

На правах рукописи  
УДК 004.896 : 621.865.8-8

Кулаков Дмитрий Борисович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА  
С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ПРИВОДАМИ ДЛЯ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДВУНОГОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

Специальности: 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной  
техники и систем управления  
05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические  
системы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва - 2009



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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Ковальчук Александр Кондратьевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Зенкевич Станислав Леонидович**

кандидат технических наук, доцент  
**Трипольский Павел Эдуардович**

Ведущая организация: **ОАО «ЦНИТИ»**

Защита диссертации состоится 19 января 2010 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана,  
по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направлять в адрес совета университета.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” декабря 2009 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

к.т.н., доцент Иванов В.А.

---



## Общая характеристика работы

**Актуальность.** С каждым годом в мире возникает все больше ситуаций, требующих от людей выполнения самых разнообразных работ в тяжелых, опасных, а подчас и несовместимых с жизнью условиях. Причем, чаще всего все это происходит в зданиях и различных сооружениях, в помещениях и в кабинах различной техники, т.е. в условиях, изначально созданных для человека, с учетом его типичных размеров, массы, двурукости, двуногости и кинематики тела. По этой причине, для выполнения таких работ наиболее целесообразным представляется использование робототехнического комплекса, включающего в себя антропоморфные двуногие шагающие роботы (ДШР). В настоящее время появляется всё больше сообщений из разных стран мира об очередных разработках ДШР. Проводимые работы нацелены на создание группы автономных ДШР, представляющих собой единую команду, самостоятельно решающую поставленные перед ней задачи. Среди работ по данной тематике, проводимых в нашей стране, можно выделить работы Белецкого В.В., Охоцимского Д.Е., Формальского А.М. и их коллег.

При проектировании ДШР большое значение имеет выбор исполнительных приводов. На ДШР с электроприводами могут использоваться: линейный электропривод, электропривод с планетарным редуктором, электропривод с волновым редуктором. В силу своих массогабаритных характеристик линейные приводы не позволяют реализовывать необходимые диапазоны изменений всех обобщённых координат. Электроприводы с редукторами имеют большие люфты, значительный вес и малую удельную энергоёмкость. Как показал проведённый анализ, для создания ДШР с массогабаритными параметрами человека и с учётом массы переносимого груза наиболее приемлемым является применение гидропривода. Он обладает большей энергоёмкостью, лучшими динамическими характеристиками и возможностью работать без применения редукторов в области малых изменений обобщённых координат, обеспечивая большие скорости их изменения, необходимые для движения ДШР в режиме динамической ходьбы, т.е. движения с учётом инерционных свойств механизма при ходьбе ДШР.

В результате можно констатировать целесообразность проведения исследований движения ДШР, оснащённого электрогидравлическими приводами, как наиболее перспективного антропоморфного робота с точки зрения удельной энергоёмкости. Разработка и исследование исполнительного механизма с электрогидравлическими следящими приводами для системы управления движением двуногого шагающего робота актуальна и является важной научно-технической задачей.

**Цель работы.** – создание исполнительного механизма двуногого шагающего робота, оснащённого электрогидравлическими следящими приводами.

### **Научные задачи:**

1. Формирование математической модели исполнительного механизма ДШР.

2. Определение структуры и параметров ЭГСП исполнительного механизма ДШР.

3. Определение законов управления исполнительным механизмом ДШР с ЭГСП, обеспечивающего реализуемую траекторию с минимальными моментами на стопах.

4. Разработка структуры и алгоритмов системы стабилизации движения ДШР с ЭГСП, обеспечивающей его движение по горизонтальной плоскости.

5. Разработка программного комплекса и исследование движения ДШР, оснащённого ЭГСП.

**Объект исследования** – двуногие шагающие роботы оснащённые ЭГСП, замкнутыми обратными связями по положению.

**Методы исследования.** При решении указанных задач в работе используются методы: теоретической механики, теории графов, теории матриц, математического моделирования электрогидравлических приводов, теории автоматического управления, экспериментального исследования объектов управления, оснащённых ЭГСП.

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

1. Уравнение движения исполнительных механизмов роботов, имеющих древовидные кинематические структуры с голономными связями в сочленениях.

2. Математическая модель исполнительного механизма ДШР, учитывающая особенности, обусловленные существенными нелинейностями исполнительного механизма с ЭГСП.

3. Представление траектории движения исполнительного механизма ДШР в виде комбинации гармонических функций, описывающих изменения переменных состояния в декартовом пространстве, что позволяет производить синтез управления движением с использованием разработанной математической модели исполнительного механизма с ЭГСП.

4. Структура и алгоритмы системы стабилизации, которые обеспечивают требуемые изменения переменных состояния исполнительного механизма ДШР с ЭГСП, путём управления моментами на стопах.

**Достоверность результатов.** Научные положения и выводы, представленные в работе, обоснованы результатами теоретических и экспериментальных исследований. При математическом моделировании ДШР с ЭГСП использовались современные программные комплексы.

Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментами, проведёнными с использованием современных средств измерения и обработки данных.

**Практическая ценность** работы состоит в следующем:

1. Полученное уравнение движения исполнительных механизмов роботов может быть использовано для составления математических моделей антропоморфных роботов, имеющих древовидные кинематические структуры.

2. Предложенное представление изменения переменных состояния исполнительного механизма ДШР в декартовом пространстве в виде комбинации гармонических функций позволяет производить синтез управления его движением.

3. Разработанная методика построения программного обеспечения системы управления исполнительным механизмом ДШР может быть использована для построения программных комплексов систем управления роботами.

4. Созданный экспериментально-моделирующий комплекс ДШР является лабораторной установкой, используемой при решении задач синтеза траектории движения исполнительного механизма с ЭГСП, рассматриваемых в учебном процессе.

**Реализация результатов работы.** Разработанные в диссертации теоретические положения, алгоритмы управления и рекомендации по проектированию систем ЭГСП ДШР использованы в госбюджетных НИР: «Разработка основ проектирования двуногих шагающих манипуляционных роботов» (ГР № 01200606556, Инв. № 022006041116), «Исследование принципов управления и стабилизации двуногих шагающих роботов в режиме динамической ходьбы» (ГР № 01200703234, Инв. № 02200900140). Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика» МГТУ им. Н.Э.Баумана в читаемых курсах: «Гидроприводы стационарных и мобильных объектов», «Основы мехатроники гидропневмосистем», что подтверждается актом о внедрении.

Использование результатов диссертационной работы может быть рекомендовано к внедрению в следующих организациях: ФГУ ВНИИ ПО МЧС, ФГНЦ России ЦНИИ РТК, ОАО «НИКИМТ – Атомстрой».

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

- российском научно-методическом семинаре «Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика». (Омск, 2001г.);
- международной научно-технической конференции «Гидромашиностроение. Настоящее и будущее» (Москва, 2004 г.);
- 1 международной научно-практической конференции «Интеллектуальные машины» (Москва 2009 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертации изложены в 3 статьях (опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК), в одной монографии, в одном учебном пособии, в 2 отчётах по НИР, имеющих государственную регистрацию.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов по каждой главе, заключения и списка литературы. Общий объём работы содержит 172 страницы машинописного текста, 6 таблиц, 59 рисунков, список литературы из 48 наименований.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** к диссертационной работе обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, методы исследования, изло-

жены основные положения, представленные автором на защиту, приведено описание лабораторного исследовательского комплекса ДШР.

**В первой главе** изложен, предложенный автором, подход к описанию древовидных кинематических структур роботов с использованием теории графов. Приведено, выведенное автором, блочно-матричное уравнение динамики роботов с древовидными кинематическими структурами. Разработана математическая модель ДШР с ЭГСП, замкнутыми обратными связями по положению, с учётом взаимодействия ДШР с опорной поверхностью. При этом учтены следующие особенности: древовидная кинематическая структура ДШР; незакреплённость исполнительного механизма к неподвижному основанию; наличие внешних связей накладываемых на ДШР, которые меняются в процессе его движения; работа ЭГСП в области малых управляющих сигналов, характерных для движения ДШР в режиме динамической ходьбы. В математической модели исполнительного механизма ДШР приняты следующие допущения: звенья ДШР абсолютно жёсткие; связи в сочленениях - голономные.

Описание кинематической структуры исполнительного механизма ДШР, в условиях его не привязанности к неподвижному основанию, было реализовано путём введения шести дополнительных фиктивных звеньев, связывающих корпус ДШР с неподвижным основанием. В этом случае исполнительный механизм ДШР имеет 18 степеней подвижности, и его кинематическая структура становится ветвящейся (рис. 1).

Изложенная в диссертации методика построения математических моделей роботов с древовидной кинематической структурой не ограничивается только кинематическими структурами двуногих шагающих роботов. Однако, для её представления удобно, в качестве примера, использовать исполнительный механизм ДШР, как представителя такого класса роботов.

Для описания кинематической структуры и записи математической модели исполнительных механизмов с древовидными кинематическими структурами условимся:

- кинематическая структура исполнительного механизма представляется в виде древовидного направленного графа (рис. 1), звенья в таком графе являются вершинами, а соединяющие их сочленения – дугами;
- за звено с номером 0 (корень дерева) принимаем окружающее пространство с инерциальной системой координат, фиксированной в какой-либо точке этого пространства (абсолютной системой координат);
- нумерация звеньев начинается с 1 и производится по возрастающим номерам, без пропусков, двигаясь от корня дерева к его листьям, т.е. для каждого звена должно выполняться условие: собственный номер звена меньше номера любого звена – потомка;
- номер обобщённой координаты, как и номер соответствующего сочленения, такой же, как и у звена, присоединяемого этим сочленением к предыдущему звену.

Для описания древовидного исполнительного механизма используем следующие обозначения:



- $f(i)$  – номер звена, являющегося звеном-отцом для звена  $i$ ,  $i \in L$ ;
- $s(i, k)$  – номер звена, являющегося  $k$ -м звеном-сыном для звена  $i$ ;
- $dg^+(i)$  – полустепень исхода звена  $i$ , определяет количество звеньев-сыновей звена  $i$ ;
- $\Gamma(i)$  - кортеж номеров звеньев, являющихся для звена  $i$  звеньями-сыновьями  $\Gamma(i) = \{(s(i,1), s(i,2), \dots, s(i, k), \dots, s(i, dg^+(i)))\}$ ;
- $ns(i)$  – определяет, каким по счету звеном-сыном является звено  $i$  для своего звена-отца (порядковый номер звена  $i$  в кортеже  $\Gamma(f(i))$ );
- $\sigma_i \in \{0,1\}$  - диагональная матрица коэффициентов  $\sigma_i \in \{0,1\}$ , определяющих типы сочленений звеньев  $i$  со звеньями-отцами (телескопический и вращательный шарнир соответственно).

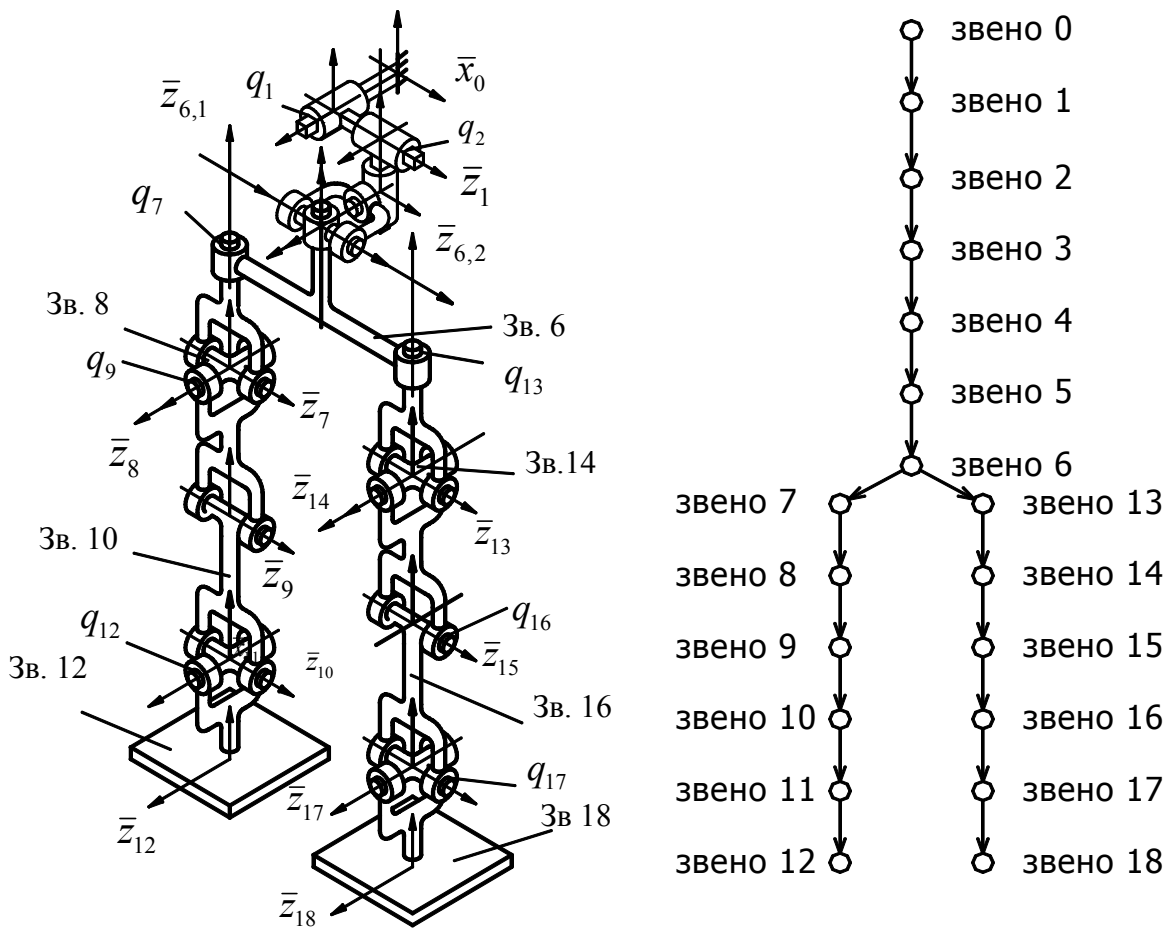


Рис. 1. Кинематическая схема лабораторного ДШР с фиктивными звеньями и представляющий её древовидный граф

Для формирования математической модели в блочном виде будем представлять кинематическую структуру исполнительного механизма с помощью матрицы достижимости. Это квадратная матрица  $D$ , каждый элемент которой  $d_{ij}$  равен 1, если  $i^{\text{я}}$  вершина достижима из вершины  $j$ . Размерность матрицы  $D$

равна числу звеньев исполнительного механизма. Для ДШР (рис. 1), матрица достижимости, описывающая его кинематическую структуру, имеет вид:

$$D_{18 \times 18} = \begin{pmatrix} U_{6 \times 6} & \Theta_{6 \times 6} & \Theta_{6 \times 6} \\ I_{6 \times 6} & U_{6 \times 6} & \Theta_{6 \times 6} \\ I_{6 \times 6} & \Theta_{6 \times 6} & U_{6 \times 6} \end{pmatrix}, \text{ где: } U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}; I - \text{ матрица, все элементы ко-}$$

торой равны 1;  $\Theta$  - нулевая матрица.

Порядок следования систем координат, связанных со звеньями исполнительного механизма, имеющего древовидную кинематическую структуру, определяется с помощью блочного вектора  ${}^0 \mathbf{z} = ({}^0 \bar{\mathbf{z}}_{f(1),ns(1)}^T \quad {}^0 \bar{\mathbf{z}}_{f(2),ns(2)}^T \quad \dots \quad {}^0 \bar{\mathbf{z}}_{f(N),ns(N)}^T)^T$ , где  ${}^0 \bar{\mathbf{z}}_{f(i),ns(i)}$  - орт оси  $\bar{\mathbf{z}}$  системы координат, связанной со звеном  $f(i)$ , соответствующей звену  $i$ ;  $N$  - количество звеньев исполнительного механизма. Нулевой левый верхний индекс указывает, что вектор выражен в абсолютной системе координат.

Используя предложенный способ описания кинематических структур роботов, можем записать кинематические и динамические зависимости для всех звеньев роботов с древовидной кинематической структурой. Ниже приводится выражение, определяющее ускорения центров масс звеньев.

$$\begin{aligned} {}^0 \bar{\mathbf{a}}_{cm} = & (D \cdot {}^0 \mathbf{z}^d \cdot (E - \sigma) + \Lambda^T ({}^0 \mathbf{c}_{f_D}) \cdot {}^0 \mathbf{z}^d \cdot \sigma) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \\ & + \Lambda^T ({}^0 \mathbf{c}_{f_D}) \cdot \Lambda^T ({}^0 \mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \cdot (D - E) \cdot {}^0 \mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}} + \\ & + \Lambda^T \left( \Lambda^T ({}^0 \mathbf{c}_{f_D}) \cdot \sigma \cdot {}^0 \dot{\mathbf{q}}^d \cdot {}^0 \mathbf{z}^d \cdot D + \Lambda^T ({}^0 \mathbf{c}_{f_D}) \cdot \left( (D - E) \cdot \sigma \cdot {}^0 \mathbf{z}^d \cdot {}^0 \dot{\mathbf{q}}^d \right) \right) \cdot {}^0 \mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}} + \\ & + 2 \cdot D \cdot \Lambda^T ({}^0 \mathbf{z}^d \cdot (E - \sigma) \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \cdot (D - E) \cdot {}^0 \mathbf{z}^d \cdot \sigma \cdot \dot{\mathbf{q}}. \end{aligned}$$

В этом выражении:

${}^0 \mathbf{c}_{f_D}$  - матрица, объединяющая векторы, соединяющие начала систем координат звеньев  $f(j), ns(j)$  с центрами масс звеньев  $i$ , в соответствии со взаимной достижимостью звеньев, описываемой матрицей  $D$ ;

правый верхний индекс  $d$  обозначает представление векторной величины в диагональном виде.

Зависимости, для определения сил или моментов, развиваемых приводами, получаются при проецировании на оси  $\bar{\mathbf{z}}_{f(i),ns(i)}$  выражений для сил и моментов, действующих на звенья  $i$  со стороны звеньев  $f(i)$ .

Выражая усилия, развиваемые приводами, через обобщённые координаты и их производные и группируя сомножители при  $\dot{\mathbf{q}}$  и  $\ddot{\mathbf{q}}$  получаем уравнение динамики исполнительных механизмов роботов, имеющих древовидные кинематические структуры, определяемые матрицей достижимости звеньев  $D$ , блочным вектором  ${}^0 \mathbf{z}$  и диагональной матрицей  $\sigma$ :

$$A(\mathbf{q}) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - C(\mathbf{q}) \cdot {}^0 \mathbf{f}_g - H(\mathbf{q}) \cdot {}^0 \mathbf{n}_g = \boldsymbol{\tau},$$

где:

$$A(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\sigma} \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot \left( - \left( \Lambda({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \right)^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot \left( D \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \boldsymbol{\sigma}) + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \boldsymbol{\sigma} \right) + \right. \\ \left. + D^T \cdot {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot D \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \boldsymbol{\sigma} \right) + (E - \boldsymbol{\sigma}) \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot D^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot \left( D \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \boldsymbol{\sigma}) + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \boldsymbol{\sigma} \right);$$

$$B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\sigma} \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot \left\{ - \left( \Lambda({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \right)^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot \left[ \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \cdot \Lambda^T({}^0\mathbf{z}^d \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \cdot (D - E) + \right. \right. \\ \left. \left. + \Lambda^T \left( \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot D + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \cdot \left( (D - E) \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \right) \right) \right] + \right. \\ \left. + 2 \cdot D \cdot \Lambda^T \left( {}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \boldsymbol{\sigma}) \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \right) \cdot (D - E) \right\} + \\ \left. + D^T \cdot {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot D \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \cdot \Lambda^T({}^0\mathbf{z}^d) \cdot (D - E) + D^T \cdot \Lambda \left( D \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \right) \cdot {}^0\mathbf{J}_C^d \cdot D \right\} {}^0\mathbf{z}^d \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \\ + (E - \boldsymbol{\sigma}) \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot D^T \cdot \mathbf{m}^d \cdot \left[ \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \cdot \Lambda^T({}^0\mathbf{z}^d \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{q}}^d) \cdot (D - E) + \right. \\ \left. + 2 \cdot D \cdot \Lambda^T \left( {}^0\mathbf{z}^d \cdot (E - \boldsymbol{\sigma}) \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \right) \cdot (D - E) + \right. \\ \left. + \Lambda^T \left( \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot D + \Lambda^T({}^0\mathbf{c}_{f_D}) \cdot \left( (D - E) \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot {}^0\mathbf{z}^d \cdot \dot{\mathbf{q}}^d \right) \right) \right] {}^0\mathbf{z}^d \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{q}};$$

$$C(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\sigma} \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot \left( (D^T - E) \cdot \Lambda({}^0\mathbf{s}^d) \cdot D^T + D^T \cdot \Lambda({}^0\mathbf{t}^d) \right) + (E - \boldsymbol{\sigma}) \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot D^T;$$

$$H(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\sigma} \cdot ({}^0\mathbf{z}^d)^T \cdot D^T.$$

В этих выражениях:

$\mathbf{m} = (m_1, m_2 \dots m_N)^T$  - матрица масс звеньев исполнительного механизма;

$\mathbf{J}_C = (J_{C_1}, J_{C_2} \dots J_{C_N})^T$  - блочная матрица тензоров инерции звеньев;

${}^0\mathbf{t}^d = \text{diag}({}^0\bar{t}_1^T, {}^0\bar{t}_2^T \dots {}^0\bar{t}_N^T)$  блочная диагональная матрица векторов, со-

единяющих начала систем координат звеньев  $f(i), ns(i)$  с точками, через кото-  
рые проходят равнодействующие внешних сил, приложенных к звеньям  $i$ .

Полученные уравнения кинематики и динамики являются развитием ана-  
логичных уравнений, приведённых в работах Зенкевича С.Л., Ющенко А.С.,  
Лескова А.Г., выведенных для исполнительных механизмов с простой кинема-  
тической цепью.

Движение ДШР в режиме динамической ходьбы является статически неус-  
тойчивым. Для обеспечения движения ДШР по реализуемой траектории, при-  
воды должны обладать высокой динамической чувствительностью, при которой  
практически не допускается наличие зоны нечувствительности в контурах  
управления приводами. В качестве приводов ДШР использованы ЭГСП следя-  
щие по положению. Исполнительный гидроцилиндр управляется двухкаскад-  
ным электрогидравлическим усилителем. В качестве первого каскада усиления  
используется электромеханический преобразователь типа сопло-заслонка. В ка-  
честве второго - цилиндрический золотниковый распределитель.

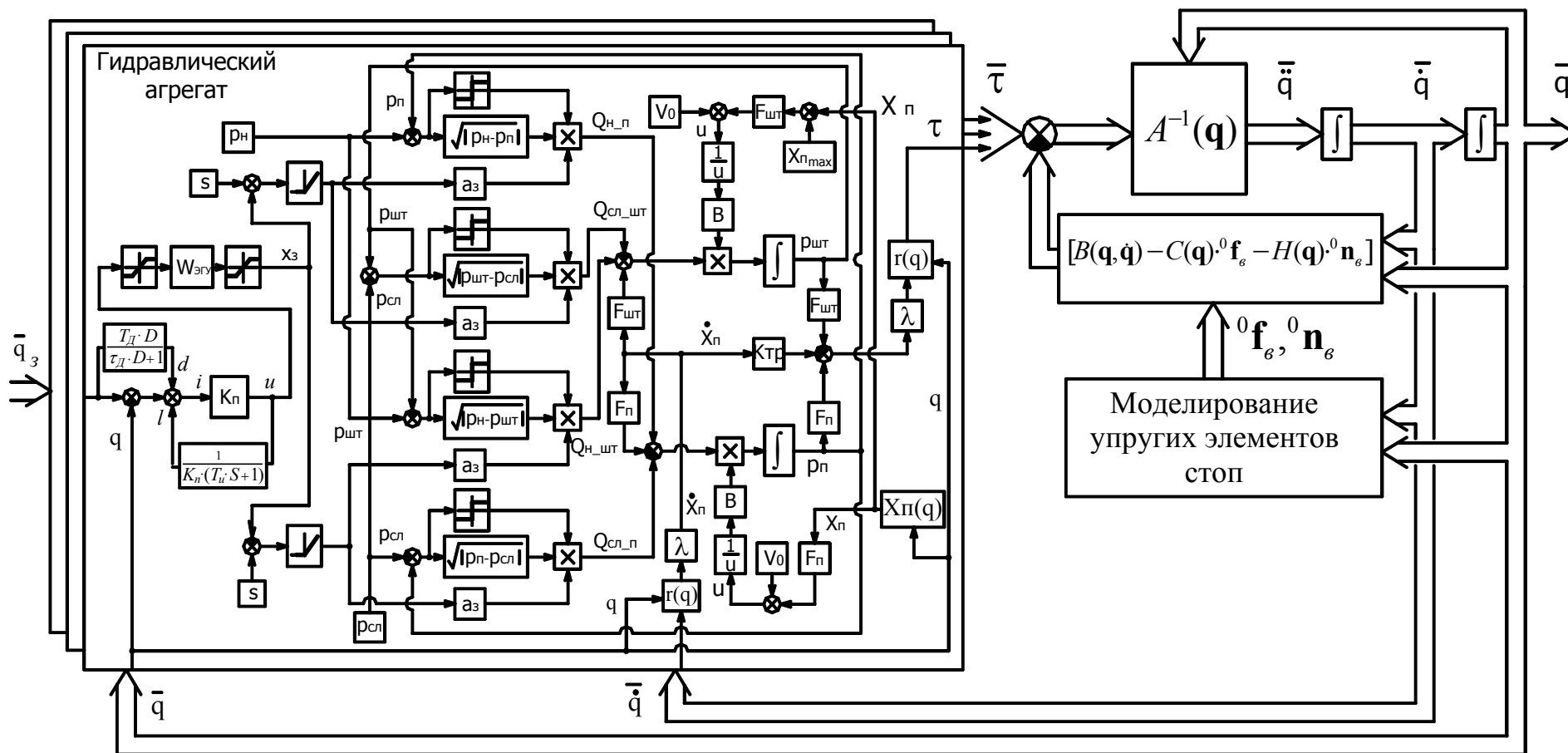


Рис. 2. Структурная схема математической модели исполнительного механизма ДШР с ЭГСП

На большей части траектории движения ДШР ЭГСП работают в области малых амплитуд сигналов управления. Поэтому, при составлении математической модели ЭГСП, особое внимание было уделено моделированию течения рабочей жидкости в гидравлических распределителях при малых смещениях золотников. В математической модели ЭГСП учитываются: сжимаемость рабочей жидкости; особенности моделирования ЭГСП, определяемые непроходным штоком гидроцилиндра; изменяющиеся объёмы рабочих полостей гидроцилиндра; силы трения в гидроцилиндре; нелинейности, обусловленные микрогеометрией золотниковой пары; нелинейность расходно-перепадной характеристики гидрораспределителя; возможность возникновения кавитации; зависимость плеч сил, развиваемых гидроцилиндрами, от значения обобщённой координаты. Динамические свойства электрогидравлических усилителей представлены динамическими звеньями второго порядка. При математическом моделировании работы ЭГСП с указанными особенностями были использованы материалы приведённые в работах Попова Д.Н., Фомичёва В.М., Лещенко В.А., Форренталя В.И. и др.

Моделирование связей, накладываемых на стопы ДШР со стороны опорной поверхности, осуществляется путём определения сил и моментов, действующих на стопы со стороны упругих элементов, через которые робот контактирует с опорной поверхностью. Эти силы и моменты определяются как функции от линейной и угловой деформации каждого из упругих элементов стоп. При этом учитываются следующие особенности:

–силы и моменты действующие со стороны упругих элементов на стопы ДШР возникают только при контакте соответствующего упругого элемента с опорной поверхностью;

–силы, действующие со стороны опорной поверхности на упругие элементы стоп, ограничены в соответствии с максимальными силами трения.

Определённые силы и моменты учитываются в уравнении динамики исполнительного механизма в качестве внешних сил и моментов, действующих на стопы ДШР (звенья 12 и 18 кинематической структуры исполнительного механизма ДШР, показанной на рис. 1).

Полученная математическая модель исполнительного механизма ДШР с ЭГСП (рис. 2) учитывает основные особенности исполнительного механизма и гидравлических приводных устройств, определяющие реализацию его движения. Использование разработанной математической модели может быть полезным как при синтезе управления движением, так и при определении требуемых параметров ЭГСП и источника энергопитания.

**Во второй главе** отображены основные требования для программных комплексов систем управления роботами, представлена, разработанная автором, структура построения программного обеспечения систем управления (ПОСУ) робототехнических комплексов. Описаны предложенные и реализованные алгоритмические механизмы, обеспечивающие функционирование разработанного ПОСУ и выполнение поставленных задач.

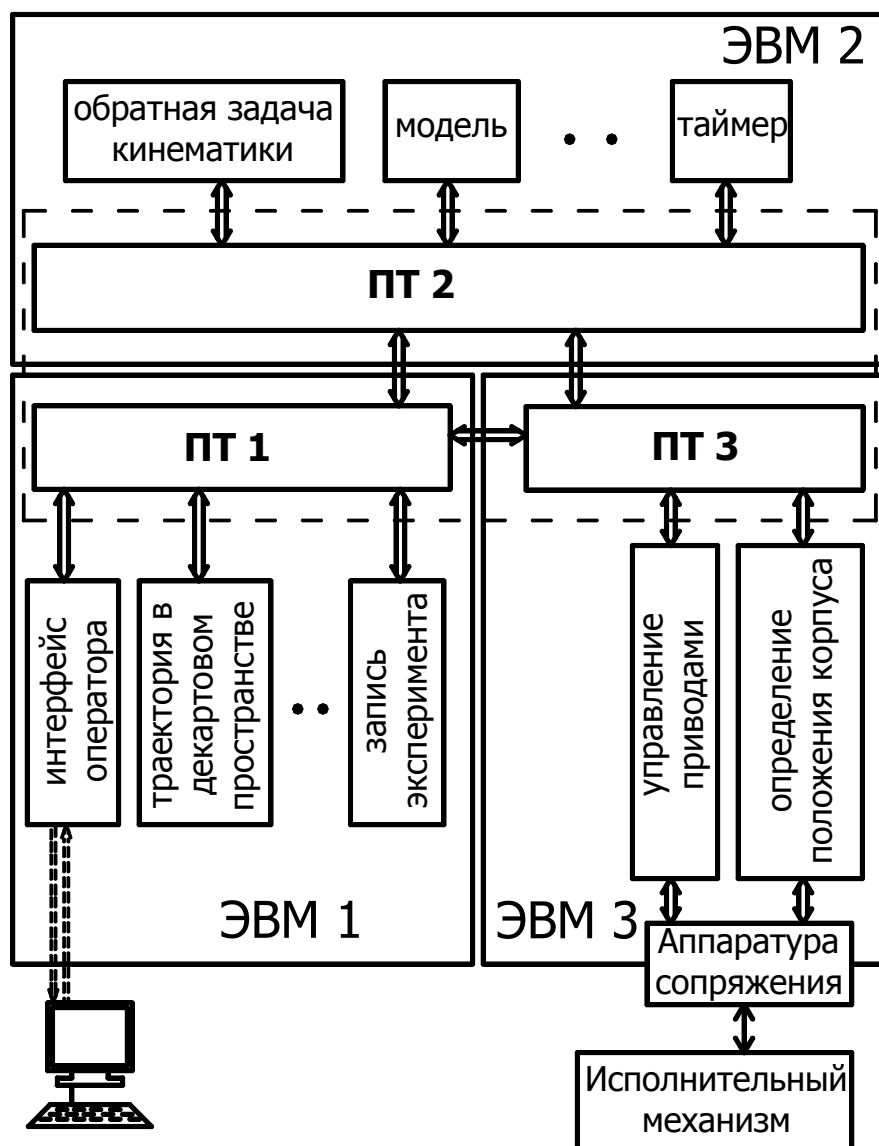


Рис. 3. Структура взаимодействия ПЗ между собой через ПТ

При проектировании систем управления робототехнических комплексов единая система управления представляется в виде набора отдельных программно-независимых задач (ПЗ), разделённых по функциональным признакам. Логически обособленные задачи управления роботом разрабатываются и оформляются в виде отдельных программных модулей, которые операционная система выполняет как независимые процессы. Функции обеспечения взаимодействия отдельных программных модулей (обмен данными, командами, синхронизация работы) в рамках всей сети ЭВМ, на которых выполняются программные модули системы управления, возлагаются на специальный процесс-транспорт (ПТ). Структура взаимодействия построена по принципу клиент-сервер: процесс-транспорт является сервером системы управления, программные модули - клиентами. Взаимодействие программных модулей через процесс – транспорт осуществляется посредством единых протоколов обмена данными и командами. На основе предложенной концепции построения ПОСУ разработана струк-

тура программного комплекса системы управления ДШР. Программный комплекс выполнен на трёх ЭВМ (одна из них расположена непосредственно на корпусе ДШР), объединённых в локальную сеть. Структурная схема, определяющая состав программного комплекса и распределение ПЗ между ЭВМ системы управления, показана на рис. 3. Такая структура системы управления ДШР позволила увеличить вычислительные ресурсы комплекса и обеспечить: расчёт алгоритмов управления движением ДШР, стабилизацию обрабатываемой траектории движения, управление ЭГСП, регистрацию экспериментальных данных и интерфейс оператора в реальном времени в процессе движения робота. Кроме этого, имеется возможность функционального наращивания системы управления, путём включения в локальную сеть дополнительных ЭВМ.

Одним из достоинств разработанного программного комплекса ДШР является математическая модель ДШР с ЭГСП, включенная в состав комплекса. Программный комплекс ДШР, построенный таким образом, может работать как с реальным исполнительным механизмом, так и с его математической моделью (структура и параметры системы управления при этом не меняются), что значительно расширяет возможности проведения исследовательских работ.

**В третьей главе** изложены, предложенные автором, структура и алгоритмы системы стабилизации движения ДШР с ЭГСП следящими по положению, обеспечивающая его движение по требуемым траекториям в условиях внешних силовых возмущений на исполнительный механизм и при отличии положения опорной поверхности от ожидаемого. Показаны алгоритмы, реализующие предложенную систему стабилизации в составе разработанного программного комплекса. Приведены результаты экспериментального исследования динамических свойств разработанной системы стабилизации.

Использование на ДШР ЭГСП, замкнутых обратными связями по положению, позволяет обеспечивать движение робота с большими скоростями. Однако возникает необходимость создавать дополнительные управляемые внешние силовые воздействия на ДШР для удержания робота на расчетных траекториях движения. Для создания требуемого управляющего момента на стопах ДШР расположены упругие элементы, которые позволяют создавать заданный момент, действующий на ДШР со стороны опорной поверхности, задавая соответствующие ему угловые положения стоп.

Разработанная система стабилизации положения робота (рис. 4), состоит из трёх контуров управления. В первом контуре системы стабилизации, по согласованию заданного и измеренного положений корпуса, определяется момент со стороны опорной поверхности, необходимый для возвращения корпуса на требуемую траекторию движения. Во втором контуре – требуемый момент сравнивается с моментами, измеренными силомоментными датчиками стоп, и рассчитываются угловые довороты стоп, необходимые для дополнительной деформации упругих элементов, обеспечивающей требуемый момент. Решается обратная задача кинематики для определения вектора обобщённых координат, обеспечивающего требуемое положение корпуса ДШР и итоговые положения стоп. В третьем контуре – требуемый вектор обобщённых координат обрабаты-

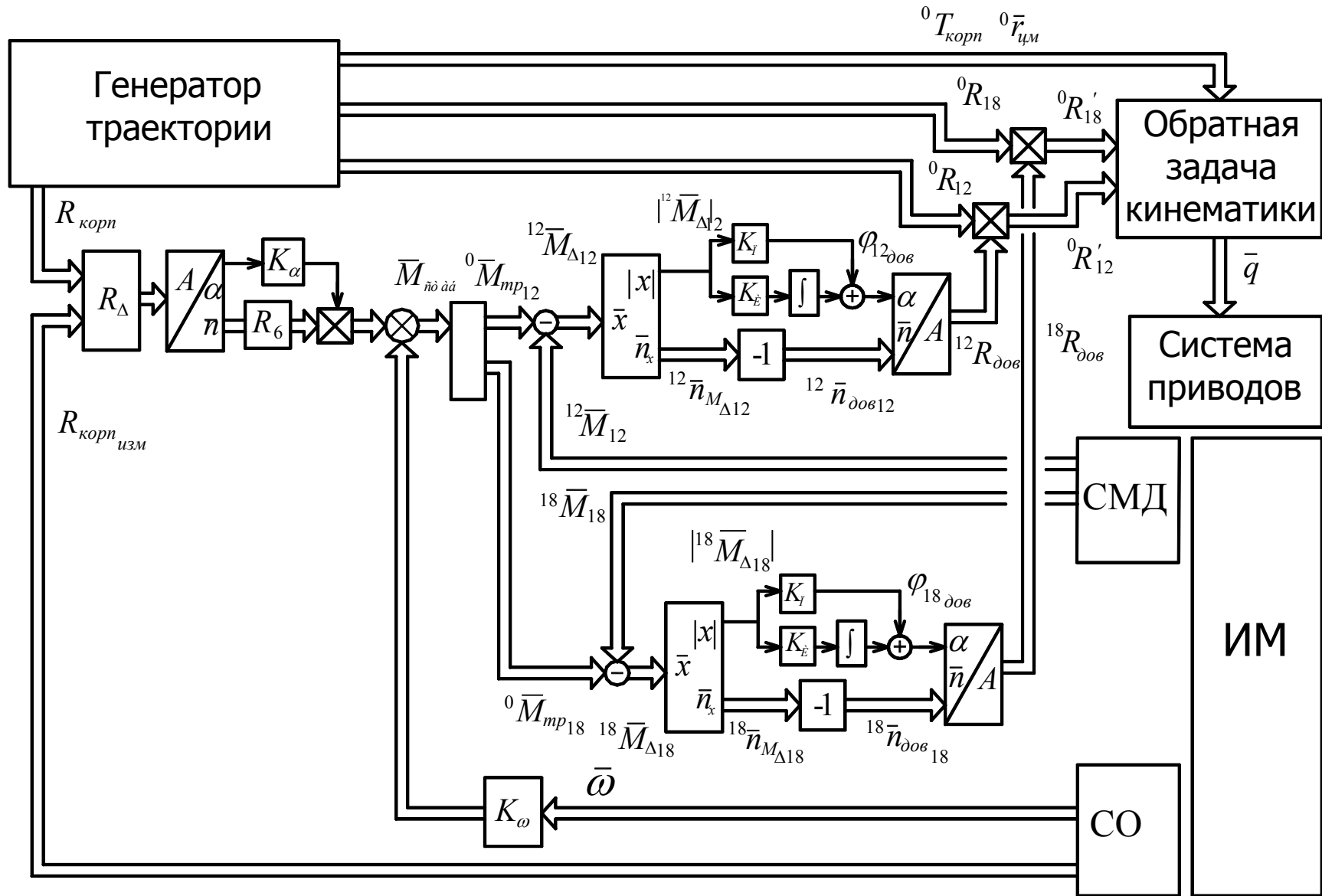


Рис. 4. Структурная схема системы стабилизации углового положения корпуса ДШР



вается ЭГСП, замкнутыми обратными связями по положению.

Для проверки работы системы стабилизации ДШР были проведены экспериментальные исследования на лабораторном образце ДШР. Оценивалось качество переходных процессов отклонения углового положения корпуса от заданного: при ступенчатом приложении к нему внешнего момента; при ступенчатом изменении углового положения опорной поверхности. Экспериментальные исследования системы стабилизации показали, что разработанная структура системы стабилизации, а также реализующие её алгоритмы и программы, работоспособны и обладают достаточной для реализации ходьбы эффективностью.

**В четвёртой главе** представлена, разработанная автором, методика программно-функционального формирования траектории движения ДШР. Траектория формируется в виде периодических циклов движения, описываемых гармоническими функциями с малым числом изменяемых параметров. Приведена структура формирования траектории движения ДШР в пространстве обобщённых координат по требуемой траектории движения в декартовом пространстве и требуемым моментам на стопах, задаваемым системой стабилизации по отклонению действительной траектории движения корпуса ДШР от требуемой. Приведены результаты экспериментальных исследований работы системы стабилизации при движении ДШР в режиме динамической ходьбы под управлением выше обозначенных алгоритмов и энергетические характеристики исполнительного механизма ДШР при динамической ходьбе.

Для первоначального определения траектории движения ДШР в декартовом пространстве решается краевая задача динамики с использованием упрощённой математической модели исполнительного механизма и определяются аналитические выражения для расчета положения корпуса и переносимой стопы, как функции от времени, в пределах каждого шага робота. Траектория движения ДШР, синтезированная в результате решения упрощённой математической модели, аппроксимируется гармоническими функциями с малым количеством изменяемых параметров. Это позволяет, изменяя параметры аппроксимирующих функций, производить коррекцию и оптимизацию траектории движения с учётом динамических факторов движения ИМ, не учтённых в упрощённой математической модели. Кроме того, появляется возможность производить расчёт траектории в реальном времени (в процессе движения ДШР).

Состояние робота в декартовом пространстве определяется вектором  $\bar{s}(t)$ , включающим в себя линейные и угловые положения переносимой стопы, угловые положения корпуса и координаты проекции центра масс ДШР на опорную поверхность. Значение каждой из перечисленных переменных состояния ДШР в декартовом пространстве определяется соответствующей ей функцией фазового изменения переменной состояния во времени. Функции фазовых изменений переменных состояния робота (аппроксимирующие траекторию движения по упрощённой математической модели) определяющие движение ДШР в пределах одного шага, группируются в периодические циклы движения робота. Коррекция траектории движения производится в результате исследования движения ДШР на его полноценной математической модели. Критерием качества

синтезируемой траектории движения ДШР является минимизация моментов на стопах ДШР в процессе ходьбы.

Предложенная структура формирования траектории движения ДШР позволяет «наслаивать» дополнительные корректирующие параметризованные движения, с помощью которых можно компенсировать влияние неучтенных в упрощенной модели динамических эффектов (в качестве такого движения с успехом использован наклон корпуса).

В качестве функций, аппроксимирующих фазовые изменения переменных состояния ДШР в декартовом пространстве, в данной работе использовались зависимости:

$$S_i(t) = S_i(t_{bi}) + \frac{H_i}{2} \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{\pi}{T_i} \cdot \tau_{Si}\right) \right); \quad (t_{nu} + t_{bi}) \leq t \leq (t_{nu} + t_{bi} + T_i), \quad (2)$$

где  $S_i$  - переменная состояния ДШР;  $t$  - текущее время движения робота;  $t_{nu}$  - время начала цикла движения;  $t_{bi}$  - время начала фазы изменения переменной состояния робота, относительно времени начала цикла движения;  $T_i$  - продолжительность фазы изменения переменной состояния робота;  $H_i$  - требуемое изменение переменной состояния робота  $S_i$  за время  $T_i$ ;  $\tau_{Si}$  - текущее время гармонического закона изменения переменной состояния робота.

Траектория движения ДШР в пространстве обобщённых координат, обеспечивающая его требуемое движение в декартовом пространстве, и требуемые корректирующие моменты на стопах, определяемые системой стабилизации, формируется в программном модуле решения обратной задачи кинематики. Структура определения траектории движения ДШР в пространстве обобщённых координат, в режиме ходьбы со стабилизацией положения корпуса, показана на рис. 5. На основе данных, получаемых от генератора траектории (2), предварительно определяется положение корпуса в декартовом пространстве. Определяются положения стоп в декартовом пространстве, обеспечивающие требуемые моменты стабилизации со стороны опорной поверхности. Определяются значения обобщённых координат, обеспечивающих требуемое положение корпуса и требуемые положения стоп. Представленная структура формирования вектора обобщённых координат позволила осуществить движение ДШР, оснащённого ЭГСП замкнутыми обратными связями по положению, в режиме динамической ходьбы. Длительность шагового цикла (переступание с одной ноги на другую) составляла 2,5 с. Длина шага (вынос переносимой стопы относительно опорной) 0,2 м.

Анализ полученных результатов эксперимента показал, что:

– зависимости, полученные в результате математического моделирования движения исполнительного механизма ДШР в режиме динамической ходьбы и в результате реального эксперимента, практически совпадают, что подтверждает идентичность реального исполнительного механизма ДШР с ЭГСП и его математической модели;

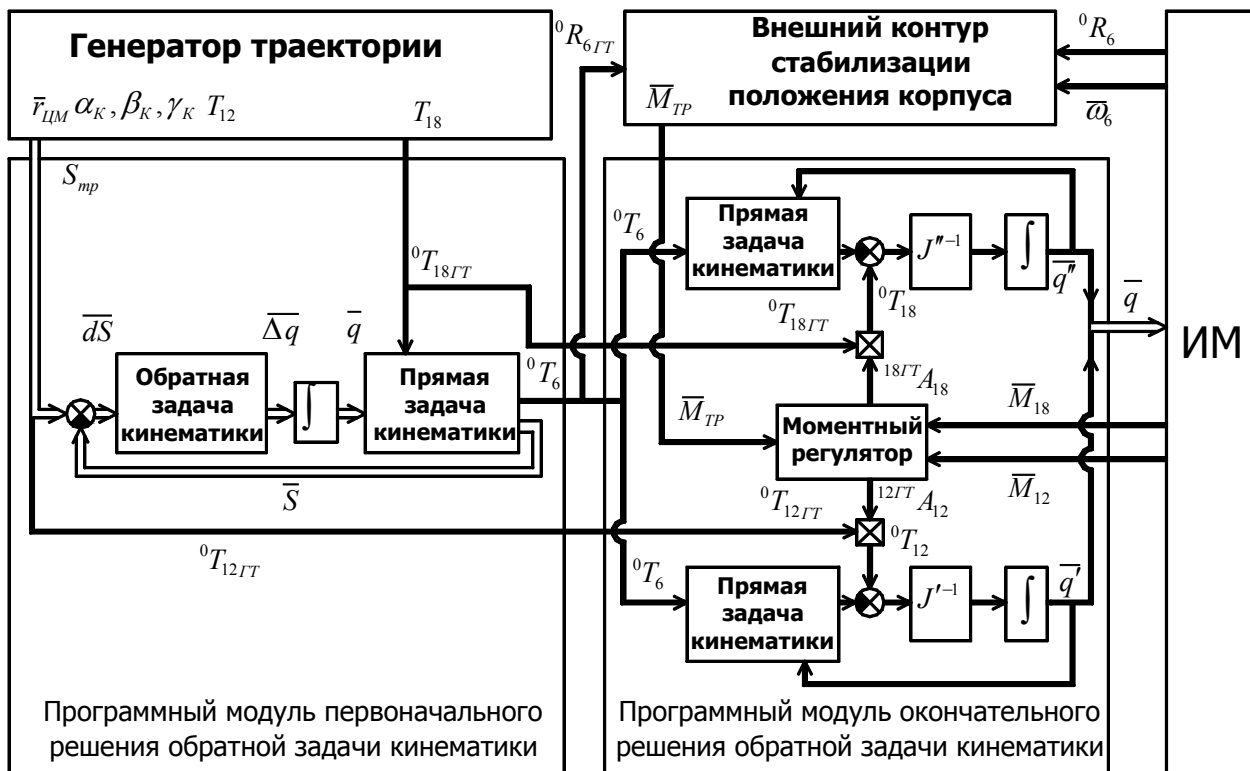


Рис. 5. Структура формирования траектории движения исполнительного механизма ДШР в пространстве обобщённых координат

–система стабилизации постоянно удерживает ориентацию корпуса в окрестности заданной не хуже 2,5 градусов во фронтальной плоскости и не хуже 3 градусов в продольной вертикальной, несмотря на возмущения возникающие при ходьбе;

–полезная мощность, развиваемая ЭГСП ДШР при движении робота в режиме динамической ходьбы с приведёнными выше параметрами, периодически изменяется от 20 Вт до 500 Вт, при этом гидравлическая мощность насосной станции изменяется от 1100 Вт до 3500Вт.

Результаты исследований, проведённых на экспериментальном комплексе, показали его высокую эффективность, подтвердили адекватность разработанных математических моделей, целесообразность использования предложенных методик и алгоритмов управления движением ДШР.

### Общие выводы

1. Разработанный исполнительный механизм с ЭГСП обеспечивает устойчивое движение ДШР по горизонтальной плоскости.
2. Разработанная математическая модель исполнительного механизма с ЭГСП обладает достаточной адекватностью реальному лабораторному макету, позволяющей синтезировать управление движением исполнительного механизма ДШР.
3. Реализованная методика синтеза управления движением исполнительно-

го механизма с ЭГСП, при представлении изменения переменных состояния ДШР в виде комбинации гармонических функций, позволяет получать реализуемые траектории движения ДШР.

4. При управлении движением ДШР необходимо управлять дополнительным изменением пространственной конфигурации ДШР, для компенсации инерционного воздействия неучтенных в упрощённой модели динамических эффектов (в качестве дополнительного изменения пространственной конфигурации ДШР может быть использован закон изменения наклона корпуса в процессе ходьбы ДШР).

5. Разработанное программное обеспечение системы управления позволяет создавать программные комплексы для управления многозвенными исполнительными механизмами роботов, оснащёнными ЭГСП, в реальном времени.

6. Разработанный лабораторный макет ДШР целесообразно использовать для решения задач создания перспективных двуногих шагающих роботов с ЭГСП.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

1. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Принципы построения программного обеспечения системы управления антропоморфным шагающим роботом // Автоматизация и современные технологии. 2007. №2. С. 10-15.

2. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Математическое описание кинематики и динамики исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2008. №11. С. 13-24.

3. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Блочнo-матричные уравнения движения исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2008. №12. С. 5-21.

4. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Управление исполнительными системами двуногих шагающих роботов. Теория и алгоритмы / Под редакцией А.К. Ковальчука. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 160 с.

5. Математическое моделирование систем приводов роботов с древовидной кинематической структурой: Учебное пособие для вузов / Д.Б. Кулаков [и др.] М.: Изд-во «Рудомино», 2008. 64 с.

6. Отчёт по теме «Разработка основ проектирования двуногих шагающих манипуляционных роботов» / МГТУ. Руководитель темы А.К.Ковальчук. ГР № 01200606556, Инв. № 022006041116. М., 2005. 140с.

7. Отчёт по теме «Исследование принципов управления и стабилизации двуногих шагающих роботов в режиме динамической ходьбы» / МГТУ. Руководитель темы А.К.Ковальчук. ГР № 01200703234, Инв. № 02200900140. М., 2008. 150с.