, 1989 г.);

- Всесоюзной научно-технической конференции "Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем" (Калуга, 1989 г.);

- Всесоюзном семинаре по механике и управлению движением роботами с элементами искусственного интеллекта (Москва, 1990, 1991 гг.);

- V Всесоюзном совещании по робототехническим системам (Геленджик, 1990 г.).

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 9-ти научных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по результатам каждой из глав, заключения, приложений и списка литературы. Общий объем работы содержит 110 страниц машинописного текста, 31 таблицу, 52 рисунка, 83 страницы приложений, список литературы из 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертационной работе обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, представляемые автором на защиту. Дан обзор литературы отечественных и зарубежных авторов, посвященной проблемам создания систем управления двуногих шагающих роботов.

В первой главе проводится обзор систем управления экспериментальных двуногих шагающих манипуляционных роботов (ДМР), который показал, что в настоящее время в СНГ не существует ДМР, способного выполнять рабочие операции в опасных для человека условиях.

В настоящее время, в связи с бурным развитием средств вычислительной техники, интерес к проблеме управления ходьбой значительно возрос. В зарубежной литературе обсуждаются возможности применения шагающих роботов в военных целях, для контроля послед-

ствий ядерного, химического и биологического нападения, проведения аварийно-спасательных работ или ликвидации последствий стихийных бедствий.

Обоснована необходимость и целесообразность использования в созданном экспериментальном образце ДШР электрогидравлического следящего привода и показано, что применение таких шагающих роботов особенно эффективно при выполнении сложных пространственных движений в процессе передвижения и для работ во взрыво- и пожароопасной среде, не допускающей использования электрических устройств.

Излагаются результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию требований к точности управления ДШР вблизи объекта работ.

Экспериментальные исследования позволили установить зависимости между математическим ожиданием $M[T]$, вероятностью выполнения типовой рабочей операции P , дисперсией времени ее выполнения $D[T]$ при следующих способах наблюдения - непосредственным, с помощью моно-TV, с помощью стерео-TV.

Проведенный обзор систем управления экспериментальных образцов ДШР показал, что исследования в данном направлении в должной мере не решены и требуют дальнейшего развития.

В связи с этим в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Определение требований к точности управления ДШР вблизи объекта работ.
2. Разработка обобщенной математической модели двуногого шагающего робота.
3. Разработка алгоритмов управления движением ДШР по ровной горизонтальной поверхности.
4. Исследование на ЦВМ динамики системы управления ДШР.
5. Создание экспериментального комплекса для исследования системы управления ДШР.
6. Экспериментальное исследование системы управления ДШР, на экспериментальном комплексе.

Во второй главе разработаны математические модели и алгоритмы управления движением ДШР по ровной горизонтальной поверхности в режиме статической ходьбы.

Согласно литературным данным человек насчитывает 327 пар мышц. При современном состоянии науки невозможно управлять много-

звенной системой с таким количеством приводов двустороннего действия.

Исследования и оптимизация динамики движения статически устойчивых двуногих шагающих роботов методом математического моделирования проводились в работах В.В.Белецкого, Ю.Ф.Голубева, Е.А.Девянина, В.В.Лапшина, В.Б.Ларина, Д.Е.Охоцимского, А.М.Формальского и др., но в предположении невесомости ног и идеальности двигателей в шарнирах ног.

Математическая модель исполнительного механизма (ИМ) ДНР с переменной структурой и наложенными внешними динамическими связями, кинематическая схема которого приведена на рис.1, разработана в предположении весомого корпуса на весомых ногах, каждая из которых имеет пять степеней подвижности (две степени подвижности в стопе – вращения вокруг поперечной и продольной осей; одна степень в колене – поперечная ось; две степени в бедре – вращения вокруг поперечной и продольной осей).

Динамика исполнительного механизма описывается следующими уравнениями, полученными из общего уравнения динамики:

$$\sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial \dot{q}_i} (m_i \bar{a}_i - \bar{F}_i) + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial \dot{q}_i} \left[\bar{\omega}_i * (J_i \bar{\omega}_i) + J_i \bar{\varepsilon}_i - \bar{M}_i \right] \right\} = \bar{Q}_i, \quad (1)$$

где $1 \leq i \leq N$, $i=1,2,\dots,N$; $\bar{F}_i$ – главный вектор внешних сил, действующих на i -е звено; $\bar{M}_i$ – главный момент внешних сил, действующих на i -е звено; $\bar{Q}_i$ – вектор обобщенных сил; m_i – массы звеньев ДНР; $\bar{a}_i$ – вектор линейного ускорения центра масс i -го звена; $\bar{U}_i$ – вектор линейной скорости центра масс i -го звена; $\bar{\omega}_i$ – вектор угловой скорости центра масс i -го звена; J_i – момент инерции i -го звена; $\dot{q}_i$ – производная обобщенной координаты i -го звена.

Система дифференциальных уравнений движения механизма с дополнительными связями на основе уравнения (1) имеет вид:

$$\begin{pmatrix} I & -J^T \\ -J & \emptyset \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\bar{q}} \\ \bar{\lambda} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H \\ -P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Q}_i \\ \emptyset \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $I(q)$ – $(N \times N)$ – положительно определенная симметричная матрица инерции; $H(q, \dot{q})$ – матрица приведенных сил от обобщенных скоростей и внешних нагрузок; $J(q)$ – $(6 \times N)$ – матрица Якоби, зави-

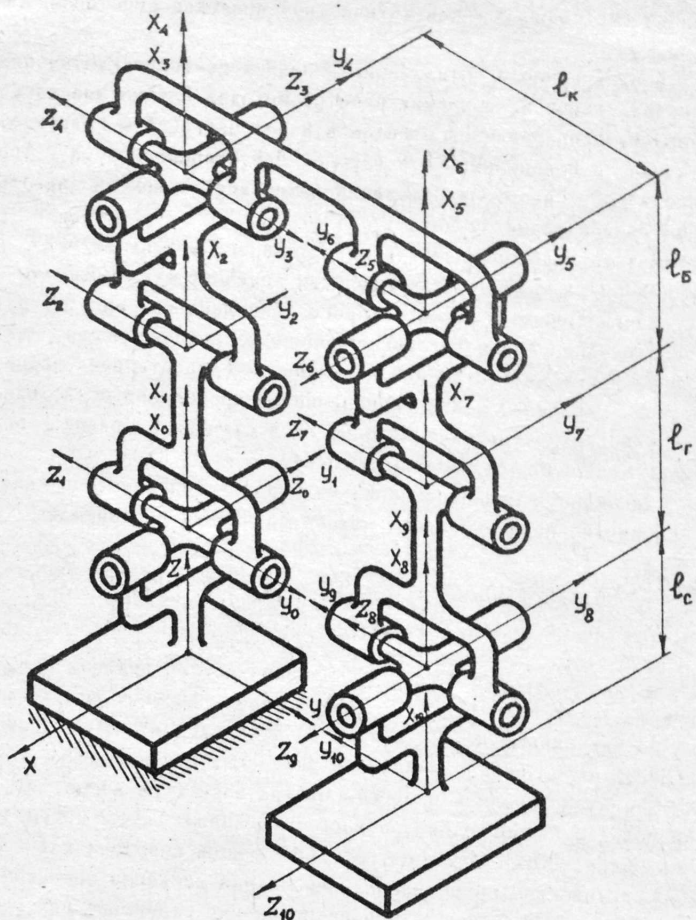


Рис. 1 . Кинематическая схема исполнительного механизма двуногого шагающего робота при опоре на правую ногу

сящая от конфигурации механизма; $P(q) - (N \times 1)$ - матрица правых частей уравнений связей.

Разработанная математическая модель электрогидравлического следящего привода наиболее полно учитывает нелинейные характеристики и гидродинамические процессы в гидроусилителе и исполнительном гидроцилиндре, за исключением следующих допущений:

- схема гидравлического моста считается симметричной;
- пренебрегается инерционной составляющей при определении гидродинамической силы со стороны потока на золотник.

Система уравнений, описывающих гидромеханические процессы в гидроцилиндре при движении поршня, может быть представлена в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} m_n \frac{d^2 y_n}{dt^2} &= F_n^H p_a - F_n^W p_b - b_n \frac{dy_n}{dt} - R_{трn} - R_{вн}; \\ m_n \frac{d^2 y_n}{dt^2} &= F_n^W p_b - F_n^H p_a - b_n \frac{dy_n}{dt} - R_{трn} + R_{вн}; \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где m_n - приведенное значение массы поршня и жидкости в гидроцилиндре и силовых гидролиниях; y_n - координата перемещения поршня гидроцилиндра; F_n^H - эффективная площадь поршня со стороны нештоковой полости гидроцилиндра; F_n^W - эффективная площадь поршня со стороны штоковой полости гидроцилиндра; p_a, p_b - давления в рабочих полостях гидроцилиндра; b_n - коэффициент демпфирования поршня гидроцилиндра; $R_{трn}$ - сила трения, действующая на поршень гидроцилиндра; $R_{вн}$ - внешняя сила, приложенная к штоку поршня.

Приведенные выше системы уравнений (2) и (3) движения ДЭР, описывающие динамику исполнительного механизма и систему приводов, образуют обобщенную математическую модель ДЭР, которая в линеаризованном виде может быть представлена следующим образом:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad (4)$$

где $x(t) = \{x_1(t), \dots, x_n(t)\}$ - N -мерный вектор состояния модели i -го привода в момент времени t ; $u(t) = \{u_1(t), \dots, u_n(t)\}$ - N -мерный вектор управления, вырабатываемый управляющей системой; $A(t)$ - $(N \times N)$ - квадратная матрица динамических параметров объекта; $B(t)$ - $(N \times M)$ - прямоугольная матрица эффективности управляющих воздействий; t - текущее время.

В данной главе также разработан алгоритм управления движени-

ДПР, позволивший осуществить:

- автоматическое управление движением ДПР в режиме статической ходьбы;
- автоматическую координацию движения переносимой стопы с целью достижения ей целевого положения;

Структурная схема системы управления движением ДПР приведена на рис.2, где T_N^0 - матрица текущего состояния конечного звена (стопы); T_N^i - матрица целевого состояния конечного звена, которые в свою очередь равны:

$$T_N(\bar{q}) = T_0 A_1(\bar{q}) \dots A_N(\bar{q}) = T_0 \prod_{i=1}^N A_i(\bar{q}) = \begin{bmatrix} \bar{x}_i & \bar{y}_i & \bar{z}_i & | & \bar{r}_i \\ \hline \emptyset & \emptyset & \emptyset & | & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{R}_i & | & \bar{r}_i \\ \hline \emptyset & | & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $i=1, 2, \dots, N=10$ - число степеней подвижности механизма; T_0 - матрица однородного преобразования координат точки в различных системах координат; A_i - матрица преобразования Денавита-Хартенберга для смежных систем координат с номерами i и $(i-1)$; $[\bar{x}_i \ \bar{y}_i \ \bar{z}_i]$ - матрица, определяющая ориентацию i -й системы координат, связанной с i -м звеном, по отношению к базовой системе координат; $\bar{r}_i$ - вектор, соединяющий начало базовой системы координат с началом i -й системы координат.

Решение обратной задачи кинематики выполнено методом сопряженных градиентов при разделении шага ДПР на две фазы движения:

- перенос незакрепленной стопы с удержанием центра масс робота над опорной поверхностью;
- перенос центра масс робота с одной стопы на другую и смена опорной ноги.

Третья глава посвящена исследованию на ЦВМ кинематики исполнительного механизма и динамики системы управления ДПР.

Для решения на ЦВМ обратной задачи кинематики и формирования траектории движения двуногого шагающего робота написаны соответствующие программы, тексты которых приведены в приложении к диссертации. При статическом движении для поддержания ДПР следует добиться того, чтобы проекция центра тяжести ДПР не выходила за пределы, ограниченные опорной плоскостью.

Разработанная обобщенная математическая модель ДПР позволяет эффективно вычислять динамические параметры шагающего робота при изменении геометрических и масс-инерционных характеристик его звеньев.

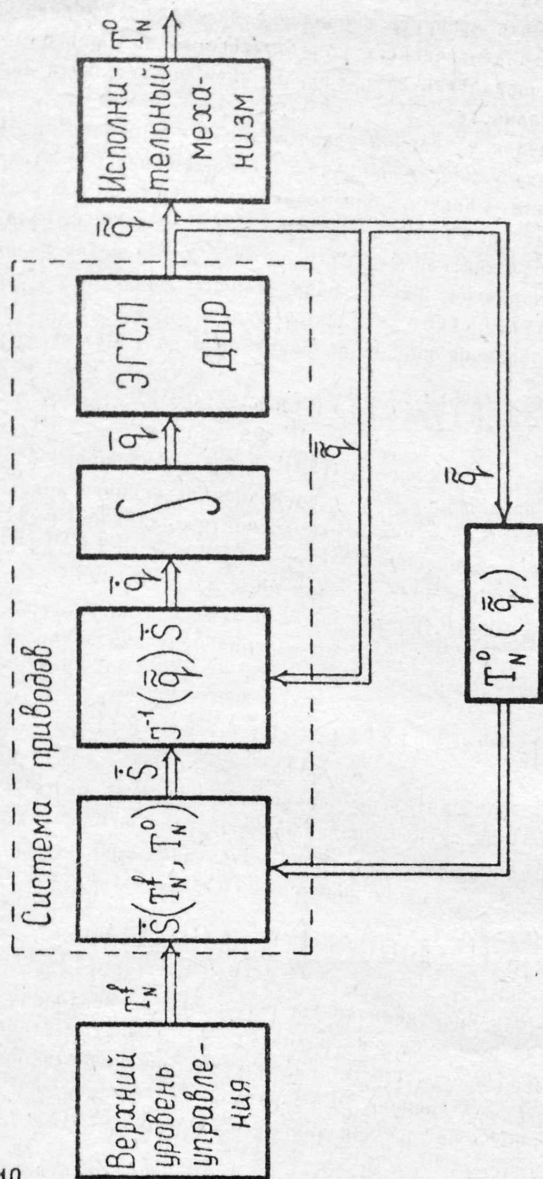


Рис. 2. Структурная схема системы управления движением ДШР

Методы теории оптимизации по квадратичным функционалам позволили синтезировать алгоритм управления нелинейной системы. Она разрешает задачи аналитического конструирования до конца в общем виде, позволяет определить структуру законов управления и выявить их общие закономерности.

Рассматриваемое в данной главе оптимальное управление базируется на линеаризованных уравнениях движения в окрестности номинальной траектории. Номинальная траектория определяется интерполированной траекторией сочленения, когда угловая координата известна в каждый дискретный момент времени. Такой метод позволяет свести задачу управления ДУР от номинального управления к управлению линейной системой вдоль заданной траектории.

Дискретизированное уравнение линейной модели (4) имеет вид:

$$x[(k+1)T] = F(kT)x(kT) + G(kT)u(kT), \quad (6)$$

где T - период дискретизации; $u(kT)$ - M -мерный кусочно-постоянный входной вектор управления $u(t)$ на интервале времени между двумя любыми последовательными моментами дискретизации $kT \leq t \leq (k+1)T$; $x(kT)$ - N -мерный возмущенный вектор состояния; $F(kT)$ и $G(kT)$ соответственно матрицы размерностью $(N \times N)$ и $(N \times M)$.

Закон управления строится путем нахождения оптимального управления $u_0(t)$, минимизирующего рабочий критерий и удовлетворяющего требованиям уравнения (6):

$$J(k) = \frac{1}{2} [x^T(k+1)Qx(k+1) + u^T(k)Ru(k)], \quad (7)$$

где Q - полуоположительно определенная весовая матрица;
 R - положительно определенная весовая матрица.

Оптимальное управление, минимизирующее функционал (7) и удовлетворяющее требованиям уравнения (6), имеет вид:

$$u_0(k) = -[R + G^T(k)QG(k)]^{-1}G^T(k)QF(k)x(k). \quad (8)$$

В результате проведенного динамического исследования ДУР получены значения обобщенной координаты q_i в каждой степени подвижности робота и построены графические зависимости обобщенной координаты q_i от времени t в каждой из степеней.

Произведен расчет на ЦВМ моментов и мощностей в степенях

подвижности ДНР при совершении им одного шага движения. Эти исследования выполнены в связи с проектированием и созданием экспериментального образца ДНР и подтверждают целесообразность использования в нем электрогидравлических приводов.

Результаты исследования принципов управления динамической устойчивости ДНР приведены на рис.3 в виде графического моделирования движения робота на персональной ЭВМ в течение одного цикла ходьбы.

Полученные результаты полностью подтвердили работоспособность разработанной обобщенной математической модели системы управления ДНР, позволяющей эффективно вычислять динамические параметры робота при изменении геометрических и масс-инерционных характеристик его звеньев.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментальных исследований системы управления двуногого шагающего робота на экспериментальном комплексе.

При экспериментальных исследованиях решаются следующие задачи:

- реализация на экспериментальном комплексе алгоритмов управления движением ДНР в режиме статической ходьбы;
- исследование динамики системы управления ДНР.

Экспериментальные исследования проводились на созданном на кафедре Э-10 МГТУ им.Н.Э.Баумана при непосредственном участии автора экспериментальном комплексе, предназначенном для исследования системы управления ДНР.

В состав комплекса входят следующие основные части:

- исполнительный механизм (педипуляторы) ДНР, имеющий 10 управляемых степеней подвижности (по 5 степеней подвижности в каждой ноге);
- гидравлическая станция питания;
- многопроцессорная система управления ДНР на базе микро-ЭВМ "Электроника ИС 1201.02".

Двуногий шагающий робот имеет следующие основные параметры: высота - 1,0 м; длина ног - 0,9 м; вес - 140 кг. При проектировании робота большое внимание было уделено его компактности и надежности. Гидравлические приводы ДНР выполнены в виде единого электрогидравлического модуля (гидроцилиндр, электрогидравлический усилитель-ЗГУ, переходная плата).

Экспериментальные исследования проводились с целью получе-

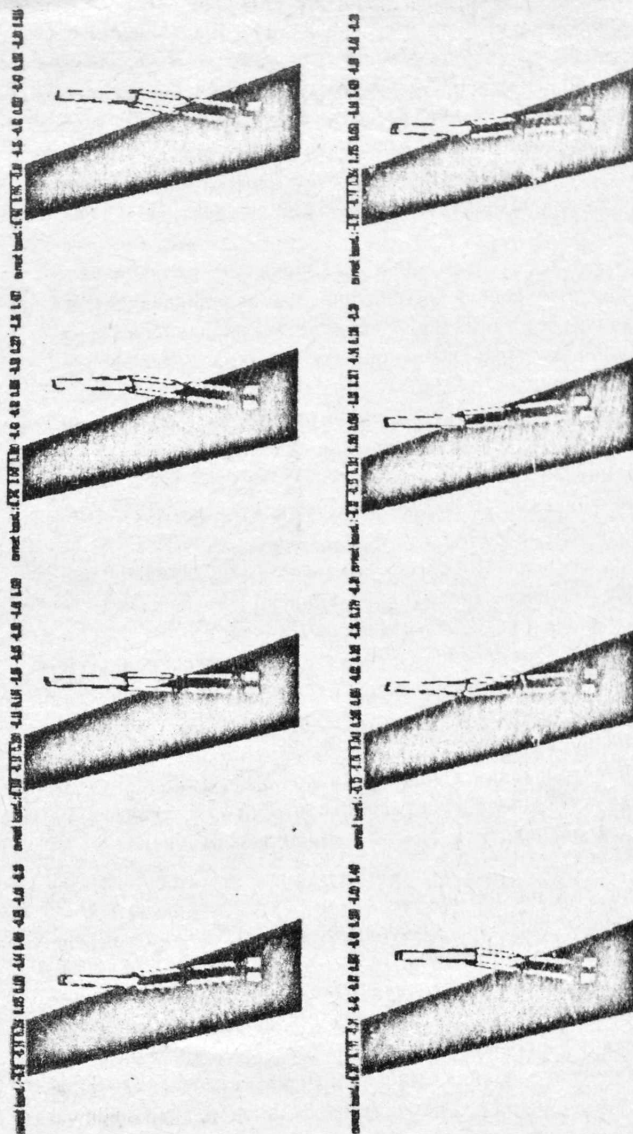


Рис. 3 . Графическое моделирование движения двуногого шагающего робота по ровной горизонтальной поверхности

ния информации об изменении угловых перемещений в степенях подвижности ДНР и сравнения ее с теоретически полученными результатами, во время выполнения роботом различных движений:

- при подаче на каждый привод ступенчатого воздействия;
- при ходьбе робота по ровной горизонтальной поверхности.

Полученные в ходе эксперимента данные обрабатывались на персональной ЭВМ, с помощью которой были построены графические зависимости обобщенной координаты от времени в каждой степени подвижности ДНР во время выполнения им различных движений.

Результаты исследований на экспериментальном комплексе подтвердили теоретические выводы, что дает все основания рекомендовать разработанные математические модели и алгоритмы управления движением ДНР для практического использования их при проектировании перспективных шагающих роботов с электрогидравлическими приводами.

В приложениях к диссертации представлены пакет прикладных программ для управления движением двуногого шагающего робота и акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для эффективного выполнения ДНР рабочих операций с помощью манипуляторов объект работ должен размещаться в пределах оптимальной рабочей зоны, размеры которой определяются кинематикой манипуляторов, требованиями к времени и вероятности их выполнения, а также условиями наблюдения. Размеры оптимальной рабочей зоны непосредственно определяют необходимую точность выведения ДНР к объекту работ.

2. Требования к точности системы управления робота целесообразно назначать исходя из необходимой точности выведения ДНР к объекту работ, обеспечивающей выполнение заданных рабочих операций.

3. Теоретические исследования системы управления робота необходимо проводить с использованием обобщенной математической модели, включающей в себя математическую модель исполнительного механизма, системы приводов и алгоритмы управления. Практический интерес представляет графическое моделирование движения ДНР на ПЭВМ.

4. Для реализации квазидинамического режима движения ДНР по

ровой горизонтальной поверхности возможно использование разработанных кинематических алгоритмов управления. При этом для решения задачи формирования управляющих сигналов на приводы целесообразно использовать итерационные методы решения обратной задачи кинематики.

5. Сформулированные в работе основы построения полунатурных моделирующих комплексов и методика экспериментального исследования системы управления позволили создать экспериментальный образец ДНР и провести его экспериментальные исследования. Для управления ДНР в реальном масштабе времени целесообразно использовать многопроцессорную систему управления.

6. Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований показал удовлетворительную сходимость полученных данных, что подтверждает адекватность разработанных математических моделей и алгоритмов управления движением ДНР.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Автоматизированный энергетический расчет приводов антропоморфного шагающего робота / А.К.Ковальчук, Р.Ш.Камаев, И.И.Степанова, В.В.Яроц // Прогрессивные технологии и конструкции, механизация и автоматизация производственных процессов в машино- и приборостроении: Тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции. -Калуга, 1987. -С.133-134.

2. Полунатурный моделирующий комплекс для исследования антропоморфных шагающих роботов / Е.В.Волков, А.К.Ковальчук, Р.Ш.Камаев, В.В.Яроц // Прогрессивные технологии и конструкции, механизация и автоматизация производственных процессов в машино- и приборостроении: Тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции. -Калуга, 1987. -С.134-135.

3. Ковальчук А.К., Яроц В.В., Губайдулин Д.В. Копирующее управление двуногим шагающим роботом // Актуальные проблемы повышения качества современного энергомашиностроения: Тезисы докладов межреспубликанской студенческой научной конференции. -И., 1988. -С.46.

4. Ковальчук А.К., Яроц В.В., Семенов С.Е. Автоматизированный расчет мощности электрогидравлических приводов двуножного шагающего робота // Актуальные проблемы повышения качества современного энергомашиностроения: Тезисы докладов межреспубликанской студен-

ческой научной конференции.-М., 1988.-С.46.

5. Автоматизированный вывод уравнений динамики двуногого шагающего робота / Е.В.Бакунов, А.К.Ковальчук, С.Е.Семенов, В.В.Яроц // Актуальные проблемы машиноведения: Тезисы докладов XII Юбилейной конференции молодых ученых Института машиноведения (ИМ) АН СССР.-М., 1989.-С.69.

6. Управление двуногим шагающим роботом на основе решения обратной кинематической задачи / А.К.Ковальчук, А.В.Николаев, С.В. Попко, В.В.Яроц // Актуальные проблемы машиноведения: Тезисы докладов XII Юбилейной конференции молодых ученых Института машиноведения (ИМ) АН СССР.-М., 1989.-С.37.

7. Ковальчук А.К., Лобачев В.И., Яроц В.В. О требуемой точности остановки подвижного манипуляционного робота вблизи объекта работ // Известия ВУЗов. Машиностроение.-1988.-№ 12.-С.33-37.

8. Ковальчук А.К., Яроц В.В., Волков Е.В. Синтез квазиоптимальной системы управления двуногим шагающим роботом вблизи объекта работ // Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции.-Калуга, 1989.-С.36-37.

9. Универсальный комплекс для отработки и исследования двуногих шагающих манипуляционных роботов // А.К.Ковальчук, В.И.Лобачев, В.В.Яроц и др. // Тезисы докладов V Всесоюзного совещания по робототехническим системам, г.Геленджик, октябрь 1990 г.-М., 1990.-Ч.2.-С.308.