

На правах рукописи

Варков

ВАРКОВ Артем Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
МАНИПУЛЯЦИОННЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ НА
БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА ДВИЖЕНИЯ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электроника и микропроцессорные системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Тютиков Владимир Валентинович**

Официальные оппоненты:

ЗЮЗЕВ Анатолий Михайлович – доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

ЗЕЛЕНСКИЙ Александр Александрович – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», доцент кафедры «Высокоэффективные технологии обработки»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО)

Защита состоится «28» апреля 2016 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Учёный совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен <http://ispu.ru/files/Dissertacia-VarkovAA-2.pdf>

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.02



Сидоров Сергей Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время в различных областях промышленности применяются промышленные манипуляционные роботы (МР), используемые для выполнения широкого спектра технологических задач.

Они представляют собой сложный электромеханический объект, обладающий рядом особенностей. Во-первых, МР отличаются сложной кинематической структурой, содержащей множество взаимосвязанных звеньев. Во-вторых, изменение положения последних в пространстве оказывает влияние на физические силы, действующие на манипулятор. В-третьих, существует необходимость синхронного управления большим числом двигателей.

В связи с наличием указанных особенностей, для внедрения МР в производственный процесс требуются специально разрабатываемые системы управления (СУ). Они служат для организации взаимодействия между человеком-оператором и МР и обеспечивают выполнение процессов, необходимых для автоматизации технологической операции.

В настоящее время большинство используемых в отечественной промышленности СУ МР являются зарубежными разработками. Так как они являются закрытыми решениями, при их использовании возникает зависимость от иностранных фирм относительно поставки и технической поддержки СУ и их компонентов. Кроме того, их использование определяется функциональными решениями, заложенными производителем, что ограничивает возможности по их адаптации для использования при решении специфических задач. В связи с этим возникает проблема импортозамещения.

Существующие отечественные разработки, как правило, относятся к 70-80-м годам прошлого века, что делает их в настоящее время морально и технически устаревшими. Таким образом, задача разработки современной СУ МР, не уступающей зарубежным аналогам, является актуальной.

Помимо непосредственно разработки СУ есть необходимость интеграции МР с другими технологическими объектами, например, такими как металлообрабатывающие станки, что требует внесения изменений в архитектуру СУ. Задача интеграции СУ МР также является актуальной.

Целью работы является разработка и исследование системы управления манипуляционным промышленным роботом, обеспечивающей высокое качество управления в условиях изменения динамических параметров с возможностью интеграции в состав гибкой производственной системы за счет использования контроллера движения.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

- 1) анализ общих подходов и определение требований к управлению МР;
- 2) исследование особенностей кинематики и динамики манипулятора и формирование его математической модели;
- 3) разработка и исследование системы управления манипуляционным роботом с регуляторами различного типа;
- 4) разработка аппаратно-программных средств СУ МР;
- 5) экспериментальное исследование разработанной СУ МР.

Связь с целевыми программами. Работа выполнялась в рамках:

1) Госконтракта №13.G25.31.0057 с Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с ОАО ИЗТС;

2) Федеральной целевой программы №02.740.11.0521 «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»;

3) базовой части государственного задания;

4) гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972)

Методы исследований. При решении поставленных задач в работе использованы матричное и операционное исчисление, аппарат передаточных функций и структурных схем, методы пространственных преобразований и объектно-ориентированного программирования. Исследование синтезируемых систем выполнялось методами имитационного моделирования и натурных экспериментов на лабораторном и производственном оборудовании.

Научная новизна работы определяется разработкой и реализацией новых подходов к решению проблемы управления промышленным манипуляционным роботом и заключается в следующем:

1) предложены структура и принципы построения СУ МР, основанной на двухпроцессорной архитектуре с применением контроллера движения и промышленного компьютера, позволяющая эффективно распределять и решать задачи расчёта траектории, логического контроля и управления электроприводами (п. 3 паспорта специальности);

2) разработана обобщённая математическая модель МР, включающая модель для расчёта прямой и обратной задач кинематики, динамическую модель, позволяющую вести расчёт моментов, действующих на звенья, и электромеханическую модель (п. 1);

3) разработана методика оптимизации расчётов динамической модели, использующей метод Лагранжа-Эйлера, основанная на минимизации времени вычислений при сохранении желаемого качества управления (п. 3);

4) предложены варианты построения регуляторов положения и получены интегральные оценки качества СУ МР, которые определяют границы их рационального использования для различных режимов работы (п. 3).

Практическую ценность имеют следующие результаты работы:

1) аппаратная реализация, алгоритмы и программное обеспечение СУ МР с использованием контроллера движения и промышленного компьютера;

2) структура программных средств СУ МР, реализуемых в составе двухпроцессорной архитектуры, и способы распределения вычислительных ресурсов между задачами системного и прикладного уровней;

3) методика настройки СУ МР с использованием двухкритериального подхода на основе применения различных форм тестовых сигналов и формирования заданных показателей точности и быстродействия при контурно-позиционных перемещениях;

4) формат и реализация языка программирования, основанного на структурированном представлении данных и позволяющем эффективно описывать сложные управляющие алгоритмы.

Практическое использование результатов работы. Разработанная СУ реализована в виде опытного образца, используемого для управления шестизвенным манипулятором PUMA-560.

Использование в учебном процессе. Опытный образец выполнен на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры «Электроники и микропроцессорных систем» Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина. Он может быть использован для исследования процессов управления промышленным манипуляционным роботом на примере шестиосевого МР с последовательной кинематической схемой.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» XIV-XVI Бенардосовские чтения (Иваново 2007, 2009, 2011 гг.), на II российской мультikonференции по проблемам управления (Санкт-Петербург, 2008 г.), 8th International Symposium «Topical problems in the Field of Electrical and Power Engineering» (Пярну, 2010 г.), Riga Technical University 53rd International Scientific Conference (Рига, 2012 г.).

Разработанный опытный образец был представлен на выставке «Металлообработка» в г. Москва.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 7 статей в журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендуемых ВАК министерства образования и науки РФ и 1 статья в журнале, входящем в систему цитирования SCOPUS.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из пяти глав, списка использованных источников, включающего 102 наименования, и 3 приложения. Работа изложена на 146 листах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены основные проблемы, существующие в настоящее время в области управления манипуляционными роботами, и определена актуальность решаемых задач.

В первой главе выполнен анализ основных особенностей управления манипуляционным роботом как сложным электромеханическим объектом, а также сформулированы принципы построения архитектуры СУ МР.

Анализ подходов к построению кинематической схемы манипулятора позволил определить варианты структуры рабочей координатной системы, необходимой для организации управления МР. В результате был сделан вывод о том, что большинство манипуляторов, задействованных в технологических процессах, обладают последовательной кинематической схемой, но для расширения возможностей применения разрабатываемой СУ необходимо заложить в ней поддержку произвольной конфигурации рабочего пространства.

На основании анализа основных областей применения промышленных манипуляторов были определены базовые требования к качеству выполнения технологических операций. В результате было установлено, что для реализации различных технологических операций система управления должна обладать

возможностью контурно-позиционного управления многозвенным манипулятором с точностью позиционирования не хуже 0,05-0,1 мм.

Анализ кинематической структуры манипулятора показал, что основное влияние на качество управления оказывают динамические связи, возникающие между отдельными звеньями в процессе перемещения. Из результатов исследования был сделан вывод, что существующими в звеньях упругостями и трением можно пренебречь, за исключением манипуляторов высокой грузоподъёмности. Поэтому, можно считать связи между элементами жёсткими, а кинематическую структуру линейной. Таким образом, динамические компоненты манипулятора будут представлены силами взаимовлияния между отдельными звеньями, а также гравитационными и кориолисовыми силами.

Обзор существующих СУ МР показал, что они имеют сходную структуру, включающую средства управления манипулятором и взаимодействия с внешним оборудованием. Основными их задачами является управление перемещением манипулятора согласно заданной управляющей программе, а также организация интерфейса с пользователем. Кроме того, современные СУ МР могут оснащаться различными средствами очувствления, такими как система технического зрения, предназначенными для введения элементов адаптивного и интеллектуального управления манипулятором.

На основании проведённого анализа было принято решение о разделении разрабатываемой СУ на два основных функциональных блока:

- 1) блок управления, предназначенный для решения задач взаимодействия с манипулятором;
- 2) терминальное устройство, отвечающее за интерфейс с пользователем.

Также были определены основные функциональные требования, предъявляемые к современной СУ МР и пути интеграции отдельных МР в более сложные технологические процессы, реализуемые, например, в виде гибких производственных систем.

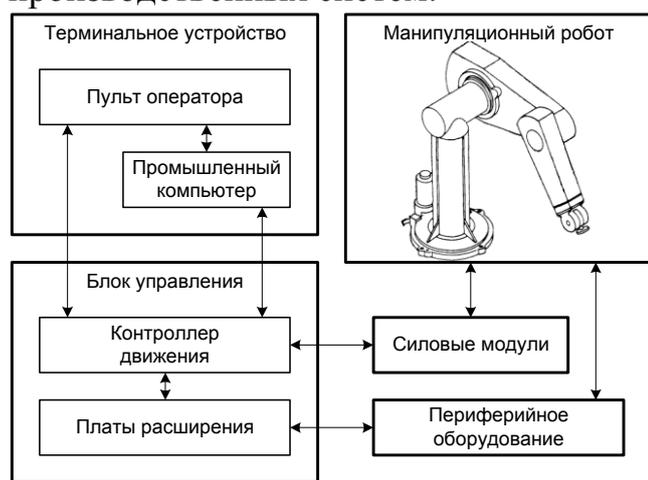


Рис. 1. Аппаратная архитектура СУ МР

В результате была разработана архитектура современной СУ МР (рис. 1). Она включает два взаимосвязанных устройства, отвечающие за реализацию функциональных компонентов МР: контроллер движения, на базе которого строится блок управления, и промышленный компьютер, выступающий основой для терминального устройства. Такое решение позволит повысить надёжность системы в целом и добиться эффективного использования имеющихся вычислительных ресурсов.

Указанные компоненты могут быть связаны между собой или с другим оборудованием в составе гибких производственных систем посредством высокопроизводительных линий обмена информацией, которые могут быть выполнены в виде локальной сети с

использованием существующего промышленного интерфейса (EtherCAT, ModBus, PROFINET, Ethernet/IP).

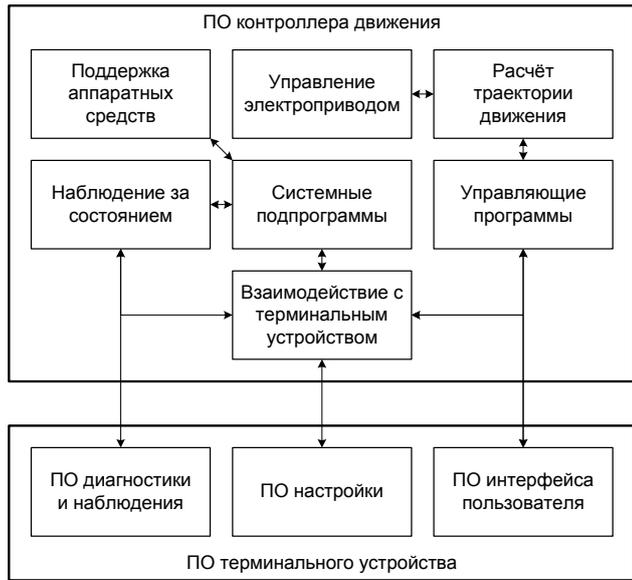


Рис. 2. Структура программного обеспечения

Для поддержки аппаратной архитектуры были разработаны подходы к организации программных средств, также разделенные на функциональные компоненты (рис. 2). В связи с тем, что выполнение высокопроизводительных технологических операций требует значительных вычислительных затрат, было принято решение выделить задачи, требующие выполнения в режиме реального времени, которые должны быть реализованы на контроллере движения. К ним относятся подпрограммы управления приводами электродвигателей манипулятора, планирования траектории перемещения рабочего органа, а также модули служащие для организации обмена

информацией между манипулятором и периферийными устройствами.

Задачи, которые не требуют непосредственного взаимодействия с манипулятором или служат для организации интерфейса с пользователем, такие как средства диагностики или удалённого управления СУ МР, выполняются на терминальном устройстве.

Вторая глава посвящена разработке математической модели МР, которая служит основой для синтеза СУ. В качестве основы для проведения исследований был выбран шестизвенный манипулятор PUMA-560, производства фирмы Nokia.

Следует учесть, что математическая модель манипулятора состоит из трех взаимосвязанных компонентов: кинематической, динамической и электромеханической моделей. В связи с этим подходы к их построению были рассмотрены отдельно.

Для разработки кинематической модели был применён метод пространственных преобразований, основанный на представлении Денавита-Хартенберга (ДХ-представление). В результате были сформированы матрицы преобразований:

$${}^0\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & -a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^3\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^4\mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^5\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где:

θ_i, d_i, a_i – параметры ДХ-представления:

θ_i – присоединённый угол, на который нужно повернуть ось x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , чтобы она стала сонаправлена с осью x_i ;

d_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом $(i-1)$ -й системы координат;

a_i – линейное смещение (кратчайшее расстояние между осями z_{i-1} и z_i).

В результате решения прямой и обратной задач кинематики были получены следующие уравнения:

$$\theta_1 = \arctg \frac{-\text{РУКА}p_y \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2} - p_x d_2}{-\text{РУКА}p_x \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2} - p_y d_2}, \theta_2 = \arctg \frac{\sin \alpha \cos \beta + \text{РУКА} \cdot \text{ЛОКОТЬ} \cos \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \cos \beta + \text{РУКА} \cdot \text{ЛОКОТЬ} \sin \alpha \sin \beta},$$

$$\theta_3 = \arctg \frac{\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta}{\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta},$$

$$\vec{z}_4 = \pm \frac{\vec{z}_3 \times \vec{a}}{\|\vec{z}_3 \times \vec{a}\|}, \Omega = \begin{cases} 0, z_4 = 0 \\ \vec{s} \cdot \vec{z}_4, \vec{s} \cdot \vec{z}_4 \neq 0, M = \text{ЗАПЯСТЬ} \text{Esign} \Omega, \\ \vec{n} \cdot \vec{z}_4, \vec{s} \cdot z_4 = 0 \end{cases}$$

$$\theta_4 = \arctg \frac{M(C_1 a_y - S_1 a_x)}{M(C_1 C_{23} a_x + S_1 C_{23} a_y - S_{23} a_z)},$$

$$\theta_5 = \arctg \frac{(C_1 C_{23} C_4 - S_1 S_4) a_x + (S_1 C_{23} C_4 + C_1 S_4) a_y - C_4 S_{23} a_z}{C_1 S_{23} a_x + S_1 S_{23} a_y + C_{23} a_z},$$

$$\theta_6 = \arctg \frac{(-S_1 C_4 - C_1 C_{23} S_4) n_x + (C_1 C_4 - S_1 C_{23} S_4) n_y - S_4 S_{23} n_z}{(-S_1 C_4 - C_1 C_{23} S_4) s_x + (C_1 C_4 - S_1 C_{23} S_4) s_y - S_4 S_{23} s_z},$$

где:

$\mathbf{p}, \mathbf{n}, \mathbf{a}$ – векторы положения, нормали и ориентации манипулятора;

α, β, ϕ – углы Эйлера, определяющие ориентацию рабочего органа манипулятора;

$C_i = \cos \theta_i, S_i = \sin \theta_i$.

В связи с тем, что при определённых значениях пространственных координат манипулятора уравнения могут иметь несколько решений, полученная в результате система уравнений также обладает множеством решений, что потребовало введения дополнительных переменных, позволяющих определить точную пространственную конфигурацию манипулятора (РУКА, ЛОКОТЬ, ЗАПЯСТЬЕ).

При построении динамической модели был использован метод Лагранжа-Эйлера, на основании которого уравнения динамики были записаны в виде:

$$\boldsymbol{\tau}(t) = \mathbf{D}(\mathbf{q}(t))\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{h}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + \mathbf{c}(\mathbf{q}(t)),$$

где:

$\mathbf{T}(t)$ – вектор $n \times 1$ обобщенных моментов в сочленениях манипулятора,
 $\mathbf{q}(t)$ – вектор $n \times 1$ координат манипулятора в рабочей системе координат,
 $\dot{\mathbf{q}}(t)$ – вектор $n \times 1$ обобщенных скоростей,
 $\ddot{\mathbf{q}}(t)$ – вектор $n \times 1$ обобщенных ускорений,
 \mathbf{D} – матрица $n \times n$ инерции манипулятора,
 \mathbf{h} – вектор $n \times 1$ кориолисовых и центробежных моментов,
 \mathbf{c} – вектор $n \times 1$ гравитационных моментов,
 n – количество сочленений в МР.

В связи с тем, что решение данного уравнения в реальном времени требует значительных вычислительных затрат, было решено провести оптимизацию динамической модели. Для этого была разработана методика, позволяющая сократить количество вычислительных операций, путём удаления взаимосвязей, оказывающих минимальное влияние на итоговую точность вычислений.

Методика заключается в оценке весовых коэффициентов отдельных слагаемых в уравнениях динамики и замене соответствующих элементов матриц \mathbf{D} , \mathbf{h} и \mathbf{c} на нулевые. В качестве критерия оптимизации было выбрано уменьшение количества вычислительных операций с сохранением заданной точности.

Пример использования методики для оптимизации расчёта гравитационных моментов выглядит следующим образом:

Вектор гравитационных моментов может быть получен из выражения:

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_{23} & S_2 & C_{23} & S_{23}C_5 + C_{23}C_4S_5 \\ 0 & S_{23} & 0 & C_{23} & S_{23}C_5 + C_{23}C_4S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -S_{23}S_4S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{23}S_5 + S_{23}C_4C_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ g_1C_2 + g_2C_{23} + g_3S_2 + g_4C_{23} + g_5(S_{23}C_5 + C_{23}C_4S_5) \\ g_2S_{23} + g_4C_{23} + g_5(S_{23}C_5 + C_{23}C_4S_5) \\ -g_5S_{23}S_4S_5 \\ g_5(C_{23}S_5 + S_{23}C_4C_5) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Далее для каждого ненулевого элемента матрицы \mathbf{c} следует определить наибольшее по модулю значение $c_{max,i}$ и долю каждого слагаемого в конечном результате $c_{w,i,j}$, принимая $C_i = 1$ и $S_i = 1$:

$$c_{w,i,j} = \frac{c_{i,j}}{c_{max,i}}$$

$$\mathbf{c}_{max} = \begin{bmatrix} 0 \\ g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 \\ g_2 + g_4 + g_5 \\ g_5 \\ g_5 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 46,9372 \\ 8,7172 \\ 0,0282 \\ 0,0282 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{c}_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7925 & 0,1798 & 0,0217 & 0,0053 & 0,0006 \\ 0 & 0,9682 & 0 & 0,0286 & 0,0032 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Исходя из значений элементов последней матрицы, по весовым коэффициентам \mathbf{c}_w определим слагаемые, оказывающие наименьшее влияние на итоговый результат. Для этого определим элементы, сумма весовых коэффициентов которых меньше заданной погрешности, и удалим их, приняв соответствующие элементы матрицы равными нулю. В результате получим приближенные выражения для расчёта с заданной погрешностью.

Так, при заданной погрешности конечного результата 1% и 5% получаем следующие выражения для матрицы \mathbf{c} соответственно:

$$\mathbf{c}^T \approx [0 \quad g_1 C_2 + g_2 C_{23} + g_3 S_2 \quad g_2 S_{23} + g_4 C_{23} \quad -g_5 S_{23} S_4 S_5 \quad g_5 (C_{23} S_5 + S_{23} C_4 C_5) \quad 0]$$

$$\mathbf{c}^T \approx [0 \quad g_1 C_2 + g_3 S_2 \quad g_2 S_{23} \quad -g_5 S_{23} S_4 S_5 \quad g_5 (C_{23} S_5 + S_{23} C_4 C_5) \quad 0]$$

Таким образом, предложенный метод позволяет рассчитать динамическую модель с заданной погрешностью по алгоритму (рис. 3).

На основании полученных кинематической (рис. 4) и динамической (рис. 5) моделей была сформирована полная имитационная модель.

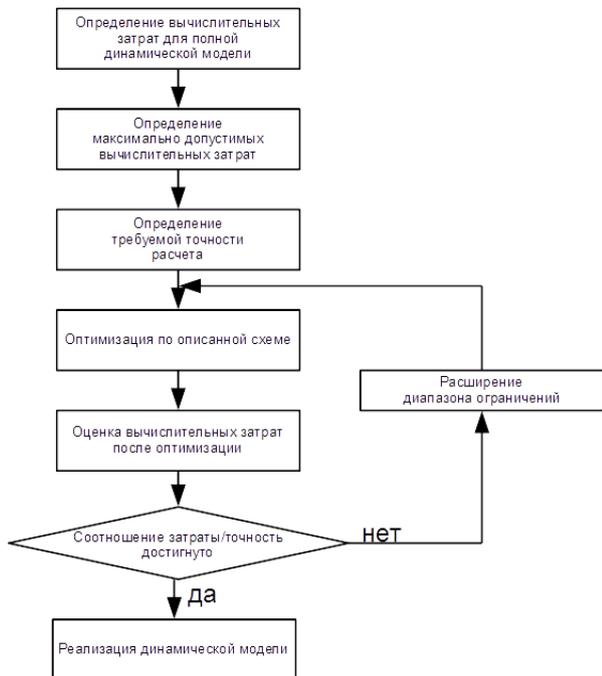


Рис. 3



Рис.5



Рис. 4

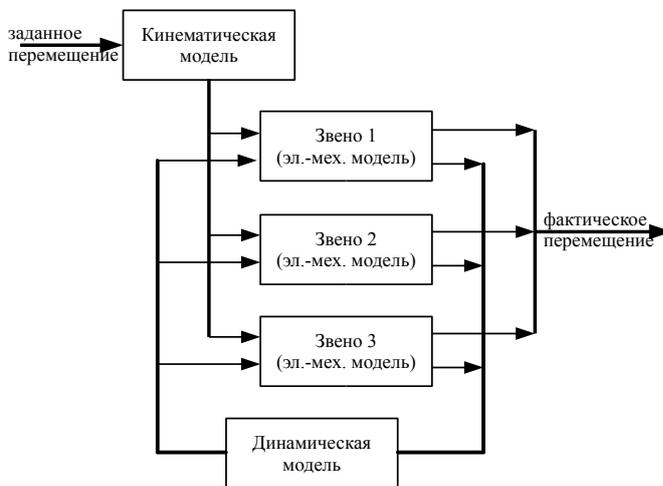


Рис. 6

Полная модель (рис. 6) манипулятора содержит блоки для решения прямой и обратной задач кинематики, а также расчёта электромеханических компонентов отдельных звеньев. В связи с тем, что в процессе исследований было установлено, что звенья, служащие для управления ориентацией рабочего органа, оказывают малое влияние на МР, было решено включить только три звена, отвечающие за его перемещение.

Полная модель манипулятора содержит блоки для решения прямой и обратной задач кинематики, а также расчёта электромеханических компонентов отдельных звеньев.

Для подтверждения адекватности полной и оптимизированной модели они были промоделированы с целью определения расхождения в итоговых значениях. Результаты приведены на примере звена 2, которое испытывает наибольшие нагрузки при перемещении (рис. 7).

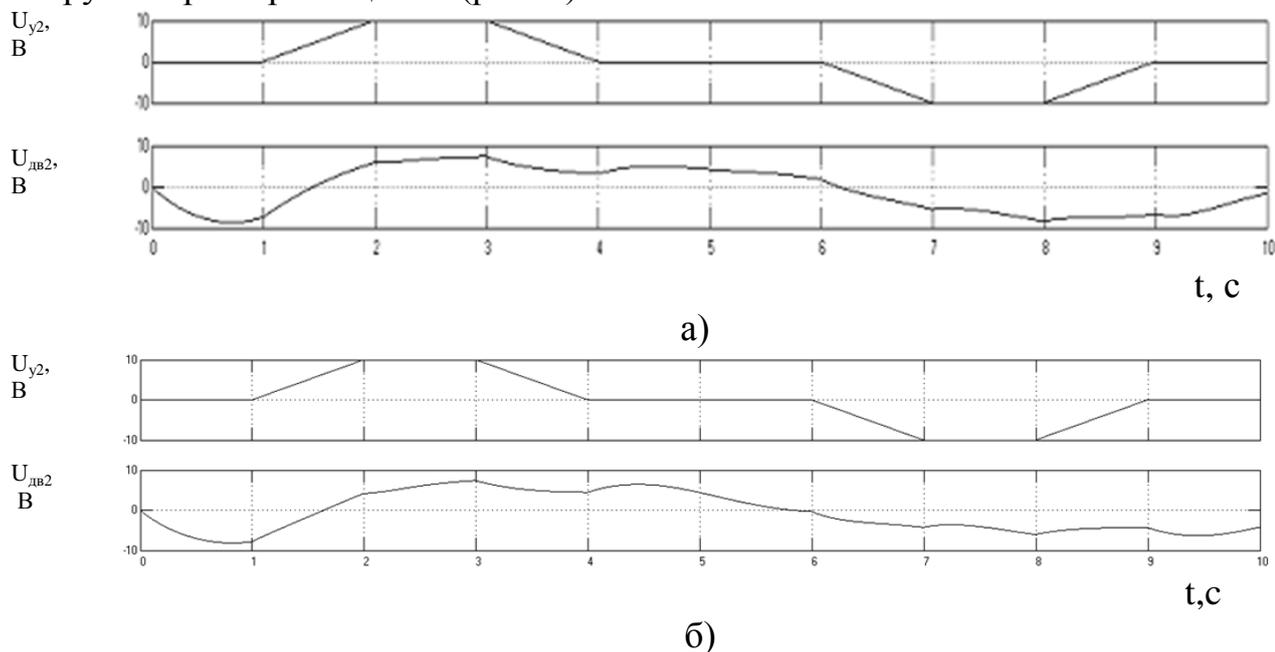


Рис. 7. Результаты моделирования полной математической модели (звено 2):

- а) упрощенная модель, б) полная модель,
 U_{y2} – управляющее воздействие на входе модели,
 $U_{дв2}$ – напряжение на двигателе 2 звена,

Таким образом, было установлено, что упрощённая модель может быть использована при разработке и отладке СУ МР для создания алгоритмов управления МР, синтеза регуляторов для отдельных звеньев.

Третья глава посвящена разработке и исследованию системы управления. Основными целями являлось определение требований к ней, синтез и оценка соответствия технологическим требованиям.

Были определены следующие требования к СУ:

1. СУ должна обеспечивать возможность контурного, позиционного и силомоментного управления манипулятором;
2. В качестве задания на вход СУ должна передаваться информация о положении, скорости рабочего органа и формируемом моменте;
3. Критерием качества управления должна служить ошибка позиционирования (для контурно-позиционного управления) и/или момента (для силомоментного);
4. СУ должна предусматривать возможность выполнения кинематических преобразований асинхронно с расчётом управляющего воздействия на основании предварительно спланированной траектории;

5. СУ должна учитывать динамические характеристики манипулятора, выраженные в виде суммарного момента сил, действующих на вал двигателя.

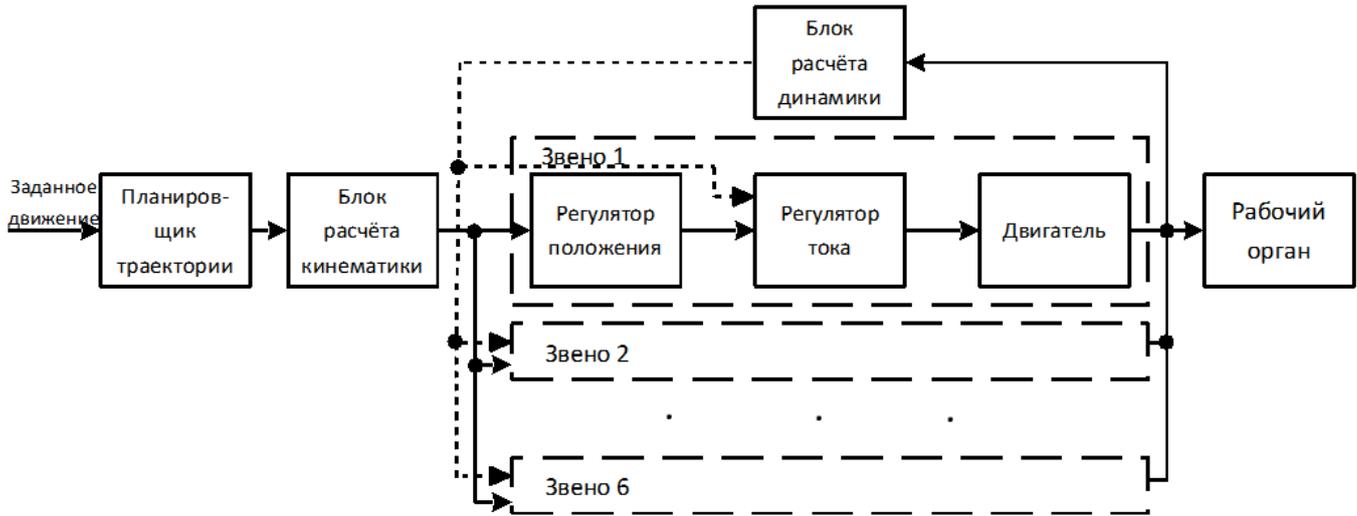


Рис. 8

На их основании была разработана структурная схема СУ МР (рис. 8).

Для оценки качества контурно-позиционного управления были предложены критерии, соответствующие технологическим требованиям, предъявляемым СУ МР:

1. Независимая ошибка положения оси Δq_i ;
2. Среднеквадратичная ошибка положения рабочего органа Δq_{cp} ;
3. Относительная ошибка позиционирования рабочего органа Δq_o .

Были рассмотрены варианты регуляторов, предназначенных для контурно-позиционного управления манипуляционным промышленным роботом. На основании проведенного анализа были предложены два варианта для применения в системах управления с различным объёмом доступных вычислительных ресурсов.

Предложенный вариант ПИД-регулятора (рис. 9), позволяет формировать задание как по положению, так и по скорости, что позволяет добиться повышения качества контурно-позиционного управления. Кроме того, дополнительная компенсационная связь позволяет учесть величину динамического момента, возникающего при перемещениях рабочего органа манипулятора в пространстве.

Полиномиальный регулятор (рис. 10) с астатизмом и компенсацией момента позволяет минимизировать ошибку позиционирования как при позиционном, так и при контурном управлении, что делает его оптимальным для применения в СУ. Основным его недостатком является требовательность к вычислительным ресурсам, что в совокупности с затратами на реализацию динамической модели, ограничивает возможности его применения.

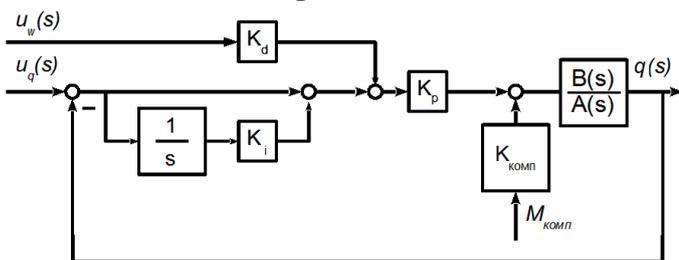


Рис. 9. Модифицированный ПИД-регулятор положения

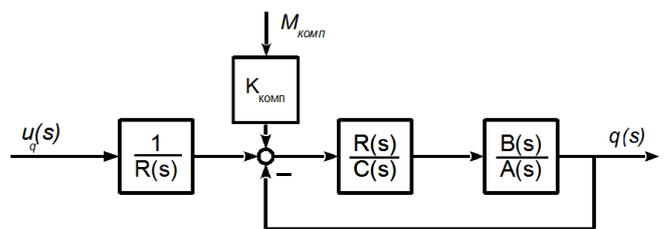


Рис. 10. Структура СУ с полиномиальным регулятором

Для подтверждения соответствия предложенной модели технологическим требованиям было проведено моделирование СУ с ПИД-регулятором (рис. 11) и полиномиальным регулятором (рис. 12)

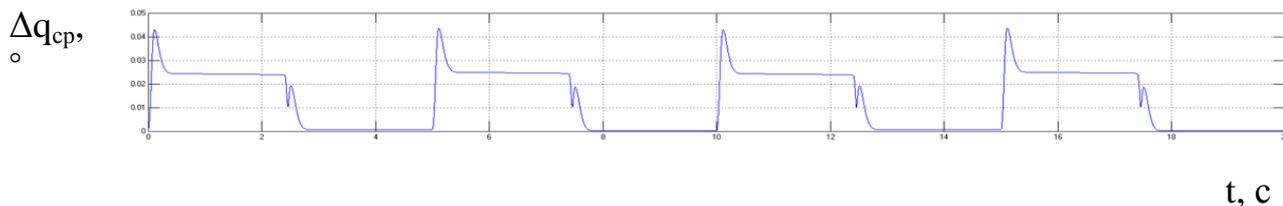


Рис. 11

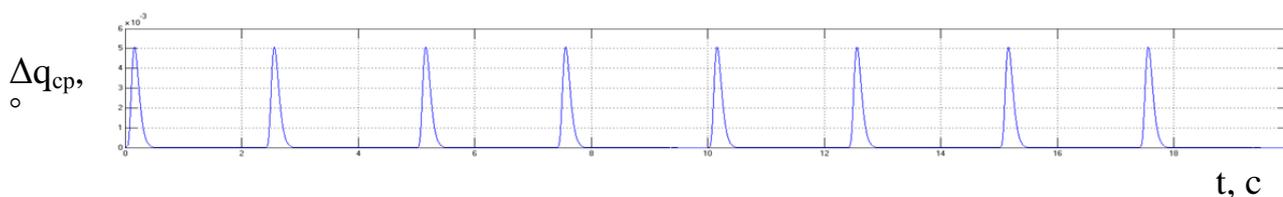


Рис. 12

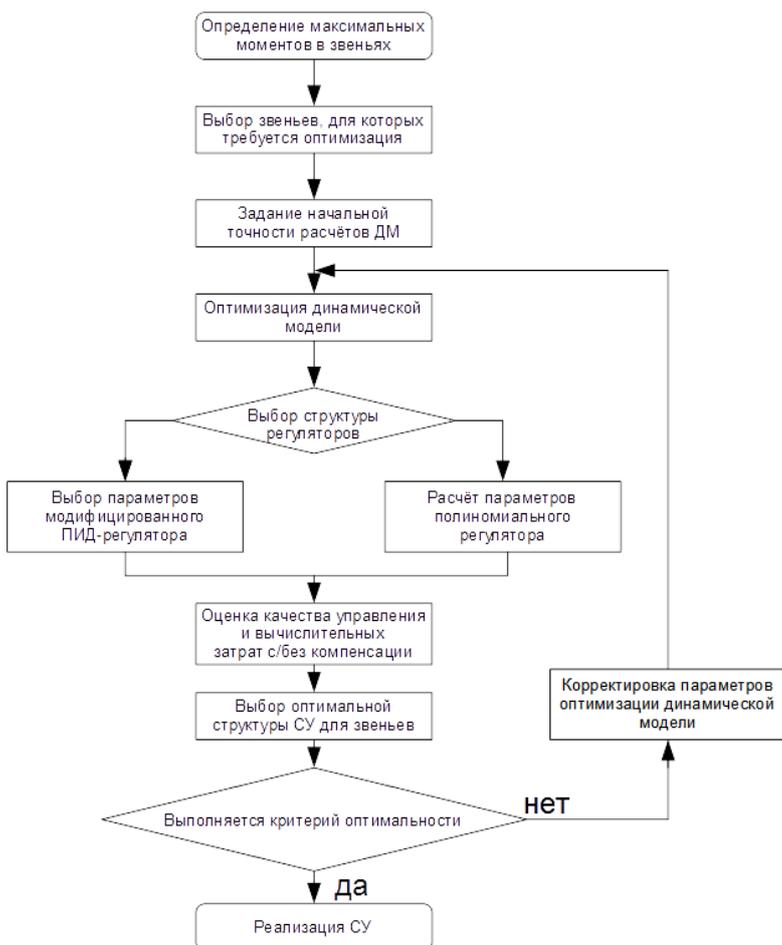


Рис. 13

Исследования выявили, что лучшие результаты показывает СУ с использованием ПР. При этом допустимо использование динамической модели с достаточно низкой точностью вычислений (погрешность 20%). Такая система позволяет добиться нулевой статической ошибки и малого времени переходного процесса, однако имеет более сложную реализацию.

Для ПИД-регулятора введение компенсирующих связей следует признать обязательным условием для обеспечения высокого качества управления. При использовании предложенного ПИД-регулятора заданное качество управления удастся получить только с динамической моделью, использующей высокую точность вычислений (погрешность порядка 1%). Такое решение позволяет

снизить затраты на реализацию самого регулятора, сохраняя при этом высокое качество управления за счет точного расчета компенсирующих связей.

Алгоритм выбора структуры СУ МР для конкретной реализации приведён на рис. 13.

Четвёртая глава посвящена разработке и реализации средств системного и прикладного программного обеспечения (ПО).

Основными этапами разработки ПО СУ МР являлись:

- 1) разработка ПО блока управления;
- 2) разработка ПО терминального устройства;
- 3) разработка языка программирования управляющих программ.

В соответствии с данными этапами был проведен анализ и сформулированы требования к отдельным компонентам ПО, определённым в первой главе.

При разработке ПО блока управления был решён ряд задач, необходимых для эффективной организации СУ.

Первой задачей являлось определение формата хранения данных о конфигурации и состоянии СУ МР, а также информации, необходимой для выполнения управляющих программ пользователя. Для этого была предложена структура распределения памяти блока управления. Выделены следующие категории переменных:

1. Конфигурационные параметры СУ, включающие:
 - а) электромеханические характеристики манипулятора,
 - б) настройки регуляторов;
2. Переменные состояния манипулятора и СУ;
3. Пользовательские переменные;
4. Управляющие программы и библиотеки пользователя.

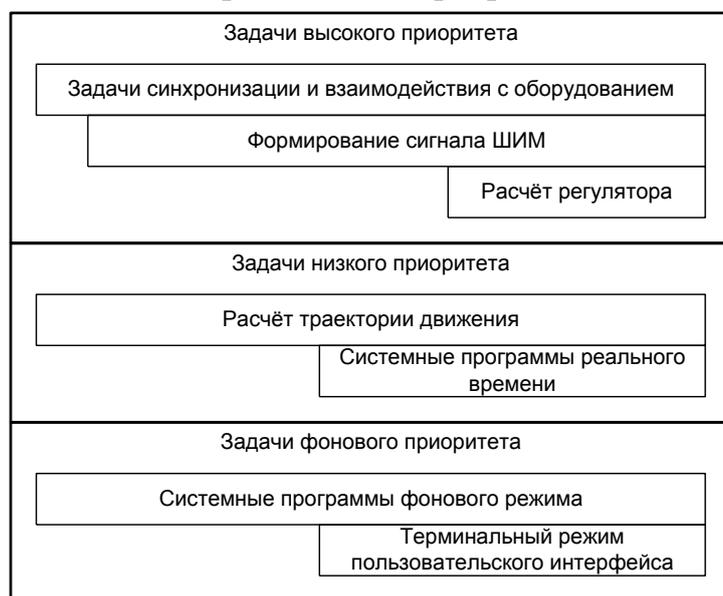


Рис. 14. Распределение задач по уровням приоритета

ресурсов, необходимых для осуществления управления МР. Для этого была определена структура приоритетов задач, выполняемых в блоке управления (рис. 14).

Высокий приоритет имеют те задачи, которые предназначены для организации стабильной работы СУ и осуществления взаимодействия с периферийным

С целью оптимизации доступа к памяти и предотвращения её фрагментации был принят структурный подход, позволяющий получать доступ к конкретным переменным путём адресации по фиксированному смещению относительно начала блока памяти, соответствующего определённому объекту манипулятора или СУ МР, такому как, информация о настройках кинематики и динамики, или о переменных состояния определённого звена.

Другой важной задачей, решённой на данном этапе, было распределение вычислительных

образец. При этом, с целью унификации архитектуры и обеспечения совместимости было принято решение реализовать СУ МР на той же аппаратной платформе, что и система ЧПУ IntNC, разработанная НТЦ «ИНЭЛСИ» ранее. Компоненты разработанной СУ МР IntNCR приведены на рис. 16.

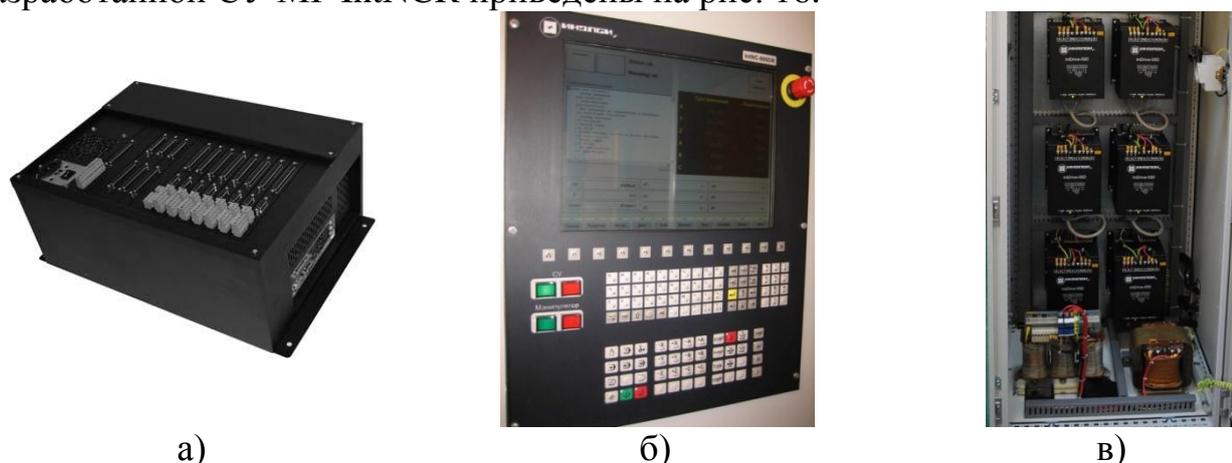


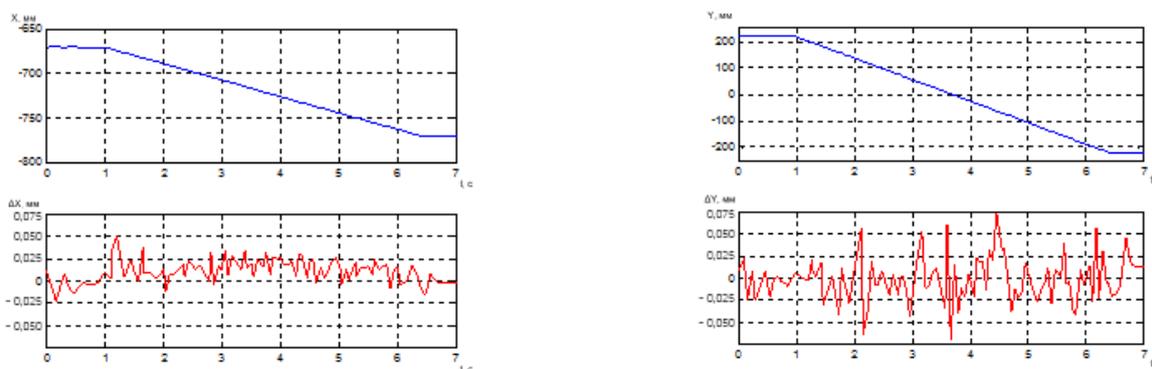
Рис. 16. Компоненты СУ МР:

а) блок управления, б) терминальное устройство, в) шкаф управления

Для подтверждения соответствия СУ технологическим требованиям были проведены исследования на основании ГОСТ 26053-84.

Результаты измерения абсолютной ошибки позиционирования рабочего органа при линейным перемещением приведены на рис. 17.

Из графиков видно, что линейная ошибка позиционирования находится в пределах допустимой точности позиционирования 0,05-0,1 мм. Таким образом можно сделать вывод о соответствии разработанной СУ МР существующим технологическим требованиям.



а) по оси X

б) по оси Y

Рис. 17. Ошибка позиционирования при линейном перемещении

В результате экспериментов были определены пути дальнейшего усовершенствования СУ МР:

- 1) оптимизация динамической модели;
- 2) введение средств адаптивного управления;
- 3) расширение функциональных возможностей.

Разработанный опытный образец также был представлен на выставке «Металлообработка» в г. Москва (рис. 18).



Рис. 18. Разработанная СУ МР на выставке «Металлообработка»

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- 1) Предложенные принципы построения аппаратной и программной архитектуры позволили разработать СУМР, соответствующую требованиям, предъявляемым современной промышленностью. Подход, положенный в основу архитектуры может быть использован для управления не только МР, но и близкими категориями оборудования, например, металлообрабатывающими станками. Такое решение позволяет совместно использовать различные виды МР, станков и других устройств для создания гибких производственных систем.
- 2) Предложенная обобщённая математическая модель даёт возможность осуществлять формирование траектории перемещения рабочего органа манипулятора с учетом рассчитанных моментов, действующих на него, что в итоге позволяет повысить точность перемещения.
- 3) Разработана методика оптимизации динамической модели, которая позволяет проводить вычисления с требуемой точностью, минимизируя используемые ресурсы, что актуально при выполнении численных расчётов в реальном времени.
- 4) Предложены варианты реализации регуляторов положения СУ МР, позволяющих осуществлять контурно-позиционное управление звеньями манипулятора при существенных изменениях сил, действующих на них.
- 5) Предложена методика настройки параметров СУ МР для использования в различных режимах работы с применением двухкритериального подхода, основанного на оценке качества управления при различных задающих воздействиях.
- 6) Разработан алгоритм формирования траектории движения по криволинейным сегментам, позволяющий минимизировать время перемещения за счёт сопряжения участков разгона/торможения на их границах.
- 7) Разработанная структура программных средств с выделением задач реального времени и задач фоновое уровня позволила эффективно разделить их между компонентами двухпроцессорной системы управления. Организация компонентов системного ПО по модульному принципу даёт

возможность проводить их отладку и усовершенствование независимо друг от друга.

- 8) Разработан язык программирования с поддержкой структурированного представления данных, позволяющий создавать эффективные технологические программы с использованием сложных алгоритмов управления.
- 9) Реализован опытный образец, построенный на основании предложенных принципов, результаты испытаний которого подтвердили соответствие разработанной СУ МР существующим технологическим требованиям.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1) Красильникъянц Е. В., Бурков А. П., Иванков В. А., Булдукян Г. А., Ельниковский Е. В., Варков А. А. Системы управления движением технологических объектов//Вестник ИГЭУ - Вып. 4. - 2007. - С. 42-46.

2) Красильникъянц Е. В., Варков А. А., Тютиков В. В. Система управления манипуляционным роботом// Автоматизация в промышленности. - №5. – 2011. – С. 38-44.

3) Тютиков В. В., Красильникъянц Е. В., Варков А. А. Компоненты программного обеспечения манипуляционного робота// Вестник ИГЭУ – Вып. 4. – 2011. – С. 40-43.

4) Красильникъянц Е. В., Варков А. А., Тютиков В. В. Программное обеспечение системы управления IntNCR манипуляционным роботом// Мехатроника. Автоматизация. Управление// №3. – 2012. – С. 31-36.

5) Krasilnikyants E. V., Varkov A. A., Tyutikov V. V. Robot Manipulator Control System //Automation and Remote Control/ Vol. 74 Issue 9, Sep 2013. – pp. 1589-1598.

6) Красильникъянц Е. В., Варков А. А., Тютиков В. В. Варианты построения систем управления манипуляционным роботом // Вестник ИГЭУ. №6, 2014. – С. 49-56.

7) Тютиков В. В., Красильникъянц Е. В., Варков А. А. Система управления манипуляционным роботом с компенсацией динамических моментов// Автоматизация в промышленности// №6. – 2015. – С. 58-63.

в прочих изданиях:

8) Бурков А. П., Варков А. А. Программный комплекс средств отладки и наблюдения микропроцессорных систем. // Состояние и перспективы развития электротехнологии: Междунар. науч.-техн. конф. XII Бенардосовские чтения. Тез. докл.: В 3-х т. – Иваново: ОМТ МИБИФ, 2005. Т. 2.

9) Варков А. А., Бурков А. П. Универсальный язык программирования для разработки систем управления. // Радиоэлектроника, электроника и энергетика: Тринадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Тез. докл.: В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. Т. 1.

10) Бурков А. П., Варков А. А. Требования к программному обеспечению контроллера движения. // Состояние и перспективы развития электротехнологии: Междунар. науч.-техн. конф. XIV Бенардосовские чтения. Тез. докл.: В 3-х т. – Иваново: ОМТ МИБИФ, 2007. Т. 2.

11) Красильникъянц Е. В., Варков А. А. Решение задач управления манипуляционным роботом // 2-я российская мультиконференция по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. Тез. докл. – С. 233-234. – СПб.: 14-16 октября 2008.

12) Варков А. А., Тютиков В. В. Решение задач кинематики и динамики манипуляционных роботов роботом // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии», – Иваново, 2009, – с. 253.

13) Красильникьянц Е. В., Варков А. А. Применение микропроцессорного контроллера движения для управления манипуляционным роботом роботом // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии», – Иваново, 2009, – с. 254.

14) Варков А. А., Гребнов С. В. Возможность применения голосового управления манипуляционным роботом роботом // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии», – Иваново, 2009, – с. 271.

15) Tararykin S. V., Krasilnyants E. V., Artem Varkov. Electromechanical model of manipulator robot. In proc. 8th International Symposium "Topical problems in the Field of Electrical and Power Engineering", Parnu, pp. 291-295, 2010.

16) Красильникьянц Е. В., Варков А. А. Язык программирования робототехнических комплексов IntLANG // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии», – Иваново, 2011, – с. 269.

17) Красильникьянц Е. В., Варков А. А., Тютиков В. В. Программное обеспечение систем управления промышленными роботами// Управляющие системы и машины, - №6. – Киев, 2011. – С. 52-59.

18) Krasilnyants E., Varkov A., Tyutikov V. Improving of dynamic control quality of manipulator robots. In proc. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, Riga, 2012.

19) Варков А. А., Красильникьянц Е. В., Тютиков В. В. Решение задач кинематики и динамики промышленного робота. // Вестник КГУТиИ им. Ш. Есенова. №1, 2012. – С. 49-59.

ВАРКОВ Артем Александрович
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ
РОБОТОМ НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА ДВИЖЕНИЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать . . . 2016 г. Формат 60x84¹/₁₆

Печать плоская. Усл.печ.л.1.13.

Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34