

На правах рукописи



ПОПОВ Александр Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО  
ПОЗИЦИОННО - СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ**

Специальность: 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Юревич Евгений Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Ерош Игорь Львович  
кандидат технических наук, доцент  
Михайлов Борис Борисович

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт  
многопроцессорных вычислительных систем  
им А.В. Каляева Южного Федерального  
Университета

Защита состоится «4» декабря 2008 года в 16 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.229.22 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный политехнический университет» по адресу: 194064, Санкт-  
Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

кандидат технических наук, профессор:



Иванов А. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время подавляющее большинство роботов, используемых в промышленности, представляют собой манипуляторы. Для управления ими необходимо располагать двумя видами информации – о положении рабочего органа и о силе взаимодействия с объектами внешней среды.

Если первая задача решена достаточно успешно, то задача силового оучувствления и управления продолжает оставаться одной из актуальных в робототехнике. По-прежнему много различных силовых операций не удается автоматизировать и приходится выполнять при управлении от человека-оператора с помощью копирующих манипуляторов и манипуляторов с управлением от задающих рукояток, систем супервизорного и интерактивного управления.

Общим решением задачи позиционно-силового управления могут стать комбинированные системы такого автоматического и автоматизированного от человека управления, которые позволят наращивать возможности автоматического позиционно-силового управления после отработки соответствующих алгоритмов при управлении от человека.

Из публикаций, посвященных исследованию способов и систем позиционно-силового управления, следует выделить работы Воротникова С.А., Гориневского Д.М., Егорова И.Н., Кулакова Ф.М., Лакоты Н.А., Пантелей Е.В., Письменного Г.В., Подураева Ю.В., Смирнова Е.Н., Формальского А.М., Шнейдера А.Ю., Юревича Е.И.; J.J. Craig, W.D. Fisher, N. Hogan, O. Khatib, P. Khosla, A. Lanzon, M.S. Mujtaba, R.P. Paul, M.H. Raibert, R.J. Richards, R. Volpe, H. Zhang. Следует также отметить работы A. Alcocer, P.J. Hacksel, K. Hashtrudi-Zaad, A. Robertson, S.E. Salcudean, A.C. Smith по исследованию наблюдателей силы – вычислителей силы по выявляемым переменным, связанными с искомой силой математической моделью манипулятора.

## **Цель и задачи работы**

Целью работы является повышение качества выполнения манипуляторами технологических операций, требующих позиционно-силового управления, и расширение номенклатуры таких операций, в том числе путем создания комбинированных систем позиционно-силового управления с использованием датчиков и наблюдателей силы.

Для решения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ способов автоматического и автоматизированного позиционно-силового управления манипуляторами и выявление тенденций их развития;
- разработка и исследование наблюдателей силы и возможностей их использования, в том числе совместно с датчиками силы (момента) с целью расширения диапазона измерения, минимизации аппаратных затрат и повышения надежности;
- разработка методики синтеза комбинированных систем позиционно-силового управления;
- экспериментальное исследование системы комбинированного позиционно-силового управления для нового поколения манипуляторов с таким управлением.

## **Методы исследований**

При исследовании и синтезе алгоритмов позиционно-силового управления и наблюдателей силы используются методы теории автоматического управления, математического и физического моделирования. Предложенные решения отработаны с помощью компьютерного моделирования и экспериментальных исследований конкретных манипуляционных систем.

**Достоверность** и эффективность результатов работы подтверждена их апробацией в проектах конкретных робототехнических систем различного назначения.

## **Научная новизна представленной работы**

1. Разработана структура перспективной системы комбинированного позиционно-силового управления манипуляторами, существенно расширяющая их возможности.

2. Предложены алгоритмы такого управления, даны рекомендации по их применению и методика синтеза.

3. Проведен сравнительный анализ и предложена общая классификация схем наблюдателей силы с рекомендациями по их применению, в том числе в комбинации с датчиками силы (момента).

4. Предложена методика проектирования и настройки комбинированных позиционно-силовых систем управления манипуляторами, а также соответствующее программное обеспечение.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Принципы и структурные схемы позиционно-силового управления манипуляторами, сочетающие датчики и наблюдатели силы, существенно расширяющие диапазоны силового очувствления.

2. Алгоритмы и соответствующее программное обеспечение для комбинированных систем позиционно-силового управления, объединяющие возможности автоматического и автоматизированного позиционно-силового управления.

3. Математические модели и основанная на них методика синтеза таких систем, апробированная на конкретных их проектах.

## **Практическая ценность полученных результатов**

Разработанные принципы построения и методика синтеза систем позиционно-силового управления могут быть основой проектирования манипуляторов с силовым очувствлением различного назначения. Результаты исследования наблюдателей силы и рекомендации по их применению позволяют создавать силомоментные информационно-измерительные системы существенно более широкого диапазона при повышенной точности и надежности.

### **Реализация результатов работы**

Результаты диссертационной работы использованы в разработках ГНЦ ЦНИИ РТК при модернизации системы управления макета космического манипулятора DORES, создании медицинского робота Эквивалент, а также в ряде НИР, выполненных по заказам различных отраслей и ведомств РФ.

### **Апробация результатов работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались в 2005 – 2008 годах на: первой Российской мультиконференции по проблемам управления, Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», Международном научно-техническом конгрессе «Мехатроника и робототехника», конференции «Искусственный интеллект» (Интеллектуальные и многопроцессорные системы), Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах», XXXII – XXXV неделях науки СПбГПУ. По результатам работы в 2008 г. получен грант от правительства Санкт-Петербурга.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 2 статьи в научных журналах, включенных в перечень научно-технических изданий ВАК России. Материалы диссертации использованы при подготовке учебного пособия «Роботы с силовым оцувствлением». Отдельные результаты теоретических и экспериментальных исследований отражены в отчетах по научно-исследовательским работам ГНЦ ЦНИИ РТК.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы. Диссертация содержит 126 страниц текста, включая приложения, из них 111 страниц основного текста, 70 рисунков и 9 таблиц. Список использованной литературы содержит 72 наименования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и основные задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** – «Современные системы позиционно-силового управления манипуляторами», дан анализ существующих систем позиционно-силового управления манипуляторов, тенденций их развития, и обоснована тема работы по созданию систем комбинированного позиционно-силового управления манипуляторами на базе комплексного использования датчиков и наблюдателей силы.

В общем случае существуют следующие варианты позиционно-силового управления манипуляторами:

- независимое (несвязанное), когда эти способы управления разделены во времени или пространстве (по степеням подвижности);
- согласованное (связанное);
- комбинированное (сочетание первого и второго вариантов).

Необходимая во всех вариантах информация о силах и моментах по степеням подвижности рабочего органа может быть получена двумя способами. Первый традиционный способ – это использование датчиков силы (момента). Второй способ – это применение наблюдателей силы.

Датчики силы (момента) имеют наибольшую точность и быстродействие по сравнению с наблюдателями силы, однако обладают следующими недостатками: ограниченный рабочий диапазон, невозможность определять некоторые составляющие вектора силы, существенная чувствительность к изменению параметров окружающей среды, высокая стоимость, а также необходимость включения в конструкцию манипулятора.

Наблюдатели силы свободны от этих недостатков датчиков силы (момента). Учитывая указанные сравнительные характеристики обоих способов получения информации об усилиях, перспективным представляется их совместное использование.

По типу используемых математических моделей наблюдатели силы можно классифицировать следующим образом:

- с полной моделью манипулятора с приводами;
- с упрощенной моделью с использованием датчиков промежуточных переменных;
- с моделью, подстраиваемой по рассогласованию с манипулятором.

На рис. 1 дана структурная схема наблюдателя силы  $F_{вн}$  на основе полной математической модели манипулятора с системой приводов в виде:

$$\left. \begin{aligned} \hat{F}_{вн} &= (J^T(q))^{-1} [Q_{п} - A(q)\ddot{q} - b(\dot{q}, q) - c(q)], \\ Q_{п} &= A_{п}(U_{п}), \\ U_{п} &= A_{у}(q, q_3), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $q_3$  и  $q$  – заданные и полученные с помощью датчиков положения относительные координаты звеньев манипулятора;  $Q_{п}$  – вектор усилий, развиваемых системой приводов манипулятора;  $A(q)$ ,  $b(\dot{q}, q)$  и  $c(q)$  – соответственно матрица инерции, вектор скоростных сил (центробежных, кориолисовых, вязкого трения) и статических сил (гравитационных, сухого трения),  $A_{п}$  и  $A_{у}$  – операторы системы приводов и управляющего устройства,  $J(q)$  – матрица Якоби, связывающая приращения между относительными и абсолютными координатами манипулятора.

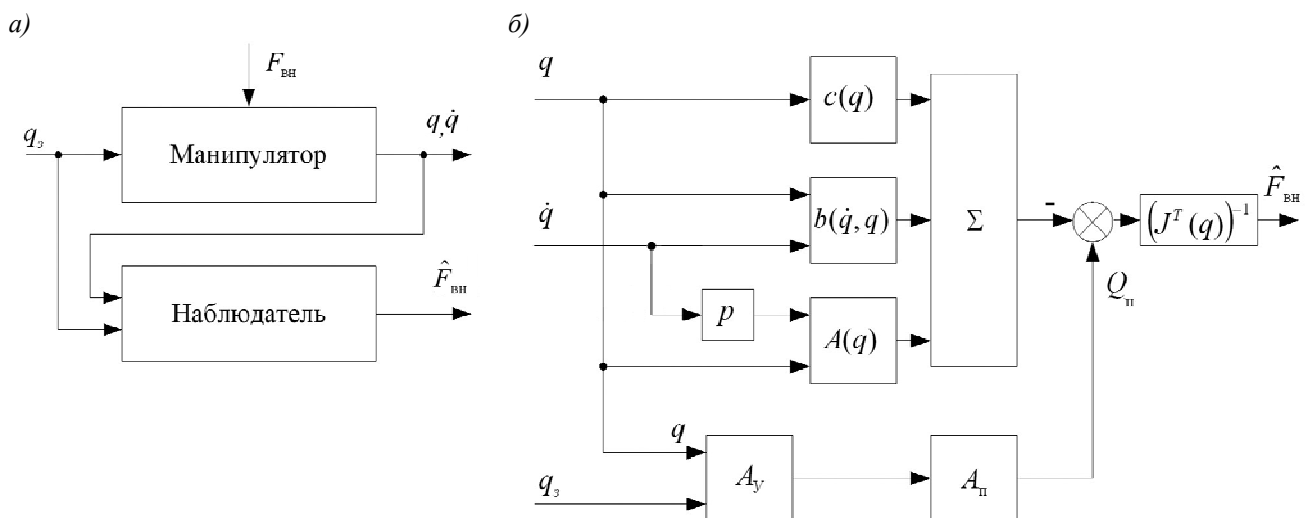


Рис. 1. Наблюдатель силы на основе математической модели манипулятора с системой приводов: а) схема соединения б) структурная схема



На вход модели подаются с датчиков текущие значения составляющих вектора относительных координат и управляющие воздействия на приводы. В результате решения обратной задачи динамики находится оценка силы взаимодействия рабочего органа манипулятора с внешней средой. Схема наблюдателя упрощается, если использовать математическую модель только механической системы манипулятора с определением усилий приводов при помощи соответствующих датчиков. В случае электрических двигателей это могут быть простые датчики тока.

Наблюдатели силы уступают датчикам силы по точности, но существенно проще и дешевле. Поэтому перспективы применения наблюдателей силы связаны, прежде всего, с повышением их точности и быстродействия, в том числе путем совершенствования способов подстройки и использования дополнительных датчиков промежуточных переменных.

**Во второй главе** – «Синтез алгоритмов позиционно-силового управления манипуляторами», проведено исследование этих алгоритмов и путей их реализации на базе предлагаемой обобщенной системы комбинированного управления манипулятором, реализующей различные способы и алгоритмы автоматического и автоматизированного позиционно-силового управления с возможностью оперативного перехода от одного способа к другому. На рис. 2 представлена функциональная схема такой обобщенной системы управления.

Вычислительное устройство ВУ реализует алгоритмы автоматического и автоматизированного позиционно-силового управления. Автоматическое управление осуществляется по заданию оператора через программатор, который содержит набор управляющих программ выполнения типовых элементарных операций. При управлении от задающих рукояток ВУ решает обратную задачу механики для манипулятора с введением необходимой коррекции для повышения качества отработки задания. Вместо задающих рукояток может быть использован задающий манипулятор. В этом случае управление может осуществляться помимо ВУ, но и может использовать его для коррекции качества управления. Показанный на схеме датчик силы

(момента) может быть заменен или дополнен наблюдателем силы, который реализуется в ВУ.

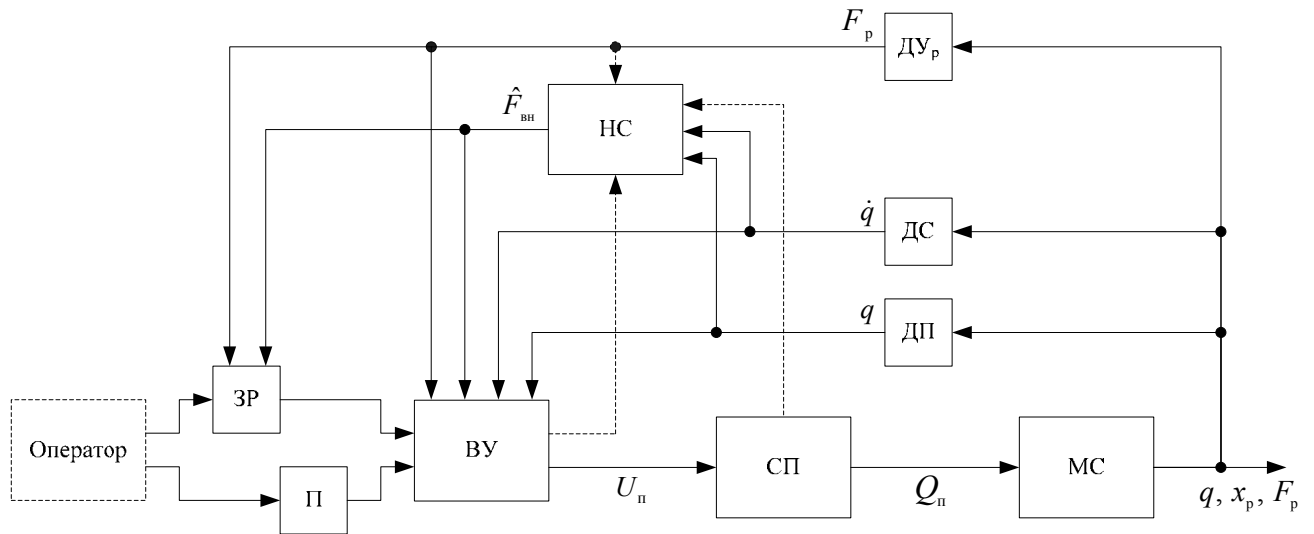


Рис. 2. Функциональная схема системы комбинированного позиционно-силового управления манипулятором: ЗР – задающая рукоятка, П – программатор, ВУ – вычислительное устройство, СП – система приводов, МС – механическая система, ДП – датчик положения, ДС – датчик скорости, ДУ<sub>р</sub> – датчик усилия в рабочем органе, НС – наблюдатель силы

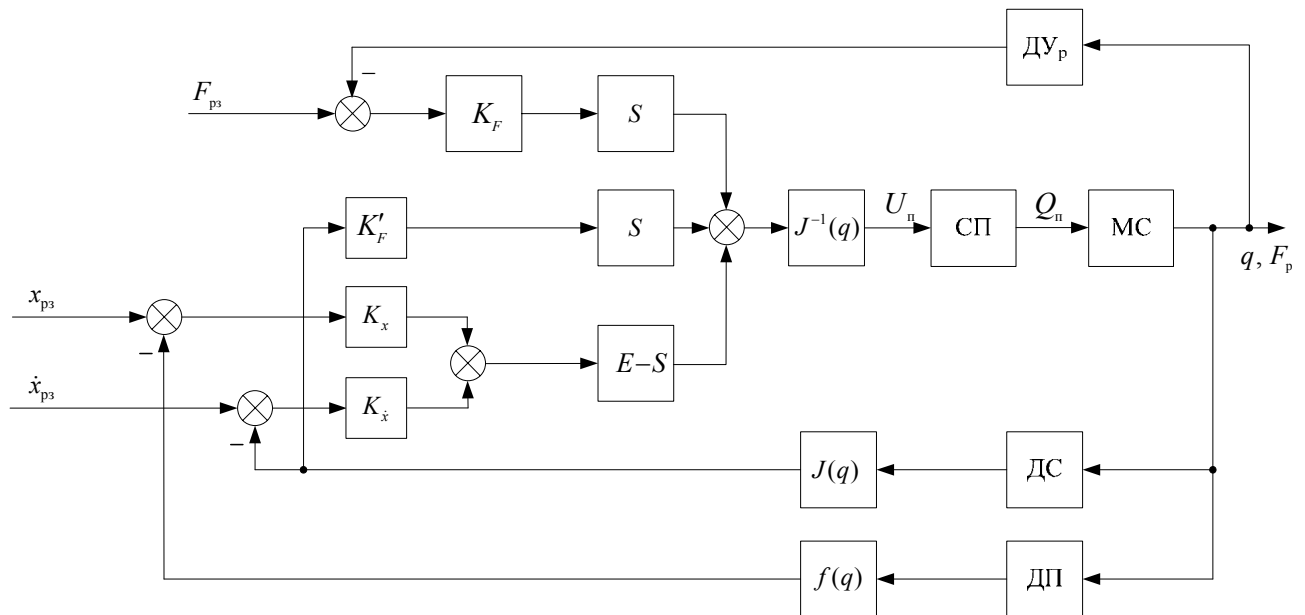


Рис. 3. Структурная схема независимого позиционно-силового управления

На рис. 3 представлена структурная схема, иллюстрирующая алгоритм независимого автоматического позиционно-силового управления по силе и положению в пространстве абсолютных координат рабочего органа манипулятора. В каналах управления по силе и по положению применяется коррекция по рассогласованию в соответствии с П- и ПД-алгоритмами.

Естественно, они могут быть заменены, например, на ПИД-алгоритм или локально-оптимальный рекуррентный алгоритм адаптации. С целью обеспечения устойчивого выхода на контакт, в схему введен дополнительный канал демпфирования. Алгоритм такого независимого управления имеет вид:

$$U_n = J^{-1}(q)[(E - S)(K_x(x_{p3} - f(q)) + K_{\dot{x}}(\dot{x}_{p3} - J(q)\dot{q})) + S(K'_F J(q)\dot{q} + K_F(F_{p3} - F_p))], \quad (2)$$

где  $x_{p3}$  – заданное положение рабочего органа;  $F_{p3}$  и  $F_p$  – заданное и развиваемое рабочим органом усилия;  $K_x$  и  $K_{\dot{x}}$  – диагональные матрицы коэффициентов передачи по положению и скорости соответственно;  $K_F$  – диагональная матрица коэффициентов передачи по силе и  $K'_F$  – диагональная матрица демпфирования;  $E$  – единичная матрица,  $S$  – диагональная матрица селективности с элементами 1, соответствующими управлению по силе, и 0 – по положению,  $f(q)$  – преобразование относительных координат звеньев манипулятора к абсолютным координатам положения его рабочего органа.

На рис. 4. представлена структурная схема связанного управления. Вычислитель 1 осуществляет управление по положению, а вычислитель 2 – связанное позиционно-силовое управление.

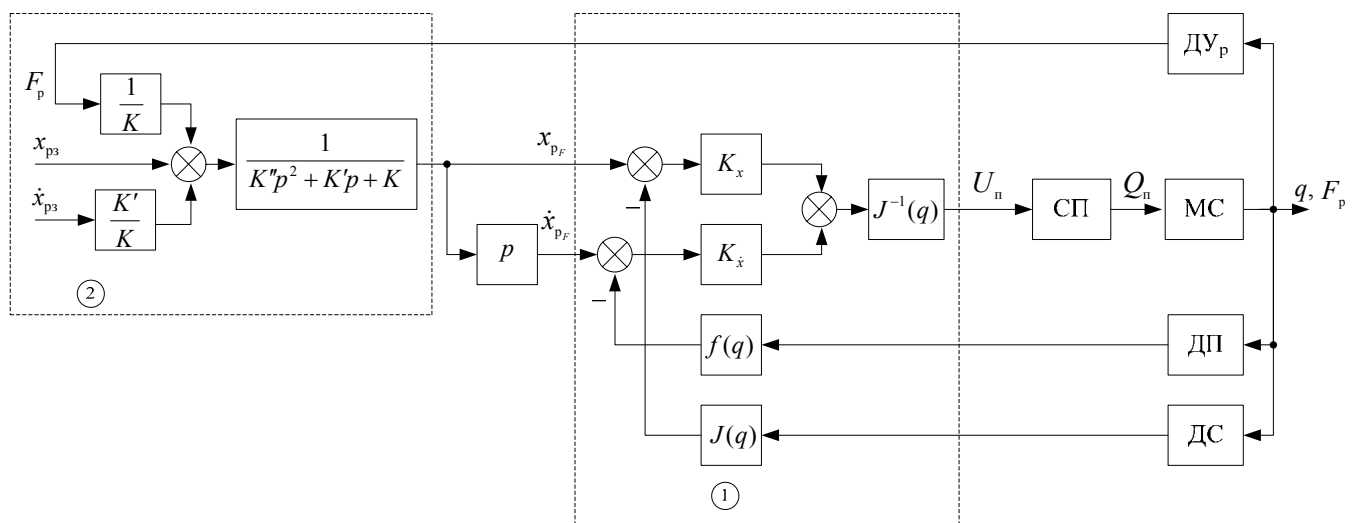


Рис. 4. Структурная схема связанного позиционно-силового управления

Алгоритм этого связанного управления задается выражением для сигналов обратной связи  $x_{pF}$  и  $\dot{x}_{pF}$ , находимых решением уравнения:

$$K''\ddot{x}_{pF} + K'(\dot{x}_{pF} - \dot{x}_{p3}) + K(x_{pF} - x_{p3}) = F_p, \quad (3)$$

где  $K''$ ,  $K'$ ,  $K$  – матрицы коэффициентов настройки этой обратной связи. Такой алгоритм реализует управление импедансом, обеспечивая необходимое гибкое позиционно-силовое взаимодействие с объектами внешней среды с учетом их механических свойств.

При движении в свободном пространстве канал управления по силе отключен (отсутствует сигнал от датчика силы), и система работает в режиме позиционного управления, отрабатывая программную траекторию. При возникновении контакта с объектом внешней среды схема переходит в режим связанного позиционно-силового управления.

При позиционно-силовой работе в автоматизированном режиме с использованием задающих рукояток их кинематические пары и соответствующие степени подвижности манипулятора образуют системы двухстороннего действия симметричного типа, когда законы движения оси задающих рукояток и соответствующих степеней подвижности манипулятора  $q$  определяются действием оператора  $F_{zp}$  и внешних сил  $F_p$ . Обобщенный скоростно-позиционно-силовой алгоритм такого управления имеет вид:

$$U_{п} = J^{-1}(q)[K_x(k_x x_{zp} - x_p) + K_{\dot{x}}(k_{\dot{x}} \dot{x}_{zp} - \dot{x}_p) + K_F(k_F F_{zp} - F_p)], \quad (4)$$

где  $K_x$ ,  $K_{\dot{x}}$ ,  $K_F$  – матрицы коэффициентов настройки обратной связи в каналах управления по положению, скорости и силе соответственно;  $k_x$ ,  $k_{\dot{x}}$ ,  $k_F$  – аналогичные матрицы коэффициентов масштабирования задающей рукоятки.

В качестве одного из каналов определения силы в схеме на рис. 2 используется наблюдатель силы с подстройкой по рассогласованию координат  $q$  модели и реального манипулятора, реализованный по методу S. Nicosia и P. Tomei. На рис. 5 представлена его функциональная схема.

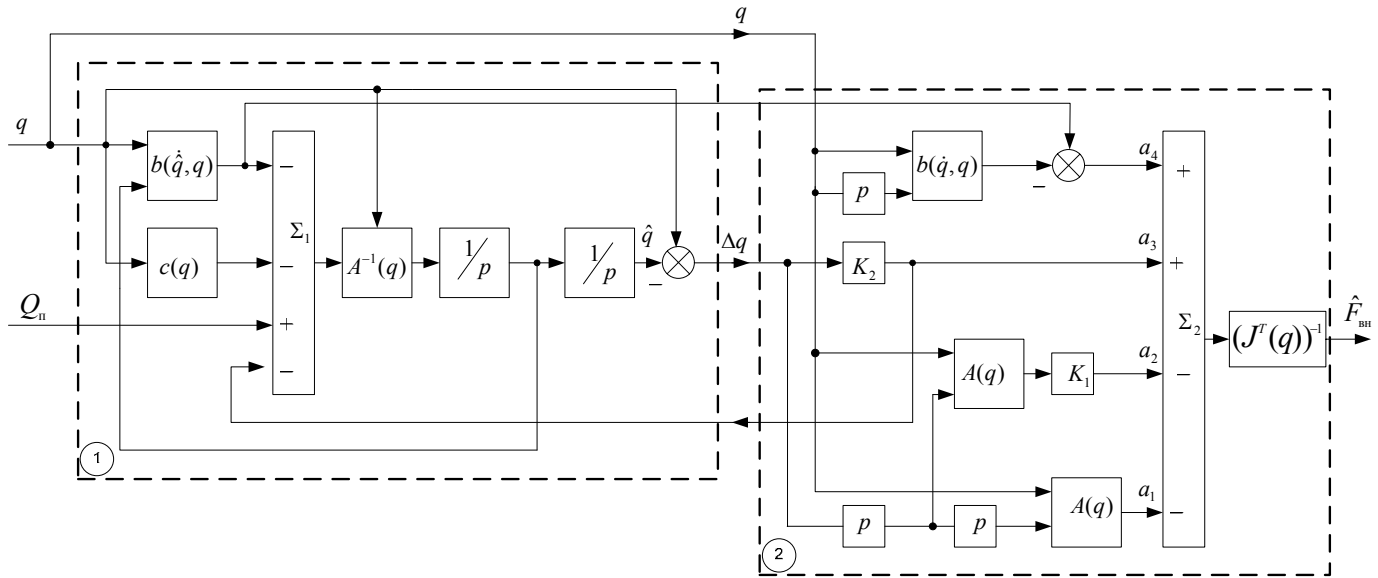


Рис. 5. Наблюдатель силы с подстройкой по рассогласованию:

1 – модель механической системы манипулятора, 2 – вычислитель  $\hat{F}_{\text{вн}}$

Идея этого наблюдателя силы состоит в том, что в модели манипулятора отсутствует искомая сила  $F_{\text{вн}}$ , поэтому она и является причиной указанного рассогласования, которое таким образом может служить ее мерой.

При описании манипулятора уравнением второго порядка эта зависимость также принимает вид уравнения второго порядка, т. е. оценка  $\hat{F}_{\text{вн}}$  представляет динамический процесс с неизбежным инерционным запаздыванием от текущего значения этой силы.

Представим уравнение механической системы манипулятора в виде:

$$\ddot{q} = A^{-1}(q)[Q_n - J^T(q)F_{\text{вн}} - b(\dot{q}, q) - c(q)]. \quad (5)$$

Перепишем уравнение (5) в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= A^{-1}(z_1)[Q_n - J^T(q)F_{\text{вн}} - b(\dot{z}_1, z_1) - c(z_1)] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $z_1 = q$ .

Запишем уравнение наблюдателя без учета  $F_{\text{вн}}$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{z}}_1 &= \hat{z}_2 + K_1 \tilde{z}_1 \\ \dot{\hat{z}}_2 &= A^{-1}(z_1)[Q_n - K_2 \tilde{z}_1 - b(\dot{\hat{z}}_1, z_1) - c(z_1)] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\tilde{z}_1 = z_1 - \hat{z}_1$ .

Матрицы коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  связывают переменные модели манипулятора в наблюдателе силы с переменными самого манипулятора. На

рис. 5 второму уравнению в (7) соответствует вычислитель 1, с помощью которого получается оценка текущих координат  $\hat{q}$ .

Вычитая (7) из (6) получаем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\tilde{z}}_1 &= \tilde{z}_2 - K_1 \tilde{z}_1 \\ \dot{\tilde{z}}_2 &= A^{-1}(z_1)[-J^T(q)F_{\text{вн}} + K_2 \tilde{z}_1 + b(\dot{z}_1, z_1) - b(\dot{z}_1, z_1)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Продифференцируем первое уравнение в (8):

$$\ddot{\tilde{z}}_1 = \dot{\tilde{z}}_2 - K_1 \dot{\tilde{z}}_1 = A^{-1}(z_1)[-J^T(q)F_{\text{вн}} + K_2 \tilde{z}_1 + b(\dot{z}_1, z_1) - b(\dot{z}_1, z_1)] - K_1 \dot{\tilde{z}}_1$$

или

$$a_1 \ddot{\tilde{z}}_1 + a_2 \dot{\tilde{z}}_1 + a_3 \tilde{z}_1 + a_4 = J^T(q)\hat{F}_{\text{вн}}, \quad (9)$$

где  $a_1 = -A(z_1)$ ,  $a_2 = -A(z_1)K_1$ ,  $a_3 = K_2$ ,  $a_4 = b(\dot{z}_1, z_1) - b(\dot{z}_1, z_1)$ .

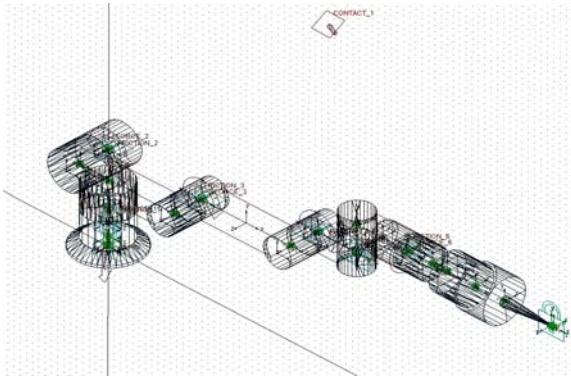
Это уравнение реализовано в вычислителе 2 на рис. 5. В переходном процессе оценка  $\hat{F}_{\text{вн}}$  будет запаздывать от текущего значения  $F_{\text{вн}}$ . Это запаздывание определяется, прежде всего, матрицей инерции  $A(q)$ . Настройка наблюдения определяется значениями коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ . Она должна обеспечивать как устойчивость решения уравнения (9), так и определенное быстродействие и в целом качество переходного процесса определения  $\hat{F}_{\text{вн}}$ . Для определения движущих усилий приводов  $Q_{\text{п}}$  может быть использована как их математическая модель, так и датчики косвенных переменных.

**В главе 3** – «Аналитическое и компьютерное исследование комбинированной системы позиционно-силового управления», приведено описание разработанной математической модели исследуемой системы, ее программной реализации и изложены результаты проведенного на их основе исследования позиционно-силового управления манипуляторами.

В качестве основного объекта исследования выбран макет космического манипулятора DORES, разработанный в ГНЦ ЦНИИ РТК. Алгоритмы позиционно-силового управления и модель механической системы реализованы с помощью специализированной библиотеки Robotics toolbox пакета научно-инженерных расчетов MATLAB, его подсистемы SIMULINK и пакета конечно-элементного моделирования MSC.ADAMS. На рис. 6,а представлена модель механической системы манипулятора, а на рис. 6,б дан общий вид

компьютерной модели системы позиционно-силового управления с применением наблюдателя силы.

а)



б)

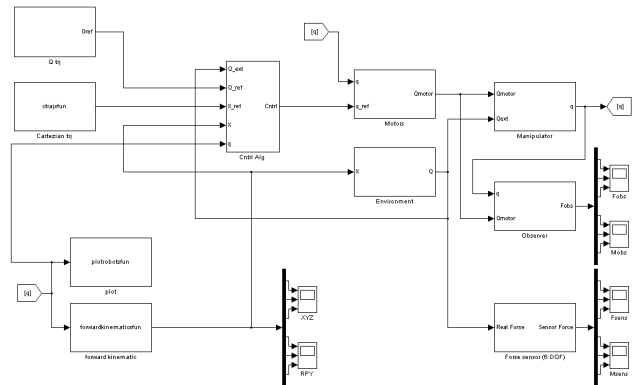
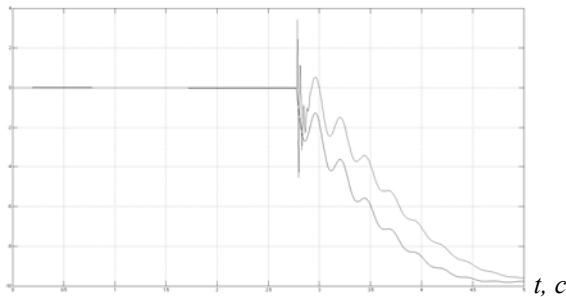


Рис. 6. Модель манипулятора DORES: а) механической части в MSC.ADAMS, б) системы управления в Simulink

На рис. 7 даны примеры результатов компьютерного моделирования алгоритмов позиционно-силового управления и наблюдателей силы.

а)

$F_x, H$



б)

$F_x, H$

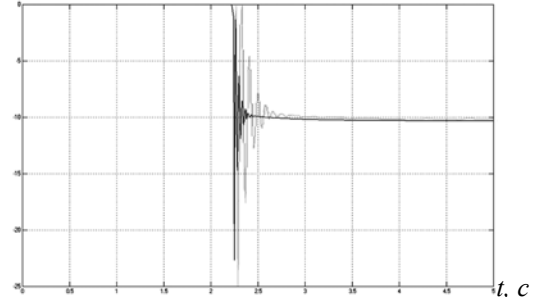


Рис. 7. Внешняя сила и ее оценка с помощью наблюдателя силы с подстройкой по рассогласованию при выходе на контакт вдоль оси  $Ox$ :

а) связанное, б) независимое позиционно-силовое управление

Результаты компьютерного моделирования подтвердили эффективность предложенных алгоритмов управления и способов оценки силы, а также позволили уточнить последние. В целом связанное управление имеет лучшие характеристики по сравнению с независимым управлением при выходе на контакт и работе с жесткими средами. Переход к независимому управлению можно осуществлять при реализации специальных технологических операций, требующих точной отработки программного задания по силе, особенно если работа осуществляется в направлении, связанном со степенью подвижности конечного звена манипулятора. Нелинейности механической части

электропривода, обусловленные люфтом передаточного механизма и сухим трением, являются причиной существенных паразитных колебаний выходного сигнала наблюдателя силы. Заметное влияние оказывают также переходные процессы в самом электроприводе, особенно в режимах с выходом в насыщение. В целом оценка силового взаимодействия манипулятора с объектами внешней среды при помощи наблюдателей уступает датчикам силы по точности и быстродействию, что ограничивает области самостоятельного применения этого привлекательного своей простотой и дешевизной способа силового очувствления.

**В главе 4** – «Экспериментальное исследование манипуляционной системы с позиционно-силовым управлением», исследованы предложенные алгоритмы комбинированного позиционно-силового управления на макете космического манипулятора DORES. На рис. 8 представлен экспериментальный стенд, включающий макет рабочего органа на основе пьезорезистивного датчика FSG-15N1A фирмы Honeywell. Подключение к ЭВМ осуществляется через интерфейс RS-232 посредством 16-разрядного микроконтроллера MSP430 фирмы Texas Instruments.

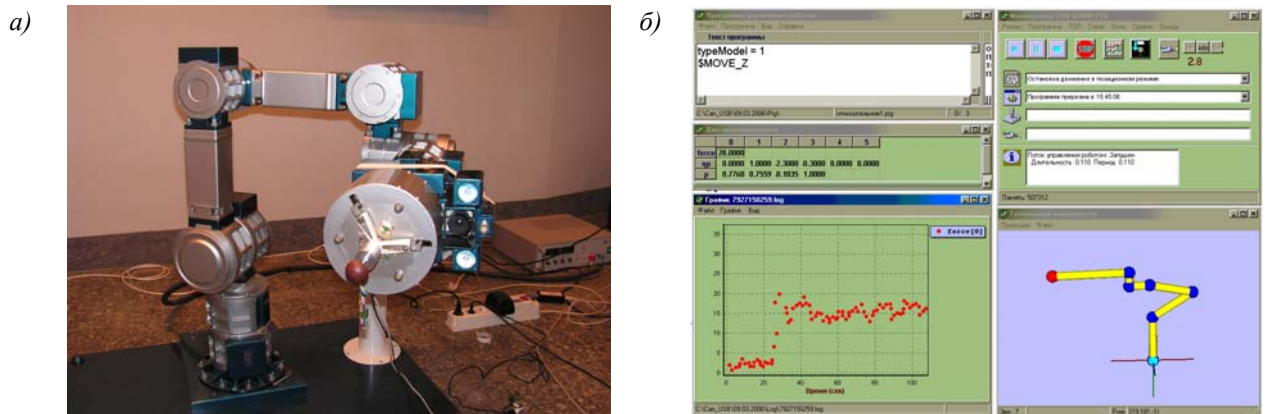


Рис. 8. Экспериментальный стенд: в) внешний вид, г) интерфейс супервизорной системы управления

Результаты экспериментов на макете космического манипулятора DORES показали адекватность компьютерной модели и подтвердили эффективность предложенных подходов к построению комбинированного позиционно-силового управления манипуляторами.



В **заключении** сформулированы следующие основные научные и практические результаты диссертационной работы:

1. Предложены алгоритмы и разработано соответствующее программное обеспечение для комбинированных систем позиционно-силового управления, сочетающих возможности автоматического и автоматизированного управления.

2. Разработана методика синтеза таких систем управления, апробированная при создании конкретных манипуляционных систем, отработана методика их настройки.

3. Предложены принципы и структурные схемы комплексирования силомоментных сенсорных систем и соответствующих наблюдателей, позволяющие существенно расширить диапазоны силового очувствления. Разработаны типовые структуры такого комбинированного силового очувствления.

4. Разработаны математические модели систем позиционно-силового управления манипуляторами и их программная реализация, предназначенная для исследования и синтеза такого типа систем управления различного назначения, а также для учебных целей.

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**1. Попов А.В. О способах оценки сил и моментов при взаимодействии манипулятора с окружающей средой // Научно-Технические Ведомости СПбГТУ, 2006. – № 5. Т.1. Естественные и технические науки. – С. 169-172.**

**2. Попов А.В., Юревич Е.И. Позиционно-силовое управление манипуляторами: состояние и перспективы // Мехатроника, автоматизация и управление, 2008. – № 5. Приложение. – С. 2-6.**

3. Попов А.В., Юревич Е.И. Перспективы силового очувствления в робототехнике // Материалы седьмой международной научно-технической конференции «Искусственный интеллект. Интеллектуальные и много-процессорные системы-2006». – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – С. 180-184.

4. Попов А.В. Перспективы применения наблюдателей силы в системах управления манипуляторами // Материалы первой Российской мульти-

конференции по проблемам управления «Мехатроника, Автоматизация, Управление». – СПб., 2006. – С. 265-269.

5. Попов А.В., Юревич Е.И. Разработка и исследование компьютерной модели прецизионного манипулятора // XXXIV Неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – Ч.5 – С. 192-194.

6. Попов А.В., Юревич Е.И. Компьютерное моделирование алгоритмов управления манипуляторами с учетом динамики средствами MATLAB и MSC.ADAMS // XXXV Неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – Ч.5. – С. 170-172.

7. Попов А.В. Комбинированная система позиционно-силового управления роботом-манипулятором с использованием наблюдателя силы // Системы и средства искусственного интеллекта. Тезисы докладов 1-й Международной научной молодежной школы. – Донецк: «Наука і освіта», 2007. – С. 103-108.

8. Попов А.В. Разработка компьютерной модели системы позиционно-силового управления технологическим манипулятором специального назначения // Материалы Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 72-74.

9. Попов А.В., Юревич Е.И. Роботы с силовым очувствлением. – СПб.: Астерион, 2008. – 74 с.

10. Попов А.В., Васильева М.В. Разработка компьютерной модели системы связанного позиционно-силового управления манипулятором // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – Ч.5. – С. 151.

11. Попов А.В., Утенков Е.А. Разработка и исследование компьютерной модели наблюдателя силы для манипулятора «ДОРЕС» // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – Ч.5. – С. 152.