

На правах рукописи

ЗУЕВ Александр Валерьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО
УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Владивосток
2010

Работа выполнена в лаборатории робототехнических систем
Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения
РАН.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Филаретов Владимир Федорович
Заслуженный деятель науки РФ,
Заслуженный изобретатель РФ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Ащепков Леонид Тимофеевич

кандидат технических наук, доцент
Змеу Константин Витальевич

Ведущая организация: Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН (г. Москва)

Защита состоится «25» июня 2010 г. в 10 часов на заседании
диссертационного совета Д 005.007.01 в Институте автоматики и процессов
управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
автоматики и процессов управления ДВО РАН.

Автореферат разослан «21» мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 005.007.01,
к.т.н.



А.В. Лебедев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка позиционно-силовых систем управления многозвенными манипуляторами, способных обеспечить не только быстрое и точное перемещение рабочего инструмента по сложным пространственным траекториям вдоль различных поверхностей, но и требуемое силовое воздействие на эти обрабатываемые поверхности, является важной и актуальной задачей современной робототехники. Манипуляторы с указанными свойствами необходимы в сборочном производстве, а также для быстрого автоматического выполнения многих сложных и ответственных технологических операций, которые требуют точной механической обработки различных поверхностей и материалов: абразивная зачистка, шлифовка, резка изделий, удаление заусенцев, обработка кожи и др.

В настоящее время существует несколько методов задания контролируемых усилий на объекты работ со стороны манипуляционных механизмов. Значительный вклад в их создание и развитие внесли отечественные и зарубежные ученые Д.М. Гориневский, Г.В. Письменный, Ю.В. Подураев, А.М. Формальский, А.Ю. Шнейдер, Е.И. Юревич, J.J. Craig, N. Hogan, F.Y. Hsu, M. Iwasaki, S. Jung, O. Khatib, C. Kwan, M. Namvar, M.H. Raibert, V. Siciliano, C.J. Tsaprounis, M. Vukobratovic, D. Wang, T. Yoshikawa и др. Для реализации известных методов и подходов требуется наличие специально создаваемой «просадки» - электромеханической упругости в исполнительных элементах многозвенника (при импедансном управлении), использование дорогих и громоздких силомоментных датчиков или раздельное управление степенями подвижности манипулятора по силе и по положению. Это не позволяет эффективно и с помощью относительно простых технических средств решать задачу позиционно-силового управления многозвенными манипуляторами (особенно при больших скоростях движения рабочего инструмента). В результате возникает задача разработки таких новых подходов и методов синтеза указанных систем, которые были бы лишены отмеченных недостатков. Эта задача относится к созданию новых критических технологий в области мехатроники.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является разработка и исследование нового метода позиционно-силового управления многозвенными манипуляторами, обеспечивающего одновременное высокоточное управление и движением рабочего инструмента, и его силовым воздействием на внешние объекты и обрабатываемые поверхности.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработать подход к синтезу позиционно-силового управления многозвенными манипуляторами, основанный на управлении электроприводом каждой его степени подвижности одновременно по положению и по развиваемому моменту;

- разработать и исследовать регуляторы, позволяющие одновременно точно управлять положением выходного вала электропривода манипулятора и внешним моментом, развиваемым на нем;

- разработать самонастраивающиеся корректирующие устройства, позволяющие компенсировать нелинейности и взаимовлияния между всеми степенями подвижности многозвенного манипулятора при позиционно-силовом управлении;

- разработать алгоритм расчета желаемых значений внешних моментов для многозвенных манипуляторов.

Методы исследования. В процессе выполнения диссертации использовались методы теории автоматического управления, оптимальных систем, дифференциальных уравнений, теоретической механики, а также методы численного моделирования разработанных систем управления.

Научная новизна.

1. Предложен и обоснован метод синтеза систем позиционно-силового управления многозвенными манипуляторами без использования силомоментных датчиков и снижения жесткости механизма за счет одновременного управления электроприводом каждой степени подвижности многозвенника по положению и развиваемому внешнему моменту.

2. Сформированы законы управления приводами манипулятора по положению и развиваемому внешнему моменту на основе квадратичного критерия качества, обеспечивающие минимизацию ошибок по этим двум составляющим с учетом эффектов взаимовлияния между степенями подвижности многозвенника.

3. Предложен принцип построения самонастраивающихся корректирующих устройств для системы позиционно-силового управления, стабилизирующих параметры приводов манипулятора в условиях сильного взаимовлияния с сохранением моментных составляющих силового воздействия на объекты работ.

4. Предложена модификация рекуррентного алгоритма решения обратной задачи динамики манипулятора, учитывающая наличие компенсации эффектов взаимовлияния и обеспечивающая точный расчет только программных значений внешних моментов для каждой степени подвижности многозвенника с произвольной кинематической схемой.

Практическая ценность и реализация результатов. На основе разработанного в диссертации метода могут быть синтезированы легко реализуемые позиционно-силовые системы управления для многозвенных манипуляторов с различными кинематическими схемами, позволяющие без использования дополнительного оборудования и снижения жесткости многозвенника обеспечивать высокоточное управление и движением рабочего инструмента, и его силовым воздействием на объекты работ. Манипуляторы с такими системами управления позволят заменить человека при выполнении высокоточных ответственных силовых технологических операций, значительно повышая производительность труда.

Полученные в диссертации результаты использованы в ОАО Аскольд, ОАО ААК Прогресс (г. Арсеньев) и международной лаборатории «Сенсорика» (г. Москва), а также в учебном процессе ДВГТУ (при подготовке магистров по направлению 220200 – «Автоматизация и управление»).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на конференции IEEE по разработке и диагностике систем (Сочи, 2006 г.), 18-м международном симпозиуме DAAAM по интеллектуальной автоматизации производства (Задар, Хорватия, 2007 г.), международной конференции IEEE/ASME по перспективной интеллектуальной мехатронике (Сиань, Китай, 2008 г.), 9-ой конференции ASME по созданию и анализу инженерных систем (Хайфа, Израиль, 2008 г.), XXXIII Дальневосточной мат. школе-семинаре им. акад. Е.В. Золотова (Владивосток, 2008 г.), конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2009 г.), 6-ой Дальневосточной конф. студентов и аспирантов по математическому моделированию (Владивосток, 2007 г.), научных конференциях «Вологдинские чтения» (Владивосток, 2007 и 2008 гг.), Первой традиционной школе-семинаре «Управление, информация и оптимизация» (г. Переславль-Залесский, 2009 г.), Объединенном семинаре по робототехническим системам ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИНОТиИ РГГУ (Москва, 2010 г.), а также на объединенном научном семинаре Института автоматики и процессов управления ДВО РАН (Владивосток, 2009 г.).

Результаты, полученные в диссертации, отмечены медалью Правительства России «За лучшую научную студенческую работу» (2007 г.), а также медалью «За лучшую научную работу» по направлению «Специальное машиностроение» на Всероссийском конкурсе Будущее машиностроения России в 2009 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 2 из них в рекомендуемых ВАК РФ научных журналах и 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 139 наименований. Основное содержание работы изложено на 119 страницах машинописного текста. Работа содержит 27 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность разработки высокоточных позиционно-силовых систем управления многозвенными манипуляторами, сформулированы цели исследования, дано общее содержание, характеристика и результативность исследований, выполненных в диссертационной работе.

В первой главе проведен анализ технологических операций, для качественного автоматического выполнения которых необходимо одновременно точно управлять движением схвата манипулятора и развиваемым им усилием. Приведены результаты детального анализа существующих подходов и методов синтеза позиционно-силовых систем управления манипуляторами. Выявлены особенности и недостатки этих подходов и методов, не позволяющие их эффективно применять при выполнении скоростных технологических операций.

На основе проведенного анализа было определено, что решить задачу точного и достаточно легко реализуемого позиционно-силового управления многостепенными манипуляторами без использования силомоментных датчиков и снижения жесткости многозвенника можно только обеспечив одновременное точное управление электроприводом каждой степени подвижности и по положению, и по развиваемому внешнему моменту с учетом эффектов взаимовлияния между всеми степенями подвижности многозвенника.

Синтез позиционно-силовых систем управления в диссертации предлагается осуществлять, начиная с уровня приводов манипуляторов. Для этого, используя принцип декомпозиции, всю систему управления многозвенником планируется разбить на сепаратные подсистемы управления электроприводами отдельных степеней подвижности. Однако при этом следует полностью учитывать и сохранять все эффекты взаимовлияния между всеми его степенями подвижности и каналами управления, а каждый привод манипулятора должен отрабатывать такой закон движения и создавать такой внешний момент, которые (в совокупности с приводами остальных степеней подвижности) должны обеспечить не только требуемое пространственное движение рабочего инструмента с заданной ориентацией, но и получение желаемого силового воздействия рабочего инструмента, расположенного в схвате, на объекты работ. Для реализации этой стратегии необходимо обеспечить точное управление каждым приводом манипулятора одновременно и по положению, и по развиваемому внешнему моменту. При этом необходимо разработать метод синтеза таких систем управления приводами, которые обеспечивали бы одновременную точную минимизацию ошибок по управлению двумя этими компонентами.

Однако при движении многозвенных манипуляторов появляются сложные взаимовлияния между всеми их степенями подвижности. Эти взаимовлияния приводят к существенным изменениям параметров нагрузки во всех приводах, установленных в соответствующих степенях подвижности многозвенников. В результате указанные приводы становятся объектами с существенно и быстро изменяющимися параметрами. Поэтому точно управлять ими по положению и развиваемому моменту с помощью традиционных систем не представляется возможным.

Решить поставленную в диссертации задачу предлагается в три этапа. На первом планируется устранить взаимовлияния во всех переносных

степенях подвижности движущихся манипуляторов с помощью самонастраивающихся корректирующих устройств, точно стабилизирующих параметры их электроприводов на номинальном уровне, но при этом сохранить их внешние нагрузочные моменты, необходимые для создания заданного усилия рабочего инструмента. После этого для приводов с номинальными постоянными параметрами предполагается синтезировать регуляторы, обеспечивающие одновременное управление и их положением, и развиваемым внешним моментом. И, наконец, для реализации синтезированного позиционно-силового закона управления каждым электроприводом манипулятора в реальном масштабе времени планируется построить алгоритм быстрого вычисления программных значений внешних моментов, которые в совокупности при текущей конфигурации многозвенника обеспечат требуемое силовое воздействие рабочего инструмента на объекты работ. Последовательное выполнение этих трех этапов позволит создать метод синтеза высокоточного позиционно-силового управления различными манипуляторами.

Во второй главе рассмотрены особенности и выбраны пути эффективного решения задач, возникающих при реализации разрабатываемого метода синтеза.

Для реализации управления каждым электроприводом манипулятора одновременно и по положению, и по развиваемому моменту предложено использовать известный метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов, построенный на основе квадратичного критерия качества. Этот метод позволяет синтезировать регуляторы, обеспечивающие одновременную точную минимизацию ошибок по выбранным фазовым координатам различных динамических объектов управления. Синтез позиционно-силовых регуляторов для электроприводов на основе данного метода предлагается осуществлять, выбирая в качестве фазовых координат при описании динамики этих электроприводов угол поворота выходного вала редуктора, скорость вращения ротора двигателя и развиваемый электроприводом момент. В этом случае с помощью квадратичного функционала удастся одновременно минимизировать ошибки и по положению, и по развиваемому моменту для конкретного электропривода.

При использовании метода аналитического конструирования оптимальных регуляторов необходимо иметь объект управления с постоянными параметрами, поэтому указанные параметры перед применением этого метода необходимо заставить стабилизировать на некотором номинальном уровне. Выполненный анализ показал, что для создания самонастраивающихся регуляторов, стабилизирующих параметры электроприводов на номинальном уровне, наиболее рационально использовать подход структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления и развитых на его основе методов применительно к электроприводам манипуляторов.

Однако в отличие от описания электроприводов манипуляторов, предназначенных только для позиционного управления, в дифференциальных уравнениях с постоянными коэффициентами, которые определяют требуемые динамические свойства электроприводов при позиционно-силовом управлении, в диссертации предлагается дополнительно выделять сигналы внешних моментов M_B , которые должен развить каждый электропривод манипулятора для создания результирующего силового воздействия рабочего инструмента на объекты работ. То есть желаемое дифференциальное уравнение каждого электропривода манипулятора предлагается записывать в виде:

$$L(J\ddot{\alpha} + \dot{M}_B^*) + R(J\ddot{\alpha} + M_B^*) + K_\omega K_M \dot{\alpha} = K_y K_M \tilde{u}, \quad (1)$$

где L – индуктивность цепи якоря; R – активное сопротивление цепи якоря; J – номинальный момент инерции ротора электродвигателя с инерционной нагрузкой; K_ω – коэффициент противо-э.д.с.; K_M – коэффициент крутящего момента; K_y – коэффициент усиления усилителя мощности; \tilde{u} – сигнал управления, поступающий на вход вводимого самонастраивающегося корректирующего устройства; $M_B^* = M_B/\mu$ – величина M_B , приведенная к валу двигателя; μ – передаточное отношение редуктора; α – угол вращения ротора электродвигателя.

Дифференциальное уравнение (1) описывает желаемые динамические свойства каждого нагруженного электропривода манипулятора, обеспечивающего с учетом его текущей кинематики создание требуемого силового воздействия на объекты работ. Но для быстрого формирования M_B для электропривода каждой степени подвижности многозвенника в процессе его движения должен быть создан эффективный алгоритм решения обратной задачи динамики манипулятора. В данной главе диссертации было показано, что эта обратная задача может быть успешно решена в реальном масштабе времени для любого многозвенника с помощью известного, но модифицированного рекуррентного алгоритма, в котором исключены составляющие инерционных, центробежных и кориолисовых сил движущихся звеньев, а также другие эффекты взаимовлияния между всеми его степенями подвижности.

В третьей главе на основе квадратичного критерия качества, позволяющего минимизировать и ошибки слежения, и ошибки передачи моментов, разработан и исследован новый метод синтеза позиционно-силовых регуляторов для отдельных электроприводов манипулятора с постоянными параметрами. В результате удалось одновременно точно управлять положением выходных валов этих электроприводов и их внешними моментами M_B .

При создании этого метода было использовано дифференциальное уравнение, описывающее электропривод постоянного тока с независимым возбуждением или с постоянными магнитами при позиционно-силовом управлении относительно вектора ошибок $\varepsilon = x - x^{\text{ж}} \in R^3$

$$\dot{\varepsilon} = A\varepsilon + Bu + \omega, \quad (2)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad \omega = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{23}(M_{\text{В}}^{*\text{ж}} - M_{\text{В}}^*) \\ a_{32}x_2^{\text{ж}} + a_{33}J\dot{x}_2^{\text{ж}} - J\ddot{x}_2^{\text{ж}} + a_{33}M_{\text{В}}^{*\text{ж}} - \dot{M}_{\text{В}}^{*\text{ж}} \end{bmatrix},$$

$$a_{12} = \frac{1}{\mu}, \quad a_{23} = \frac{1}{J}, \quad a_{32} = -\frac{K_{\text{М}}K_{\omega}}{L}, \quad a_{33} = -\frac{R}{L}, \quad b_3 = \frac{K_{\text{у}}K_{\text{М}}}{L}, \quad x = [\alpha_{\text{н}}, \dot{\alpha}, M_{\text{д}}]^T \in R^3 -$$

вектор фазовых координат электропривода; $x^{\text{ж}} \in R^3$ – вектор желаемых значений соответствующих фазовых координат; $\alpha_{\text{н}}$ – угол поворота вала редуктора; u – напряжение на входе усилителя мощности; $M_{\text{В}}^{*\text{ж}}$ – желаемый приведенный к валу соответствующего электродвигателя внешний момент, который он должен развивать для создания требуемого результирующего силового воздействия рабочего инструмента манипулятора на объект работ.

На основе созданного метода для уравнения электропривода (2) был получен закон позиционно-силового управления

$$u(t) = -D_1^{\lambda}[\alpha_{\text{н}} - \alpha_{\text{н}}^{\text{ж}}] - D_2^{\lambda}\dot{\alpha} + a_{23}D_2^{\text{ВХ}}J\ddot{\alpha} - [D_3^{\lambda} + a_{23}D_2^{\text{ВХ}}]K_{\text{М}}I + [D_2^{\lambda} + a_{32}D_3^{\text{ВХ}}]\dot{\alpha}^{\text{ж}} + [D_3^{\lambda} + a_{33}D_3^{\text{ВХ}}]J\ddot{\alpha}^{\text{ж}} + [D_3^{\lambda} + a_{23}D_2^{\text{ВХ}} + a_{33}D_3^{\text{ВХ}}]M_{\text{В}}^{*\text{ж}} - D_3^{\text{ВХ}}\dot{M}_{\text{В}}^{*\text{ж}}, \quad (3)$$

минимизирующий квадратичный функционал

$$J(u, \varepsilon) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\tilde{T}} (\varphi_{11}\varepsilon_1^2 + \varphi_{22}\varepsilon_2^2 + \varphi_{33}\varepsilon_3^2 + u^2) dt, \quad (4)$$

где φ_{11} , φ_{22} , φ_{33} – весовые коэффициенты; D_1^{λ} , D_2^{λ} , D_3^{λ} , $D_2^{\text{ВХ}}$, $D_3^{\text{ВХ}}$ – коэффициенты усиления обратных связей; I – ток якорной цепи электропривода; t_0, \tilde{T} – соответственно начальное и конечное время интегрирования ($\tilde{T} \rightarrow \infty$).

Для реализации синтезированного закона позиционно-силового управления (3) необходимо вводить обратные связи по координатам электропривода: $\alpha_{\text{н}}$, $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$, I , а также связи по желаемым значениям: $\alpha_{\text{н}}^{\text{ж}}$, $\dot{\alpha}^{\text{ж}}$, $\ddot{\alpha}^{\text{ж}}$, $M_{\text{В}}^{*\text{ж}}$, $\dot{M}_{\text{В}}^{*\text{ж}}$. Если законы изменения $\alpha_{\text{н}}^{\text{ж}}$, $M_{\text{В}}^{*\text{ж}}$ во времени заранее заданы, то получить законы изменения во времени координат $\dot{\alpha}^{\text{ж}}$, $\ddot{\alpha}^{\text{ж}}$, $\dot{M}_{\text{В}}^{*\text{ж}}$,

не представляет затруднений, причем это делается также заранее до начала работы приводов.

Для исследования работоспособности и эффективности предлагаемого подхода в диссертации было проведено численное моделирование разработанной системы управления (3) для отдельного электропривода постоянного тока. На рис. 1 изображены ошибки по положению ε_1 и моменту ε_3 электропривода при отработке его валом гармонического сигнала $\alpha_H^*(t) = 1 - \cos(1 \cdot t)$ рад и одновременном создании на нем переменного внешнего момента $M_B^*(t) = 50 \cdot \sin(1 \cdot t)$ Нм. Символами ε_1^{**} и ε_3^{**} на рис. 1 обозначены, соответственно, изменения ошибок по положению и моменту при создании на выходном валу электропривода постоянного внешнего момента $M_B^*(t) = 50$ Нм, а символом ε_1^* – значение ошибки электропривода по положению при работе только в следящем режиме при отсутствии внешних моментных воздействий.

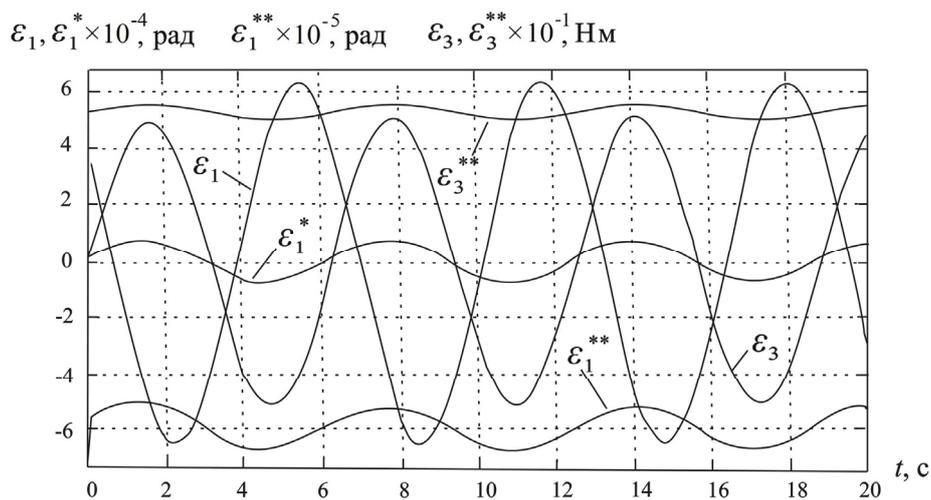


Рис. 1. Ошибки по положению $\varepsilon_1, \varepsilon_1^*, \varepsilon_1^{**}$ и по моменту $\varepsilon_3, \varepsilon_3^{**}$ электропривода с позиционно-силовым и позиционным управлением

В этой же главе было проведено исследование влияния погрешностей измерения датчиков скорости, ускорения и тока на качество работы синтезированного позиционно-силового управления. При этом численные значения указанных погрешностей при моделировании принимались равными максимально допустимым значениям погрешностей датчиков, применяемых в современной робототехнике. Результаты исследований показали, что при наличии типовых погрешностей измерений или шумов синтезированная система управления не теряет работоспособности, а ошибки управления, как по положению выходного вала, так и по развиваемому на нем моменту увеличиваются, но незначительно. Причем наиболее чувствительной синтезированная система оказывается к погрешностям показаний датчика тока.

В данной главе диссертации представлены и результаты натурных экспериментов, проводимых с использованием электромеханического стенда, общий вид которого показан на рис. 2. Этот стенд содержит электродвигатель постоянного тока с постоянными магнитами, с цифровым управлением и со специальной системой подвеса, обеспечивающей создание на его валу внешнего нагрузочного момента. Экспериментальное исследование синтезированной позиционно-силовой системы управления проводилось при задании линейного закона увеличения (в функции времени) угла поворота электропривода с постоянным внешним моментом, равным $M_B^*(t) = 2.6 \text{ Нм}$. Полученные в эксперименте ошибки по положению электропривода и по развиваемому им моменту показаны на рис. 3 и рис. 4, соответственно



Рис. 2. Общий вид лабораторного электромеханического стенда

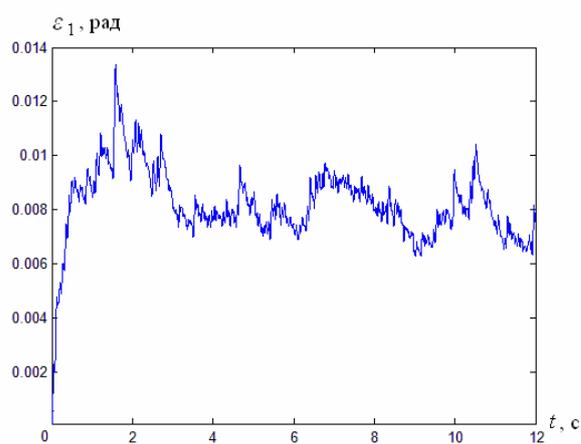


Рис. 3. Ошибка электропривода по положению выходного вала

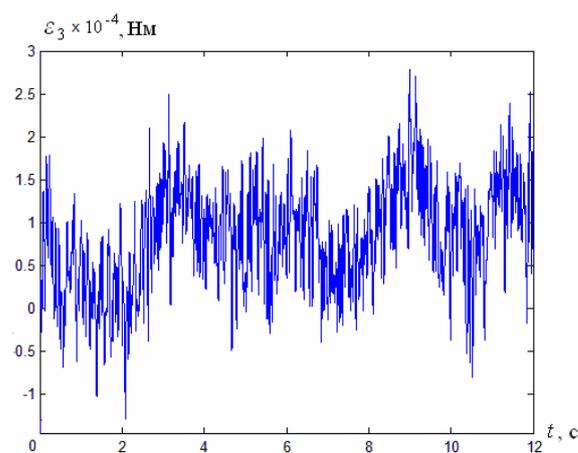


Рис. 4. Ошибка электропривода по развиваемому моменту

Результаты математического моделирования и натурных экспериментов полностью подтвердили эффективность и высокое качество

работы позиционно-силовых систем управления сепаратными электроприводами, синтезированных на основе предложенного подхода и метода. Причем указанные системы управления одновременно обеспечивали высокую точность управления и положениями выходных валов электроприводов, и развиваемыми ими моментами.

В четвертой главе диссертации на основе разработанного метода проводится синтез позиционно-силовой системы управления многозвенным манипулятором, имеющим сложную кинематическую схему.

Полный момент, развиваемый в i -ой степени подвижности многозвенного манипулятора, перемещающего рабочий инструмент по произвольным пространственным траекториям с силовым воздействием на объект работ, может быть описан в виде:

$$P_i = H_i(q)\ddot{q}_i + h_i(q, \dot{q})\dot{q}_i + M_i(q, \dot{q}, \ddot{q}), \quad (5)$$

где $i = \overline{1, n}$; n – число степеней подвижности манипулятора; $q \in R^n$ – вектор его обобщенных координат; $H_i(q)$ – компонента, характеризующая инерционные свойства соответствующей степени подвижности манипулятора; $h_i(q, \dot{q})$ – компонента кориолисовых и скоростных сил (для некоторых степеней подвижности манипулятора она равна нулю); $M_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = M_{Bi}(q) + M_{Ei}(q, \dot{q}, \ddot{q})$; $M_{Ei}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ – моментное воздействие, учитывающее гравитационные силы и эффекты взаимовлияния между всеми степенями подвижности манипулятора в процессе его движения.

Форма записи уравнений (5) дает возможность эффективно решить задачу синтеза самонастраивающихся корректирующих устройств для всех электроприводов многозвенного манипулятора при позиционно-силовом управлении, поскольку она позволяет выделить в каждом обобщенном моменте составляющие инерционных и скоростных сил движущихся звеньев, а также другие составляющие эффектов взаимовлияния между всеми степенями подвижности манипулятора, которые необходимо или стабилизировать, или компенсировать. Кроме того, эта форма позволяет выделить моменты $M_{Bi}(q)$, необходимые для создания требуемого силового воздействия рабочего инструмента манипулятора на объекты работ, которые необходимо оставить без изменений для дальнейшего синтеза позиционно-силовой системы управления этим манипулятором в целом.

С учетом выражения (5) в данной главе был получен общий вид дифференциального уравнения каждого нагруженного электропривода, управляющего i -ой степенью подвижности манипулятора в позиционно-силовом режиме

$$L_i(H_i^* + J_i)\ddot{\alpha}_i + [L_i(2h_i^* + K_{Bi}) + R_i(H_i^* + J_i)]\dot{\alpha}_i + [L_i\dot{h}_i^* + R_i(h_i^* + K_{Bi}) + K_{\omega i}K_{Mi}]\alpha_i + R_i(M_{Bi}^* + M_{Ei}^* + M_{cтp i}) + L_i(\dot{M}_{Bi}^* + \dot{M}_{Ei}^*) = K_{yi}K_{Mi}u_i, \quad (6)$$

где $M_{\text{стр}i}$ – момент сухого трения; $K_{\text{в}i}$ – коэффициент вязкого трения; $H_i^* = H_i/\mu_i^2$, $h_i^* = h_i/\mu_i^2$, $M_{\text{Е}i}^* = M_{\text{Е}i}/\mu_i$, $\dot{h}_i^* = \dot{h}_i/\mu_i^2$ и $\dot{M}_{\text{Е}i}^* = \dot{M}_{\text{Е}i}/\mu_i$ – соответствующие величины H_i , h_i , $M_{\text{Е}i}$, \dot{h}_i и $\dot{M}_{\text{Е}i}$, приведенные к валам соответствующих электродвигателей.

Из уравнения (6) видно, что электроприводы многозвенных манипуляторов с учетом эффектов взаимовлияния между всеми степенями подвижности описываются дифференциальными уравнениями третьего порядка с существенно переменными параметрами. Причем некоторые из этих параметров в отдельных режимах работы могут даже изменять знак. Для стабилизации динамических свойств, а следовательно, и показателей качества работы электроприводов, описываемых дифференциальными уравнениями (6), на некотором номинальном уровне был получен закон их самонастройки

$$\begin{aligned}
 u_i = & \frac{(J_i + H_i^*)}{J_i} \tilde{u}_i + \frac{L_i(2h_i^* + K_{\text{в}i})}{K_{\text{y}i}K_{\text{м}i}} \ddot{\alpha}_i + \frac{1}{K_{\text{y}i}K_{\text{м}i}} [L_i\dot{h}_i^* + R_i(h_i^* + K_{\text{в}i}) + \\
 & + K_{\text{о}i}K_{\text{м}i}(1 - \frac{(J_i + H_i^*)}{J_i})] \dot{\alpha}_i + \frac{R_i}{K_{\text{y}i}K_{\text{м}i}} [M_{\text{в}i}^*(1 - \frac{(J_i + H_i^*)}{J_i}) + M_{\text{Е}i}^* + \\
 & + M_{\text{стр}i}] + \frac{L_i}{K_{\text{y}i}K_{\text{м}i}} [\dot{M}_{\text{в}i}^*(1 - \frac{(J_i + H_i^*)}{J_i}) + \dot{M}_{\text{Е}i}^*], \quad (7)
 \end{aligned}$$

который обеспечивает преобразование дифференциального уравнения (6) с существенно переменными параметрами в уравнение (1) с постоянными желаемыми коэффициентами. На основе этого закона для каждой степени подвижности манипулятора были построены самонастраивающиеся регуляторы, один из которых защищен патентом [3]. В выражении (7) сигнал $M_{\text{в}i}^*$ определяется из уравнения моментов на валу нагруженного электропривода

$$M_{\text{в}i}^* = K_{\text{м}i}I_i - (H_i^* + J_i)\ddot{\alpha}_i - (h_i^* + K_{\text{в}i})\dot{\alpha}_i - M_{\text{Е}i}^* - M_{\text{стр}i}.$$

Однако, после введения самонастраивающейся коррекции (7) для разработки позиционно-силового управления на основе метода, предложенного в третьей главе, требуется вводить некоторые дополнительные модификации. Дело в том, что у электроприводов с самонастраивающейся коррекцией вида (7), в итоге описываемых уравнением вида (1), координата x_{3i} отличается по величине от той же координаты у электроприводов с заведомо постоянными параметрами, поскольку в самонастраивающихся электроприводах развивается дополнительный момент, компенсирующий соответствующие нелинейности

и эффекты взаимовлияния между степенями подвижности. Для учета этой важной особенности координату $x_{3i}^{жк}$ предлагается формировать в виде:

$$x_{3i}^{жк} = M_{Bi}^{*жк} + (H_i^* + J_i)\dot{x}_{2i}^{жк} + (h_i^* + K_{Bi})x_{2i}^{жк} + M_{Ei}^* + M_{стри} \quad (8)$$

С учетом выражения (8) закон позиционно-силового управления, минимизирующий функционал (4), формируется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_i(t) = & -D_{1i}^\lambda \alpha_{ni} - [D_{2i}^\lambda - a_{23i} D_{2i}^{BX} (h_i^* + K_{Bi})] \dot{\alpha}_i + a_{23i} D_{2i}^{BX} (J_i + H_i^*) \ddot{\alpha}_i - \\ & - (D_{3i}^\lambda + a_{23i} D_{2i}^{BX}) K_{mi} I_i + D_{1i}^\lambda \alpha_{ni}^{жк} + [D_{2i}^\lambda + (a_{32i} - \dot{h}_i^*) D_{3i}^{BX} + (D_{3i}^\lambda + \\ & + a_{33i} D_{3i}^{BX}) (h_i^* + K_{Bi})] \dot{\alpha}_i^{жк} + [(D_{3i}^\lambda + a_{33i} D_{3i}^{BX}) (H_i^* + J_i) - D_{3i}^{BX} (2h_i^* + \\ & + K_{Bi})] \ddot{\alpha}_i^{жк} + [D_{3i}^\lambda + a_{23i} D_{2i}^{BX} + a_{33i} D_{3i}^{BX}] M_{Bi}^{*жк} - D_{3i}^{BX} \dot{M}_{Bi}^{*жк} - D_{3i}^{BX} \dot{M}_{Ei}^* + \\ & + [D_{3i}^\lambda + a_{23i} D_{2i}^{BX} + a_{33i} D_{3i}^{BX}] (M_{Ei}^* + M_{стри}), \end{aligned} \quad (9)$$

а структурная схема системы управления каждым электроприводом многозвенного манипулятора с уже введенным самонастраивающимся корректирующим устройством, которая реализует закон управления (9) и позволяет одновременно точно управлять и положениями выходных валов каждого из этих электроприводов, и создаваемыми ими внешними моментами с учетом всех взаимовлияний во всех степенях подвижности указанного манипулятора, показана на рис. 5.

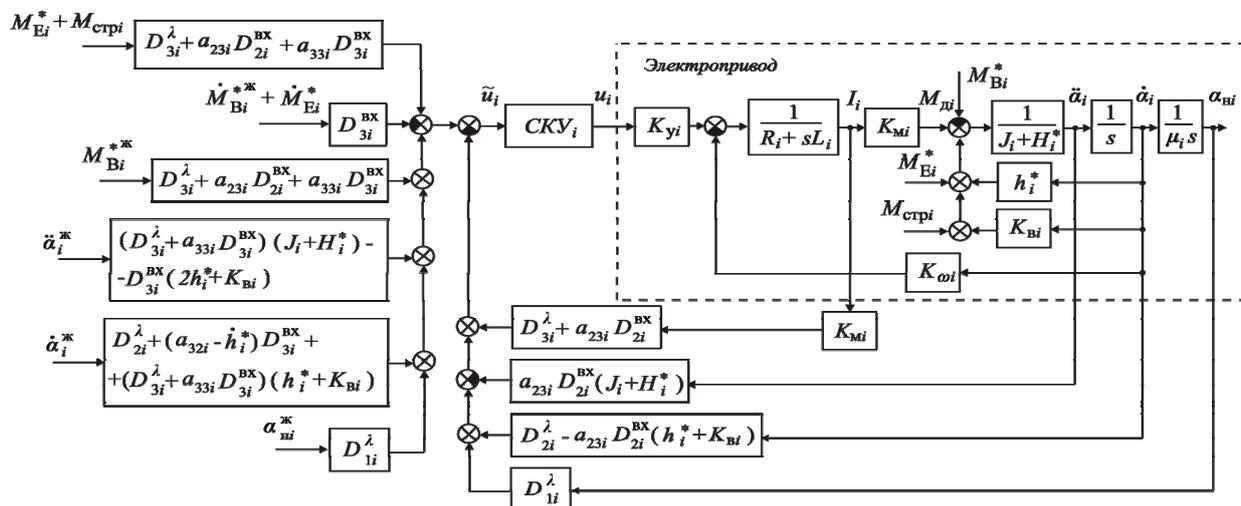


Рис. 5. Структурная схема синтезированной позиционно-силовой системы управления каждым приводом многозвенного манипулятора с самонастраивающейся коррекцией

Из выражения (9) и рис. 5 видно, что для успешной реализации синтезированной позиционно-силовой системы управления многозвенным манипулятором для каждой его степени подвижности необходимо

формировать желаемые (программные) значения внешних моментов M_{Bi}^* , которые в совокупности при текущей конфигурации многозвенника, обеспечат требуемое силовое $F = [f_x, f_y, f_z]^T$ и моментное $N = [n_x, n_y, n_z]^T$ воздействия рабочего инструмента на объекты работ.

Для определения M_{Bi}^* ($i = \overline{1, n}$) в данной главе диссертации предлагается использовать рекуррентный алгоритм, позволяющий в реальном масштабе времени рассчитывать указанные моментные воздействия для многозвенных манипуляторов с произвольными кинематическими схемами:

$$\begin{aligned} \hat{f}_i &= A_{i+1}^i \hat{f}_{i+1}, \quad \hat{f}_{i+1} = F, \quad (i = \overline{n, 1}), \\ \hat{n}_i &= A_{i+1}^i \hat{n}_{i+1} + p_i \times (A_{i+1}^i \hat{f}_{i+1}), \quad \hat{n}_{i+1} = N, \\ M_{Bi}^* &= e_i^T (\hat{f}_i \delta_i + \hat{n}_i \bar{\delta}_i), \end{aligned} \quad (10)$$

где $A_{i+1}^i \in R^{3 \times 3}$ – матрица осуществляющая преобразование векторов из $i+1$ в i -ю систем координат; $p_i \in R^3$ – вектор, определяющий положение шарнира $i+1$ относительно шарнира i ; $\hat{f}_i, \hat{n}_i \in R^3$ – соответственно сила реакции и момент силы реакции, действующие в шарнире i ; $e_i = (0 \ 0 \ 1)^T$ – вектор, направленный вдоль оси шарнира i ; $\delta_i = 1$, если шарнир i поступательный и $\delta_i = 0$, если он вращательный ($\bar{\delta}_i = 1 - \delta_i$).

Для качественного выполнения рабочим инструментом всех силовых операций при задании желаемого силового воздействия на объекты работ необходимо обязательно учитывать силу трения между этим инструментом и обрабатываемой поверхностью. Обычно принимается, что рабочий инструмент располагается перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. Однако, при контактном движении по этой поверхности при наличии в зоне контакта реально существующей силы сухого трения задаваемый вектор результирующего силового воздействия F на объект должен отклоняться от нормали к поверхности на некоторый угол. С учетом этого трения компоненты вектора результирующего силового воздействия на объект были сформированы в следующем виде

$$f_x = \zeta F^* \sin(\gamma), \quad f_y = \zeta F^* \cos(\gamma), \quad f_z = F^*, \quad (11)$$

где $\gamma = \arctg(dx_{тр} / dy_{тр})$, $x_{тр}$, $y_{тр}$ – координаты траектории движения рабочего инструмента по поверхности обрабатываемого объекта; F^* – величина усилия, которое необходимо развивать на поверхность; ζ – динамический коэффициент трения скольжения, зависящий от материалов соприкасающихся тел.

Проверка работоспособности и эффективности позиционно-силовой системы управления, синтезированной с помощью предложенного метода, проводилась на примере шестистепенного манипулятора типа «PUMA». На рис. 6 в качестве примера показана исследуемая траектория пространственного движения рабочего инструмента, закрепленного в схвате указанного манипулятора. Суммарное время движения этого инструмента по указанной траектории в прямом и обратном направлениях составляет 6 с. На рис. 7 показан закон изменения динамической ошибки e_1 при движении рабочего инструмента по указанной пространственной траектории, а также закон изменения динамической ошибки e_3 передачи силового воздействия $F^*=100$ Н (перпендикулярно обрабатываемой поверхности) рабочего инструмента на объект работ в процессе этого движения с учетом того, что каждый электропривод манипулятора содержит самонастраивающуюся коррекцию вида (7) и позиционно-силовую систему управления, реализующую закон управления (9). На этом же рисунке показана динамическая ошибка (см. кривую e_2) пространственного движения рабочего инструмента только в следящем по положению режиме (при отсутствии силового воздействия на объект).

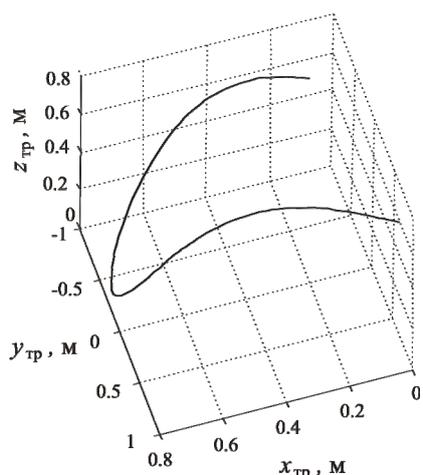


Рис. 6. Траектория движения схвата манипулятора с рабочим инструментом

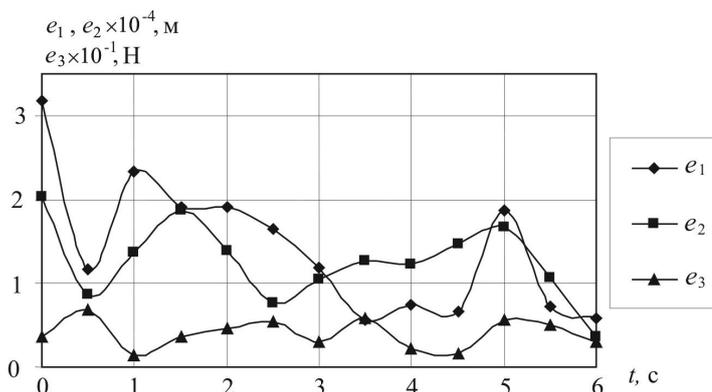


Рис. 7. Динамические ошибки движения рабочего инструмента по траектории и ошибка по его силовому воздействию на объект работ

Из рис. 7 видно, что максимальные значения динамических ошибок по положению e_1 и создаваемому усилию e_3 на объект в рассматриваемых самонастраивающихся системах при синтезированном позиционно-силовом управлении не превышают 3.2×10^{-4} м и 7×10^{-2} Н, соответственно. А максимальное значение ошибки e_2 пространственного движения рабочего инструмента только в следящем по положению режиме не превышает 2.1×10^{-4} м.

Таким образом, результаты проведенного численного моделирования полностью подтвердили высокую эффективность (высокую динамическую точность) разработанных на основе предлагаемого в диссертации подхода самонастраивающихся позиционно-силовых систем управления многозвенными манипуляторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан новый подход к синтезу позиционно-силовых систем управления многозвенными манипуляторами с различными кинематическими схемами, основанный на управлении электроприводом каждой степени подвижности этого манипулятора одновременно и по положению, и по развиваемому моменту.

2. Синтезированы и исследованы корректирующие устройства, позволяющие одновременно точно управлять и положением выходного вала электропривода манипулятора и внешним моментом, развиваемым на нем.

3. Синтезированы самонастраивающиеся корректирующие устройства, позволяющие точно компенсировать нелинейности и взаимовлияния между всеми степенями подвижности многозвенного манипулятора, но пропускающие без изменения внешние моменты, необходимые для создания силового воздействия со стороны рабочего инструмента на объекты работ.

4. Разработан алгоритм, позволяющий для каждой степени подвижности многозвенных манипуляторов с произвольной кинематической схемой рассчитывать в реальном масштабе времени желаемые значения внешних моментов, которые в совокупности обеспечивают силовое воздействие рабочего инструмента на объекты работ с учетом силы трения между этим инструментом и поверхностью объекта.

5. Численные и экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность использования разработанных на основе предлагаемого метода позиционно-силовых систем управления.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зуев, А.В. Особенности создания комбинированных позиционно-силовых систем управления манипуляторами / А.В. Зуев, В.Ф. Филаретов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2009. – №1. – С. 154–162.

2. Филаретов, В.Ф. Позиционно-силовое управление электроприводом манипулятора / В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – №9. – С. 20–24.

3. Пат. 2355563 Российская Федерация, МПК В25J 13/00. Устройство для управления приводом робота / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. тех. ун-т. - 2007124122/02; заявл. 26.06.2007; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14. - 20 с. : ил.

4. Filaretov, V.F. The combined force/position control systems for

manipulators / V.F. Filaretov, A.V. Zuev // CD-ROM Proc. of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems, Design and Analysis. Haifa, Israel. – 2008. – P. 1–7.

5. Filaretov, V.F. Adaptive force/position control of robot manipulators / V.F. Filaretov, A.V. Zuev // Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Xi'an, China. – 2008. – P. 96–101.

6. Filaretov, V.F. Force-position control of the electric drive of the manipulator / V.F. Filaretov, A.V. Zuev // Proc. of IEEE East-West Design & Test Workshop. Sochi, Russia. – 2006. – P. 184–188.

7. Zuev, A.V. Synthesis of hybrid force-position control systems for multilink manipulators / A.V. Zuev, V.F. Filaretov // Proc. of the 18th DAAAM Int. Symp. «Intelligent Manufacturing & Automation». Zadar, Croatia. – 2007. – P. 835–836.

8. Филаретов, В.Ф. Позиционно-силовое управления многозвенными манипуляторами / В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев // Сб. докладов Международной научно-технической мультikonференции «Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники». Дивноморское, Россия. – 2007. – С. 459–463.

9. Филаретов, В.Ф. Метод синтеза позиционно-силового управления электроприводом манипулятора / В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев // Материалы 3-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление». Санкт-Петербург. – 2006. – С. 99–102.

10. Зуев, А.В. Разработка и экспериментальное исследование метода позиционно-силового управления промышленными манипуляторами / А.В. Зуев // Сб. докладов Второй Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва / МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2009. – С. 1–8.

11. Зуев, А.В. Взаимосвязанное позиционно-силовое управление группой многозвенных манипуляторов / А.В. Зуев // Материалы молодежной школы-семинара «Адаптивные и интеллектуальные роботы». Дивноморское, Россия. – 2009. – С. 113.

12. Филаретов, В.Ф. Метод позиционно-силового управления манипуляторами / В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев // Тез. докл. X Международного семинара имени Е.С. Пятницкого «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления». Москва / ИПУ РАН. – 2008. – С. 330–332.

13. Филаретов, В.Ф. Метод создания позиционно-силовых систем управления манипуляторами / В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев // Тез. докл. XXXIII Дальневосточной математической школы-семинара имени акад. Е.В. Золотова. Владивосток. – 2008. – С. 178–179.

14. Филаретов, В.Ф. Алгоритм синтеза высокоточного позиционно-силового управления многозвенными манипуляционными механизмами / В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев // Материалы докладов научной конф. «Вологдинские чтения. Радиоэлектроника, информатика, электротехника».

Владивосток / ДВГТУ. – 2007. – С. 8–10.

15. Филаретов, В.Ф. Комбинированное позиционно-силовое управление манипуляторами, выполняющими сборочные операции / В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев // Материалы докладов научной конф. «Вологодские чтения. Радиоэлектроника, информатика, электротехника». Владивосток / ДВГТУ. – 2008. – С. 3.

16. Zuev, A.V. Synthesis algorithm of high quality force-position control systems of the multilink manipulation mechanisms / A.V. Zuev // Материалы докл. седьмого международного форума студентов, аспирантов и молодых ученых стран АТР. Владивосток / ДВГТУ. – 2007. – С. 79–81.

17. Зуев, А.В. Моделирование работы манипуляционных роботов с позиционно-силовыми системами управления / А.В. Зуев // Сб. трудов шестой Дальневосточной конференции студентов и аспирантов по математическому моделированию. Владивосток / ДВГУ. – 2007. – С. 6–7.

Личный вклад автора. Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично. Работы [10, 11, 16, 17] выполнены автором самостоятельно. В работах [1-9, 12-15] руководителем поставлены задачи, а соискателем получены основные научные результаты.

Зуев Александр Валерьевич

Разработка метода позиционно-силового управления
многозвенными манипуляторами

Автореферат

Подписано к печати 14.05.2010	Усл. п. л. 1.0.	Уч.-изд. л. 0.84
Формат 60×84/16.	Тираж 100.	Заказ 19.

Издано ИАПУ ДВО РАН. г. Владивосток, Радио, 5.
Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН.
г. Владивосток, Радио, 5.