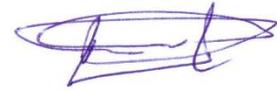


На правах рукописи



Абу Махфуз Ахмад Аталлах Салем

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РОБОТОМ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ  
НЕФТЕПРОВОДОВ

Специальность 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

**Автореферат**

диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Владимир – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель:

**Кобзев Александр Архипович**  
доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Мехатроника и электронные системы автомобилей» ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Официальные оппоненты:

**Меркурьев Игорь Владимирович**  
доктор технических наук,  
заведующий кафедрой «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва  
**Гнездов Николай Евгеньевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
инженер-программист ПАО «НИПТИЭМ»,  
г. Владимир

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО РУДН, г. Москва

Защита диссертации состоится «    »    2017 г. в    час.    мин. на заседании диссертационного совета Д212.025.05 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru/indrx.php?id=174>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью организации, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ученому секретарю диссертационного совета Д212.025.05 Новиковой Е.А.

Автореферат разослан «    »

2017г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.025.05  
кандидат технических наук, доцент

Новикова Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** С каждым годом растет мировая сеть нефтепроводов и связанных с ними нефтехранилищами. Это характерно также для России и стран Ближнего Востока. В процессе эксплуатации нефтепроводов и нефтехранилищ возникает необходимость очистки резервуаров нефтехранилищ и труб нефтепроводов, врезки труб, инспекции состояния. Это требует вырезания полостей больших размеров и сложной формы. Горючие отложения на внутренних поверхностях не допускают применения для их резки методов, сопровождающихся пламенем и искрой, таких как абразивная резка и резка металлическим инструментом, электро и газорезка, лазерная резка. Здесь весьма эффективно применение процесса гидроабразивной резки (ГАР), реализуемого с помощью автоматизированного робототехнического технологического комплекса (РТК). Комплекс состоит из транспортной системы с расположенным на ней технологическим роботом (ТР) и силовой энергетической установкой гидроабразивной резки. При построении системы управления ТР необходимо учитывать факторы недетерминированности, подлежащие парированию: неопределенность расположения труб нефтепровода относительно ТР и не идеальность поверхности резания (деформации, отложения загрязнения, сварные швы и др.).

**Цель работы** состоит в повышении эффективности автоматизированного комплекса гидроабразивной резки трубопроводов и нефтехранилищ нефтепроводов для выполнения ремонтных и профилактических работ за счет разработки моделей и алгоритмов управления технологическим роботом в условиях не полной определенности расположения труб нефтепроводов и не идеальности поверхности резания, обусловленной деформациями, сварными швами, загрязнениями и др.

При этом необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ труб нефтепроводов и резервуаров нефтехранилищ и процесса гидроабразивной резки с позиции роботизации процесса их гидроабразивной резки.

2. Выделить круг задач управления, отражающих процесс в целом - выход транспортной системы (в автономном режиме мобильного робота) на рабочую позицию и управлением процесса движения рабочего органа (РО) (головки гидроабразивной резки, расположенной в схвате) технологического робота по нормали к поверхности резания по требуемой фигуре при выделенных выше особенностях объекта резания.

3. Провести анализ кинематических схем технологического робота и рабочих зон для различных вариантов расположения нефтепроводов и нефтехранилищ и видов вырезаемых поверхностей и определить кинематику и рабочие зоны.

4. Разработать алгоритмы управления технологическим роботом среди которых: согласование осей трубопровода и технологического робота; движение по заданной поверхности резания с учетом её не идеальности; межкоординатной коррекции при рассмотрении системы приводов технологического робота, построенной по принципу вложенных контуров и др.

5. Разработать математические модели ТР и задатчиков рабочих траекторий движения и провести компьютерное моделирование и исследование динамики и алгоритмов межкоординатной коррекции в различных режимах работы.

Работа выполнялась в период с 2010 по 2016 г. во Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. Исследования проводились также в плане НИР, выполняемой по заказу ООО «Грот» № 49/13 «Анализ возможности роботизации процесса гидрорезания нефтепроводов» в период 01.07.13 – 30.11.14.

**Научная новизна.** При выполнении настоящей работы получены следующие научные результаты.

1. Обоснована и предложена кинематическая схема технологического робота, с использованием измерительной системы в виде дифференциальной вилки.

2. Предложен обобщенный алгоритм управления мобильного технологического робота, основанный на частных составляющих, определяющих особенности выполнения процесса резания на всех его стадиях.

3. Разработан алгоритм согласования осей и систем координат объекта резания и технологического робота.

4. Введен комплексный показатель перпендикулярности оси струи к поверхности резания и расстояния до нее и разработан алгоритм его стабилизации при движении по технологической траектории.

5. Разработаны математические и компьютерные модели ТР и задатчиков движения рабочих траекторий. Проведено компьютерное моделирование и исследованы алгоритмы межкоординатной коррекции, основанной на представлении многокоординатной системы в виде вложенных контуров.

**Практическая значимость** работы состоит в следующем.

1. Повышается эффективность процесса гидроабразивной резки нефтепроводов и нефтехранилищ за счет исключения подготовительного времени и универсальности в части формы вырезаемых полостей.

2. Определены рабочие зоны с включением в них объектов резания (труб).

3. Разработанные математические и компьютерные модели технологического робота и контроллеры задания управляющих воздействий могут использоваться для исследования алгоритмов и процессов управления ТР и при вырезании технологических полостей.

4. Результаты работы используются: в ООО «ГРОТ», одном из ведущих организаций по гидроабразивной резке в РФ, и могут быть применены при создании РТК гидроабразивной резки объектов нефтепроводов и нефтехранилищ; в учебном процессе ВлГУ по направлению «Мехатроника и робототехника».

**Объект исследования** - автоматизированный технологический комплекс гидроабразивной резки труб и хранилищ нефтепроводов.

**Предмет исследования** – модели и алгоритмы управления технологическим роботом в условиях не полной определенности расположения труб нефтепроводов и не идеальности поверхности резания.

**Методы исследования.** В работе использованы методы теории автоматического управления и алгоритмического описания процессов, векторно-матричное описание. Компьютерное моделирование и исследование динамики и алгоритмов межкоординатной коррекции проводилось в среде Simulink и SimMechanics пакета Matlab.

**Основные положения, выносимые на защиту**

1. Особенности нефтепроводов и нефтехранилищ и процесса гидроабразивной резки при роботизации процесса резания труб и нефтехранилищ нефтепроводов.

2. Обобщенный алгоритм управления мобильного технологического робота, основанный на частных составляющих, определяющих особенности выполнения процесса резания на всех его стадиях.

3. Алгоритм согласования осей и систем координат объекта резания и технологического робота.

4. Комплексный показатель перпендикулярности оси струи к поверхности резания и расстояния до нее и алгоритм его стабилизации и алгоритмы межкоординатной коррекции.

5. Алгоритмы межкоординатной коррекции, основанной на представлении многокоординатной системы в виде вложенных контуров. Математические и компьютерные модели ТР и задатчиков движения рабочих траекторий и результаты исследования траекторных перемещений и алгоритмов межкоординатной коррекции.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 15 научных конференциях среди которых: XIX Международная научно-практическая конференция «Теоретические и методологические проблемы современных наук». Новосибирск: ЦСНИ, 2016; XI Международный симпозиум «Интеллектуальные системы». М.: РУДН, 2014; Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии». Н. Новгород: НГТУ, 2014; Международная конференция по математической теории управления и математике. Суздаль: ВлГУ; М.: МИАН, 2013; XXVI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-26». Нижний Новгород: ННГТУ, 2013; VI Международная научно-практическая конференция «Инженерные системы – 2013». Москва: РУДН, 2013.

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 24 работах, в т.ч. в 7 статьях в журналах по перечню ВАК, из которых 4 статьи в журналах рекомендованных для группы научных специальностей 05.02.05 и 3 статьи в других журналах по перечню ВАК, 2 статья в международных изданиях и 14 опубликованных докладов на международных конференциях, заявка на патент.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем основного содержания работы составляет 145 страниц, в том числе: 9 таблиц, 100 рисунков, список литературы из 103 наименования, 2 страницы приложений.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертации, описываются цель и задачи диссертации, определена область исследования и показано ее практическое значение.

**В первой главе** проводится анализ объектов резания – труб нефтепроводов и резервуаров нефтехранилищ и процесса гидроабразивной резки, как объекта роботизации, определена структура автоматизированного комплекса гидроабразивной резки и ее особенности и сформулированы задачи управления.

При обслуживании нефтепроводов и нефтехранилищ выполняются операции инспекции, очистки, врезки ответвлений. Для этого на поверхностях труб и резервуаров вырезаются фигуры вида прямоугольник, окружность, пересечение двух цилиндров, возможно иной формы. Характеристика труб нефтепроводов, как объектов резания: размеры диаметров труб: 300 -1200мм с разбивкой на 4 группы, толщина стенок 6 -12 мм. Характеристика нефтехранилищ: стальные вертикальные и горизонтальные цилиндры с диаметром 4,7-95,4м, высотой 5-18 м и толщиной стенок 4-12 мм. Поверхности могут иметь деформации, вмятины, загрязнения, сварные швы высотой 5-10 мм. Горючие отложения на внутренних поверхностях не допускают применения для их резки методов, сопровождающихся пламенем и искрой таких как абразивная резка и резка металлическим инструментом, электро и газорезка, лазерная резка. Здесь весьма эффективно применение гидроабразивной резки.

В основу теоретических и прикладных вопросов гидроабразивной резки и технологических процессов на его основе положены труды советских ученых Верещагина Л.Ф., Семерчана А.А., Никонова Г.П., Тихомирова Р.А., Коржова Е.Н., Степанова Ю.С., Барсукова Г.В., Протасова Ю.И., Латыпова Р.Р., Терегулова Н.Г., Петухова Е.Н., Архипова А.Н. и др. За рубежом в этом направлении работали Франц Н., Ли Д.Р., Лавойе и др. Выделены технологические параметры процесса гидроабразивной резки, определяющие управляющие воздействия для приводов ТР - перпендикулярность к поверхности резания и стабилизация расстояния плоскости среза сопла до поверхности резания (3-5) мм.

В настоящее время используются технологии ГАР поверхностей труб и хранилищ: 1) на основе приспособлений, накладываемых на поверхность резания и управления оператором (рисунок 1, рисунок 2, фотографии предоставлены ООО «Грот»); 2) на основе портативных установок, устанавливаемых на поверхность резания и работающих в автоматическом режиме; 3) на стационарном гидрорезательном оборудовании (специальные станки), в том числе осевые интеллектуальные гидрорезки; 4) с использованием стационарных роботов, несущих головку системы ГАР; 5) переносные труборезы с ЧПУ.

Для повышения эффективности и мобильности процесса гидроабразивной резки трубопроводов эффективно применение мобильной платформы на колесном или гусеничном ходу с установленной на ней технологическим роботом и энергетической установкой (системой) гидроабразивной резки, рисунок 1. Здесь возможны варианты управления движением непосредственно оператором в ручном и дистан-

ционном режимах или автономном и дистанционно-автоматическом режимах. В последних двух случаях вся система рассматривается как мобильный технологический робот (МБТР).

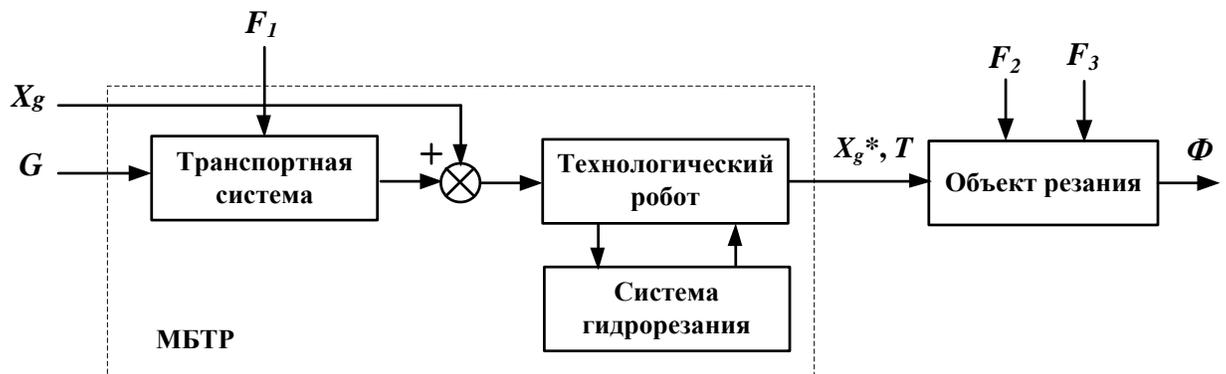


Рисунок 1 - Функциональная схема системы резания нефтепроводов

Транспортной системе задаются координаты точки выхода  $G$  на позицию резания, а технологическому роботу – управляющая программа  $X_g$ , обеспечивающая воспроизведение заданного профиля  $\Phi$  вырезаемой поверхности трубы струей воды высокого давления с абразивом согласно технологическим параметрам  $T$ . За счет не точности выхода в исходную точку резания, влияния рельефа местности и ориентации ТР относительно объекта резания возникает несоответствие систем фактических координат и направления осей объекта резания  $\overline{X}_1$  и технологического робота  $\overline{X}_0$ . Кроме того, имеются отклонения идеальной  $\overline{G}_0$  (программной) и фактической  $\overline{G}_1$  поверхностей резания, обусловленные деформации, вмятинами, сварочными швам, загрязнениями и другими факторами. Необходимо компенсировать отклонение систем координат и направления осей ТР и объекта резания и формы фактической и программной поверхностей резания

$$\Delta X = \overline{X}_1 - \overline{X}_0; \Delta G = \overline{G}_1 - \overline{G}_0.$$

На схеме показаны эквивалентные возмущения:  $F_1$  – со стороны рельефа местности при движении транспортной системы;  $F_2, F_3$  - порождающие отклонения  $\Delta X, \Delta G$ .

Управление транспортной системой (МБТР) не рассматривалось.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы применения в МБТР серийных технологических роботов для гидроабразивной резки и проведен анализ рабочих зон объекта резания. Для резки не металлических материалов применяются роботы, несущие РО гидроабразивной резки, например, робот модели R JET - 061. Для гидроабразивной резки металлов применяются роботы моделей Асси-Cut. Характерным представителем является робот модели (Асси-Cut WJ-44). Однако, все они работают в стационарных условиях. При работе в составе мобильного комплекса, работающего в полевых условиях, они должны быть оснащены (как вариант) измерительным устройством контроля расположения объекта резания (трубы) и состояния поверхности ре-

зания. При работе с конкретными типоразмерами труб и нефтехранилищ возможна разработка специализированного робота, оснащенного рассмотренной измерительной системой.

Рассматриваемый комплекс относится к области мобильных РТК и экстремальной робототехнике, где большие работы проведены коллективами под руководством Охочимского Д.Е., Каляева И.А., Макарова И.М., Юревича Е.И. и рядом коллективов ИПУ, ИПМ и ИМАШ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, проектных и конструкторских организаций различных ведомств. В этой области работают и получили значительные результаты отечественные ученые Градецкий В.Г., Плотников П.К., Павловский В.Е., Ющенко А.С., Зенкевич С.А., Лохин В.М., Подураев Ю.В., Петров С.В., Рубцов И.В., и др. За рубежом в этой области ведутся работы исследователями, среди которых А.В. Moutinho, Е. Hygounenc, Р. Soueres, I. Jung, S. Lacroix, G.C. Avenant, С.Н. Hong, К.С. Choi, В.С. Ki и др. Однако роботизации процесса гидроабразивной резки труб и хранилищ нефтепроводов на основе мобильной транспортной системы не уделено достаточно внимания.

В работе рассматривается специализированный робот для работы в составе мобильного комплекса в полевых условиях. Определена кинематика ТР – ангулярная сферическая, имеющая 6 координат (рисунок 2). На выходном звене манипулятора установлены два симметрично расположенных индуктивных датчика расстояния  $BQ1$ ,  $BQ2$  до поверхности резания образующие вместе с объектом контроля дифференциальную вилку.

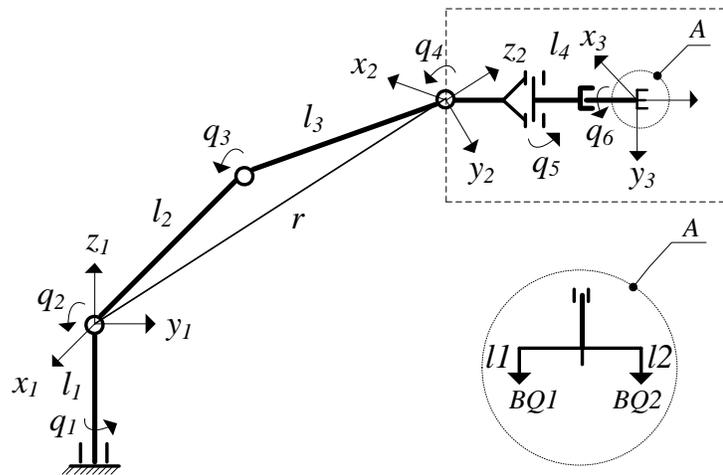


Рисунок 2 - Кинематическая схема технологического робота

Анализ кинематики проведен на основе формулы Малышева-Сомова. Для оценки пространственного расположения звеньев манипулятора и проверки их определенных размеров в формате 3D построены рабочие зоны в программном продукте SolidWorks, рисунок 3.

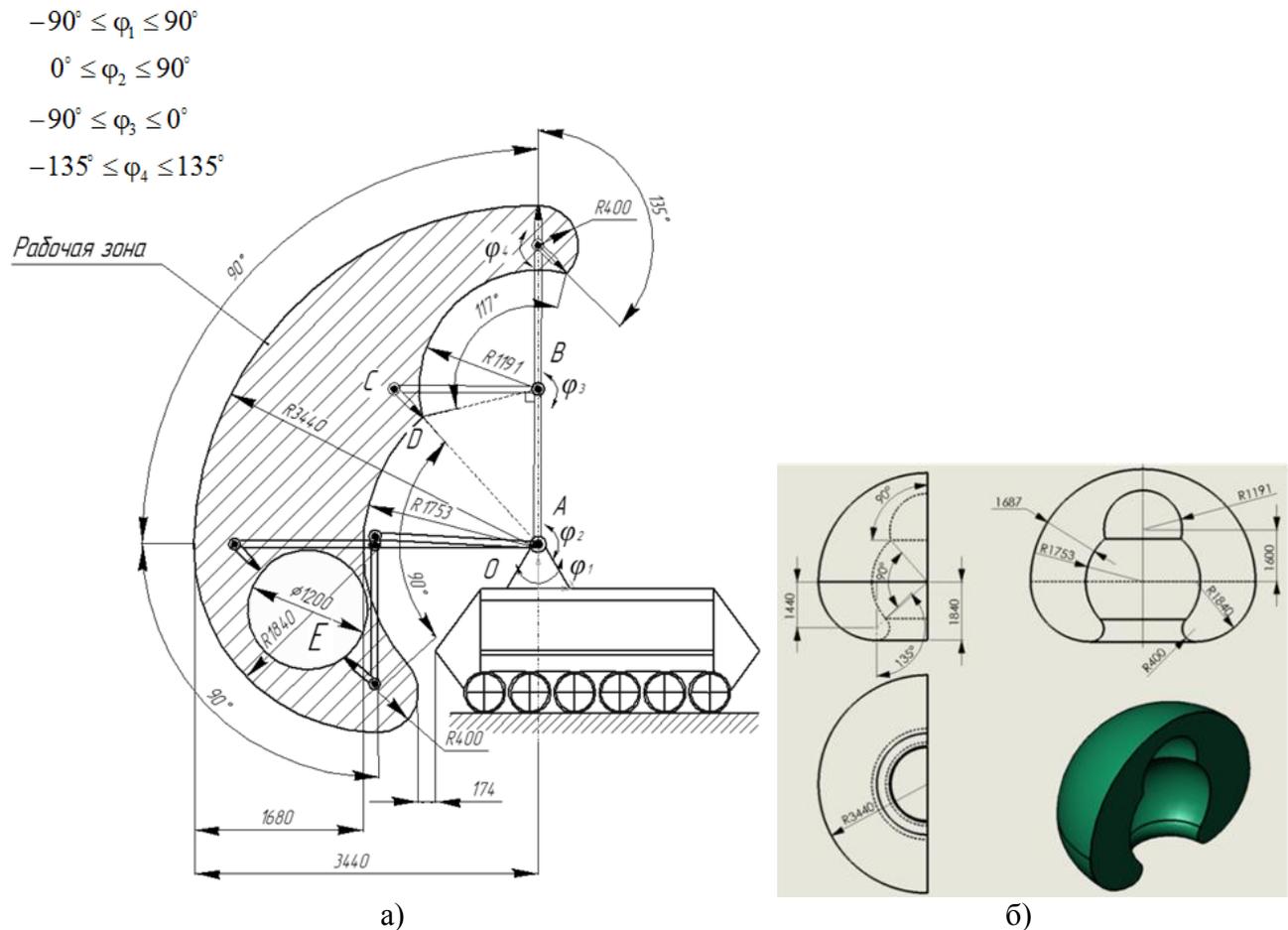


Рисунок 3 - Рабочие зоны технологического робота с транспортным средством

**Третья глава** посвящена разработке алгоритмов управления технологическим роботом, выполняющим операцию гидроабразивной резки трубы нефтепровода.

Использован подход декомпозиции алгоритмов. Первоначально разработан обобщенный алгоритм управления ТР, представляющий последовательность выполнения основных операций, выделенных по технологическим признакам (вывод ТР на исходную позицию, движение, поиск определенных условий, вид операции и др.), рисунок 4. Затем рассмотрены алгоритмы выполнения процедур и условий обобщенного алгоритма. При управлении роботами весьма эффективны кинематические и динамические алгоритмы, рассмотренные в работах Ющенко А.С., Зенкевича С.Л. и парирующие кинематическое взаимовлияние и моменты неуравновешенности. Ввиду того, что технологический процесс ГАР выполняется на постоянной скорости и с малыми ускорениями, реакция струя незначительна полагаем взаимовлияние несущественны, а неуравновешенность парируется постоянной составляющей тока, формируемой в контур регулятора тока. В основу локальных алгоритмов были положены подходы и методика построения алгоритмов позиционно-силового управления при выполнении сборочных работ с использованием метода оценочной функции и алгоритмов адаптивного управления на основе четвертой формы инвариантности.

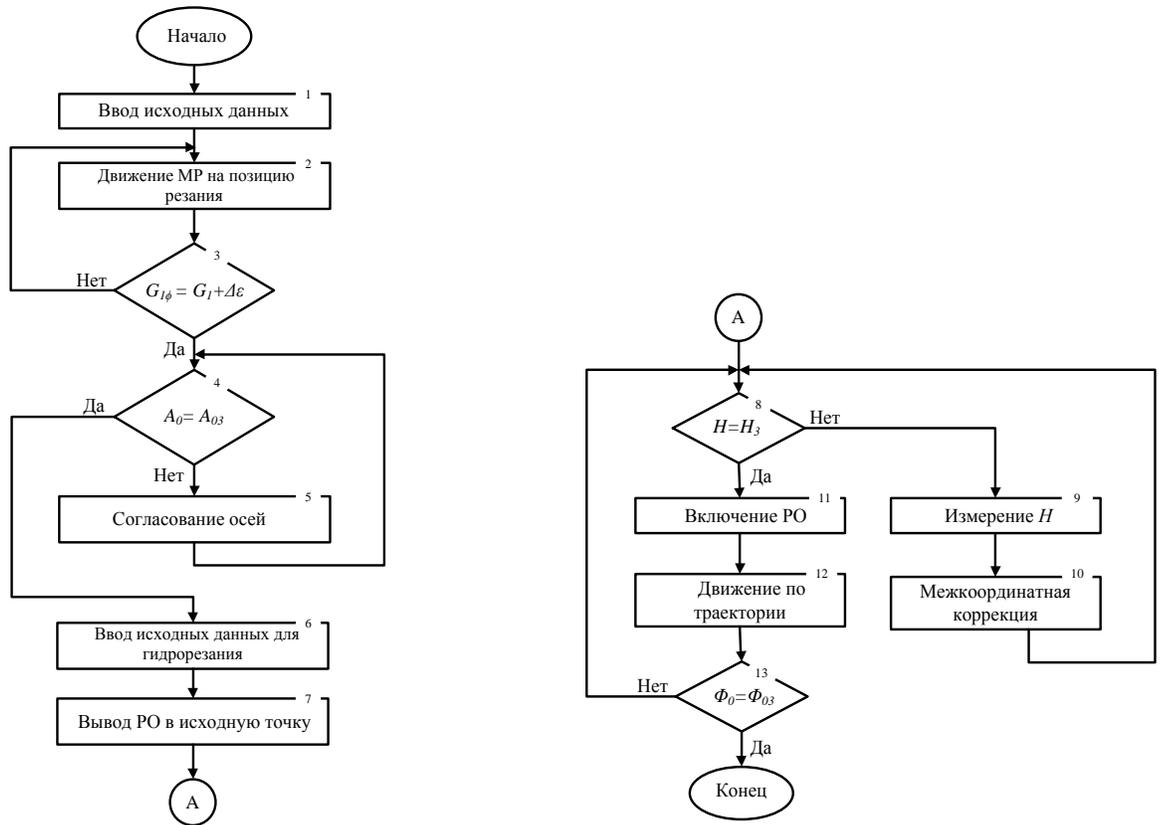


Рисунок 4 - Блок-схема обобщенного алгоритма

Один из основных вопросов при выполнении процесса резания состоит в согласовании систем координат объекта резания и рабочего органа ТР. Используется способ, основанный на рассмотрении двух сечений трубы и дано его аналитическое описание (заявка на патент №2016135606 от 01.09.16). Суть способа поясняется схемой и блок-схемой алгоритма приведенными на рисунке 5 и рисунке 6. Сечение 1 (окружность в системе координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ ) совпадает с базовой плоскостью, заданной в программе  $O_0X_0Y_0Z_0$ . Сечение 2 трубы (окружность в системе координат  $O_2X_2Y_2Z_2$ ) расположено относительно первого сечения на некоторый линейный размер  $p$  по продольной образующей трубы.

*Первый этап* состоит в определении координат точек пересечения окружности сечения 1 с осями  $X_1, Z_1$  (точки  $A_1, A_2$ ), определении и вводе поправок  $\Delta X_1$  и  $\Delta Z_1$ . (блоки 1-4). *Второй этап* предусматривает переход вдоль верхней продольной образующей трубы на некоторую величину  $p$  в сечение 2 и определение координат точек  $A_3, A_4$ . Далее определяется и вводится поправка на смещение продольной оси трубы.

Алгоритм перехода исполнительного устройства из точки  $A_1$  в точку  $A_2$  и из точки  $A_3$  в точку  $A_4$ , и определение координат этих точек основан на использовании измерительной системы типа «дифференциальная вилка» и алгоритма движения РО по методу модифицированной оценочной функции.

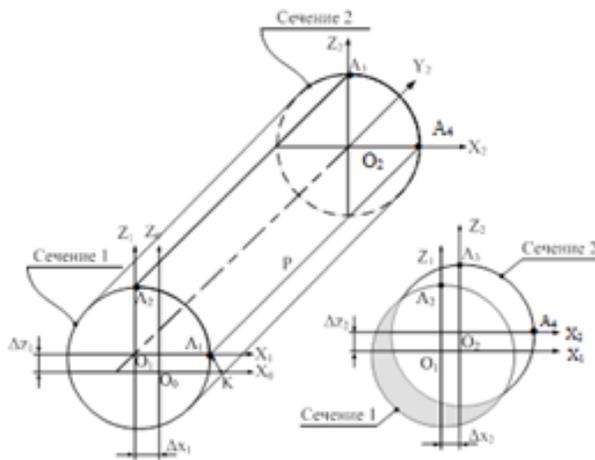


Рисунок 5 - Согласование осей систем координат технологического робота и объекта



Рисунок 6 - Блок-схема алгоритма согласования осей

Для выполнения необходимых условий гидроабразивной резки в части ориентации струи: 1) перпендикулярность относительно поверхности резания  $[(\alpha = 90^0) \wedge (\beta = 90^0)]$ ; 2) стабилизация расстояния от среза сопла до поверхности резания ( $h = h_0$ ) введена комплексная оценка  $H(h, \alpha, \beta)$  вида

$$H(h, \alpha, \beta) = [(h = h_0) \wedge (\alpha = 90^0) \wedge (\beta = 90^0)] .$$

Движение РО и блок-схема алгоритма при выполнении условий комплексной оценки  $H$  приведены на рисунке 7. РО перемещается по программе в горизонтальной плоскости с одновременным контролем расстояний  $l_1, l_2$ , определяемых с помощью датчиков ВQ1, ВQ2. При равенстве  $l_1, l_2$  РО выходит в требуемое положение по нормали (блоки 1-6, 8-11) с требуемым значением  $h_0$  (блоки 7, 13) согласно расчетных значений  $l_1, l_2$ . Алгоритм обеспечивает выход в любую точку поверхности резания, как ориентированную по диаметру, так и продольной линии трубы.

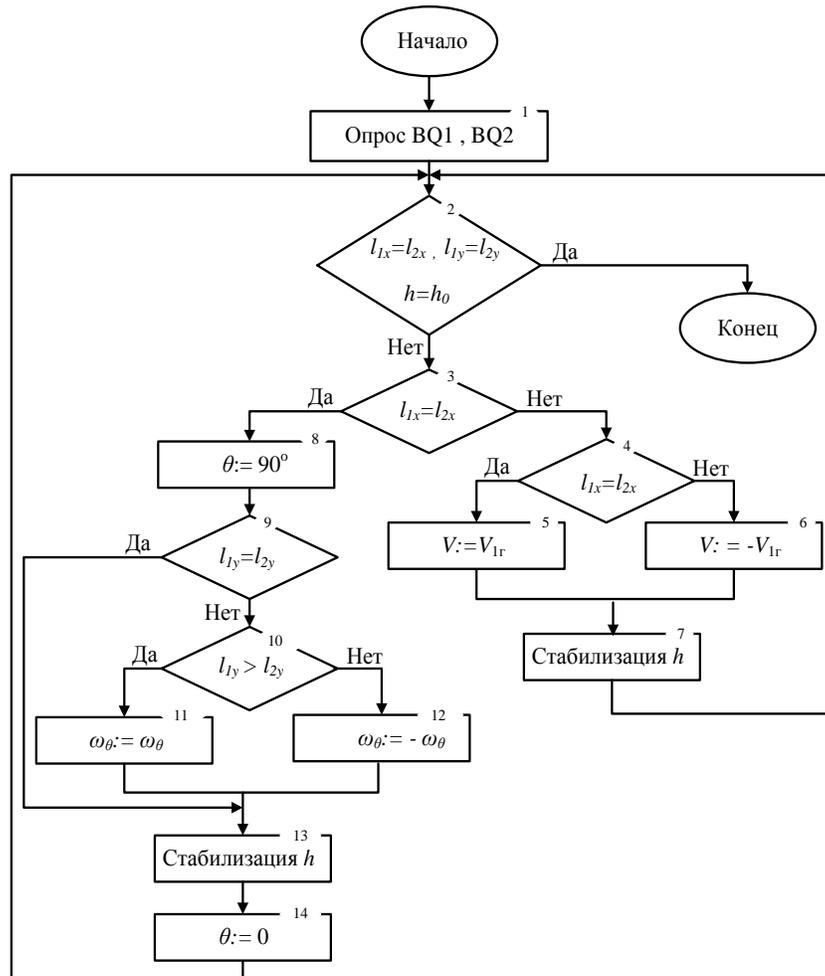
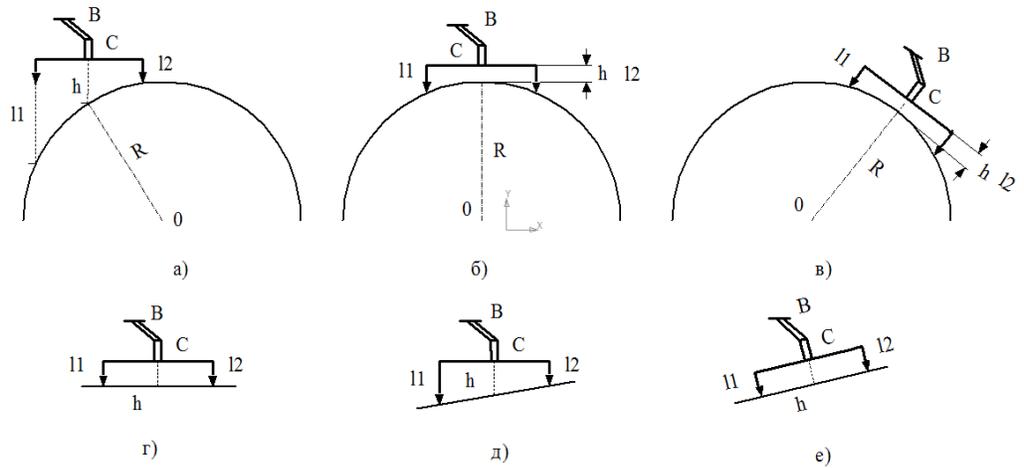


Рисунок 7 - Движения РО и блок-схема алгоритма стабилизации показателя  $H$

Межкоординатная коррекция направлена на парирование отклонений фактического контура поверхности резания трубы от расчетного - для компенсации эквивалентного возмущения  $F_3$  согласно схеме рисунка 3, обусловленного деформациями поверхности, вмятинами, загрязнением и т.п.. Рассматриваемый в работе подход ос-

нован на коррекции исходной программы путем изменения управляющих для приводов воздействий ТР и положениях четвертой формы инвариантности. При межкоординатной коррекции используется принцип вложенных контуров.

Отклонения поверхности от заданного контура можно рассматривать как дополнительное возмущение по положению  $\overline{\Delta F}$ , относительно расчетного  $\overline{F_0}$ . Для перехода на новую траекторию с целью его компенсации следует при движении сформировать дополнительное управление  $\overline{\Delta G}$ , т.е. имеем

$$\overline{F} = \overline{F_0} + \overline{\Delta F}; \quad \overline{G} = \overline{G_0} + \overline{\Delta G}.$$

Алгоритмы введения дополнительного управления зависят от закона изменения управляющего воздействия и для одной координаты в операторной форме имеют вид

$$\Delta g_2 = \frac{k_1}{p} \delta_{f1c} \forall g_1 = const; \quad \Delta g_2 = \frac{k_2}{p^2} \delta_{f1k} \forall V_1 = const; \quad \Delta g_2 = \frac{k_3}{p^3} \delta_{f1d} \forall V'_1 = const;$$

где:  $g_1, V_1, V'_1$  - соответственно управляющее воздействие, скорость и ускорение;

$\delta_{f1c}, \delta_{f1k}, \delta_{f1d}$  - ошибки в первом контуре при постоянном воздействии, изменяющемся с постоянной скоростью и ускорением.

**Четвертая глава** посвящена разработке математических и компьютерных моделей технологического робота для исследования динамики работы ТР и алгоритмов межкоординатной коррекции при вырезании типовых профилей в условиях, отмеченных выше неопределенностей, рассматриваемых как возмущения. Решены прямая и обратная задачи кинематики.

Особенность состояла в том, что кинематическая схема рассматривалась как последовательное соединение звеньев несущей части (обобщенные координаты  $q_1 - q_3$ ) с разветвлением координат исполнительной части  $q_4 - q_6$  относительно координаты  $q_3$ .

Компьютерная модель исследования движения РО технологического робота по рабочим траекториям, реализованная в среде SimMechanics, приведена на рисунке 8. Серым цветом выделены модули, выполняющие решение прямой (большого размера) и обратной задачи (меньшего размера) кинематики.

При разработке компьютерной модели для управления манипулятором рассматривались обобщенные координаты (углы)  $q_1...q_4$ . Полагаем, что стабилизация обобщенного показателя качества  $H$  перед началом движения выполнена. Задачей управления, является воспроизведение заданных движений каждой степенью подвижности манипуляционного механизма и движения РО по эквидистанте для требуемой фигуры резания нефтепровода при отклонениях формы рабочей поверхности. При моделировании использовались модели приводов с двигателями постоянного тока определенной мощности для каждой степени подвижности с учетом следующих положений: 1) звенья исполнительной системы (манипулятора) уравновешены; 2) технологический процесс выполняется с постоянной скоростью, динамическое взаимовлияние звеньев мало и учитывается в уравнениях, полученных при ре-

шении прямой и обратной задач кинематики; 3) реакция струи мала и парируется постоянной составляющей, формируемой в контуре тока.

Для типовых траекторий определены управляющие воздействия для координатных приводов и разработаны виртуальные задатчики траектории движения: прямоугольник на верхней и боковой поверхностях цилиндра; окружность на боковой поверхности цилиндра (по образующей окружности); пересечение двух цилиндров. Для прямоугольника на боковой поверхности цилиндра, траектория была представлена совокупностью составляющих в виде прямых линий и дуг окружности.

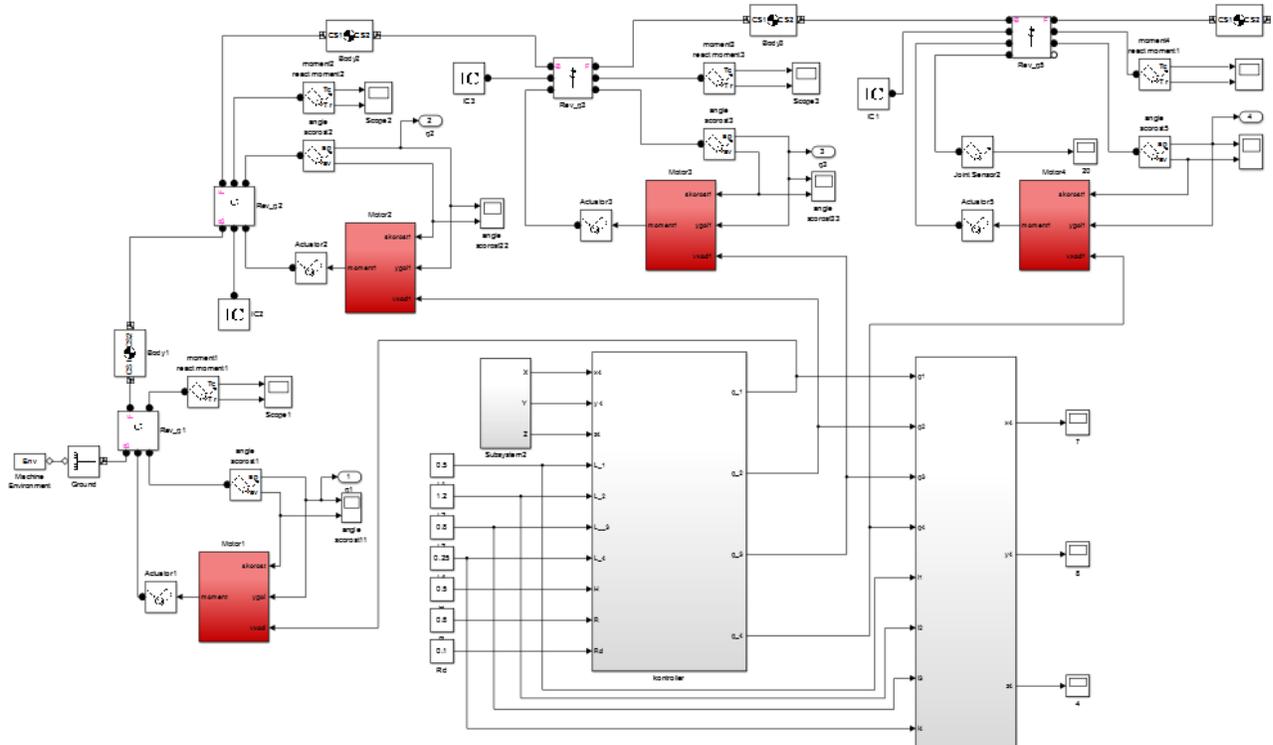


Рисунок 8 - Компьютерная модель исследования движения исполнительного устройства технологического робота по типовым траекториям

**В пятой главе** приводятся результаты исследования процессов управления движением РО без коррекции и с межкоординатной коррекцией. Первоначально было проведено моделирование системы приводов ТР в типовых режимах без коррекции, определены их динамические характеристики, которые удовлетворяют требуемым значениям. Далее проведен анализ движений по технологическим траекториям как при идеальной форме поверхности резания, так и при ее отклонении. Рассмотрены движения по рабочим траекториям: по окружности на плоской поверхности; траектории, образованной пересечением двух цилиндров; прямоугольному профилю на боковой (цилиндрической) поверхности. В качестве возмущения, имитирующего деформацию рабочей поверхности, задавалась дополнительная составляющая в координату  $q_2$  в виде

$$q_2(t) = q_{20}(t) + \Delta q_2(t); \quad \Delta q_2 = \Delta q_{21}1(t).$$

Коррекция вводилась по цепи перекрестной межкоординатной связи в контур 3. Проведенные исследования дают основание полагать компенсацию других видов отклонения рабочей поверхности, как гладких функций (вмятины, сварные швы и т.п.).

Эффект введения контура адаптации межкоординатной коррекции при движении по технологической траектории вида прямоугольник на боковой поверхности цилиндра иллюстрируется рисунком 9 (1 – траектория движения РО манипулятора без межкоординатной коррекции; 2 – с межкоординатной коррекцией).

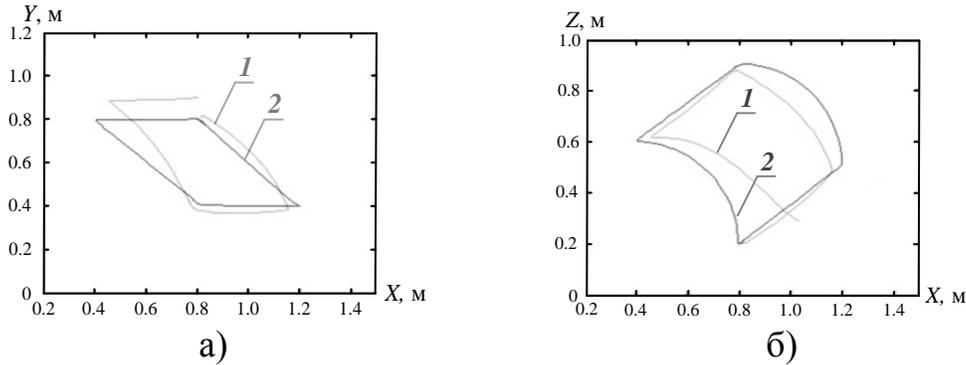


Рисунок 9 - Проекция траектории движения РО робота по прямоугольному профилю: а) в плоскости XOY; б) в плоскости XOZ

Задавались отклонения рабочей поверхности от требуемой по диаметру в диапазоне 5-10 мм. Характеристики, иллюстрирующие повышение точности при введении адаптивного контура межкоординатной коррекции (для 5 мм) приведены на рисунке 15.

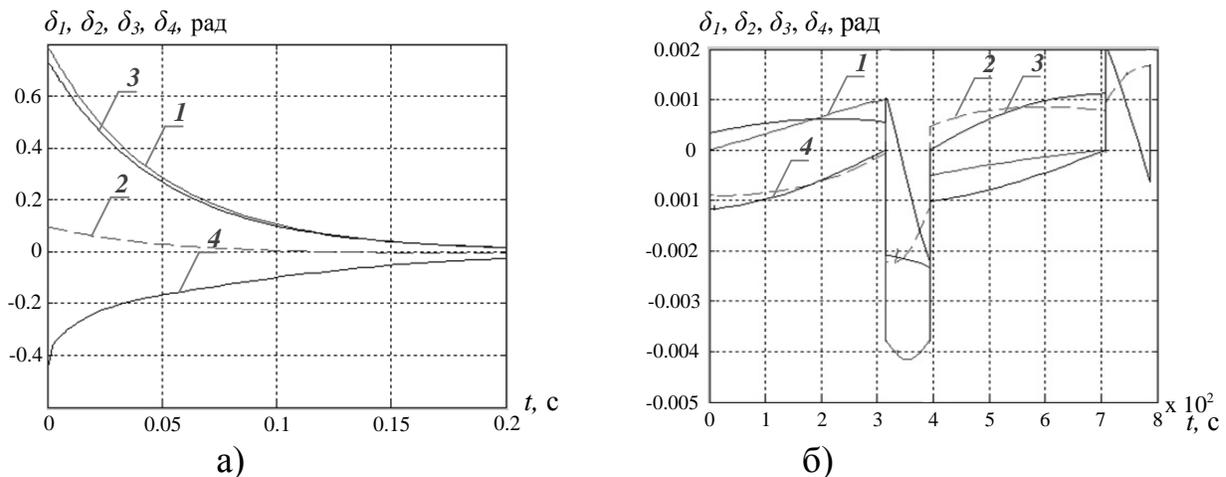


Рисунок 10 - Ошибки: а) переходных процессов обобщенных координат; б) в процессе движения по технологической траектории

Переходные процессы приводов для четырех координат показаны на рисунке 10,а. Время переходного процесса для начальных значений согласно рис. 10, а составляет 0.2 с. При движении по технологической траектории ошибки положения исполнительных приводов манипулятора меняются в пределах от - 0.002 до 0.004

рад, что соответствует требованиям, предъявляемым к точности вырезаемых фигур поверхностей трубы.

Проведенные исследования показали эффективность введения межкоординатной коррекции в части повышения точности перемещения РО при движении по другим типовым траекториям при симулировании деформаций поверхности резания.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Анализ объекта и техпроцесса гидроабразивной резки труб нефтепроводов и поверхностей нефтехранилищ резания выявил принципиальные особенности при его роботизации: ограниченная точность выхода мобильного робота в исходную точку в рамках  $\leq 200$  мм; не соответствие осей пространственного взаимного расположения технологического робота и поверхности резания (трубы, резервуара); не идеальность поверхности резания, обусловленная сварными швами, деформациями, загрязнением и др.).

2. Обоснована базовая кинематика технологического робота: 6-ти степенной робот с угловой системой координат, дополненная измерительной системой из двух датчиков, образующих в совокупности с измеряемым объектом дифференциальную вилку, и расположенной на последнем звене.

Размеры рабочей зоны – две пересеченные сферы с радиусами  $R_1 = 3440$  мм,  $R_2 = 1191$  мм при резки наземного нефтепровода с диаметром  $D = 1200$  мм. Сформулированы требования к плечам основания расположения датчиков дифференциальной вилки из условия измерения расстояния до поверхности резания с точностью  $\pm 0,2-0,5$  мм., это:  $\pm 100$  мм относительно оси РО, вылет относительно линии плеч 50 мм.

3. Разработан обобщенный алгоритм управления ТР, представляющий последовательность выполнения основных операций, выделенных по технологическим признакам (движение, поиск определенных условий, вид выполняемой операции и др.). При разработке локальных алгоритмов использован принцип декомпозиции.

4. Разработан способ и алгоритм согласования осей ТР и объекта вида трубопровод. Поисковые движения определены из условия точности расположения трубы на участке резания 0,5 мм. Точность определения углового положения в вертикальной и горизонтальной плоскостях составила не хуже 0,05 град.

5. Введен комплексный показатель  $H$  для оценки ориентации оси струи по нормали и расстояния поверхности сопла относительно поверхности трубы. Для его стабилизации использованы алгоритмы межкоординатной коррекции. Для точности стабилизации  $\pm 0,2$  мм погрешность отклонении от перпендикулярности продольной оси РО угла качания  $\alpha$  и  $\beta$  относительно осей  $X, Y$  в пределах  $\pm 1$  град.

6. Разработаны математические и компьютерные модели для исследования алгоритмов управления ТР при движении по технологическим траекториям и деформации поверхности резания. Проведенные исследования в среде SimMechanics алгоритмов межкоординатной коррекции подтвердили их работоспособность для парирования деформации поверхности резания 5-15 мм, которая в общем случае может изменяться и в больших пределах.

## Основные публикации по теме диссертации

*В журналах из перечня ВАК, рекомендованных для группы научных специальностей 05.02.05:*

1. Кобзев, А.А. Обоснование и выбор кинематической структуры манипулятора гидрорезания нефтепроводов / А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз // *Фундаментальные исследования*. 2016. - № 10 (часть 1). – С.53-61.

2. Кобзев, А.А. Алгоритмы управления технологическим манипулятором гидрорезания нефтепроводов с учетом специфики выполняемого процесса / А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз // *Динамика сложных систем - XXI век*. - 2016. - № 4. - С. 36-45.

3. Архипов, А.Н. Согласование осей объекта и манипулятора при гидрорезании нефтепроводов / А.Н. Архипов, А.А. Кобзев, Е.В. Еропова, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз // *Фундаментальные исследования*. - 2015, №2. - С. 29-34.

4. Кобзев, А.А. Особенности реализации четвертой формы инвариантности в системах программного управления / А.А. Кобзев, А.А. Махфуз // *Известия ВолгГТУ, серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»*. Выпуск 18. Волгоград: ВолгГТУ. - 2013. - N22. - С. 102-105.

*В других журналах из перечня ВАК:*

5. Архипов, А.Н. Анализ роботизации процесса гидрорезания нефтепроводов / А.Н. Архипов, А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз, Е.Н. Петухов // *Современные проблемы науки и образования*. - 2014. - N6. URL: <http://www.science-education.ru/120-15697>.

6. Кобзев, А.А. Анализ алгоритмов коррекции программной траектории в устройстве формирования управляющего воздействия для приводов робототехнических систем / А.А. Кобзев, А.А. Махфуз, А.В. Лекарева, Н.А. Новикова // *Современные проблемы науки и образования*. - 2014. - N6 URL: <http://www.science-education.ru/120-15702/>.

7. Кобзев, А.А. Исследование алгоритмов динамической коррекции в робототехнических системах / А.А. Кобзев, Н.А. Новикова, А.В. Лекарева, А.А. Абу Махфуз // *Современные проблемы науки и образования*. - 2014. - N3. URL <http://www.science-education.ru/>.

### *Материалы международных научных конференций*

8. Кобзев, А.А. Применение дифференциального метода при согласовании осей технологического робота и объекта манипулирования // А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз / *Материалы XIX Международной научно-практической конференции «Теоретические и методологические проблемы современных наук»*. Новосибирск, ЦСНИ. - 2016. – С. 18-25.

9. Кобзев, А.А. Коррекция в многокоординатных системах введением межкоординатных перекрестных связей / А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, О.С. Сидорова, А.А. Махфуз // *Материалы XVIII Международной научно-практической конференции*,

посвященной памяти профессора И.Н. Аринина. Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Владимир.: ВлГУ. - 2016. - С. 315-320.

10. Кобзев, А.А. Особенности роботизации процесса гидрорезания нефтепроводов / А.А. Кобзев, А.А. Абу Махфуз // Теоретические и прикладные вопросы образования и науки. Часть 4. Сборник научных трудов по материалам МНПК. Тамбов: УКОМ. - 2014. - 65 с.

11. Кобзев, А.А. Задачи управления мобильным технологическим роботом гидрорезания нефтепроводов / А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, О.В. Обидина, А.А. Махфуз // XVI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств». Владимир: ВлГУ. - 2014. - С. 66-68.

12. Кобзев, А.А. Концепция роботизации процесса гидрорезания нефтепроводов / А.А. Кобзев, Е.Н. Петухов, А.А. Махфуз // XI Международного симпозиума «Интеллектуальные системы». М.: РУДН. - 2014. - С. 356-359.

13. Кобзев, А.А. Информационное обеспечение роботов для гидрорезания нефтепроводов / А.А. Кобзев, А.А. Махфуз // Международная научно-техническая информация «Информационные системы и технологии». Н. Новгород: НГТУ, ИСТ. 2014. - С. 151-152 .

14. Кобзев, А.А. Исследование привода с симулятором межкоординатных возмущений / А.А. Кобзев, Н.А. Новикова, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз // Международная научно конференция «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-27. Тамбов: ТГТУ, 2014. - С. 129-133.

15. Абу Махфуз, А. Выбор кинематики технологического робота для гидрорезания нефтепроводов / А. Абу Махфуз // Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности». - Могилев. БРУ. 2013. – С. 8.

16. Кобзев, А.А. Структурная реализация модифицированной четвертой формы инвариантности / А.А. Кобзев, А.А., Абу Махфуз // Международная конференция по математической теории управления и математике. М.: МИАН. - 2013. - С.129 -132.

17. Кобзев, А.А. Система автоматического управления с межкоординатной коррекцией / А.А. Кобзев, В.А. Немонтов, А.А. Абу Махфуз // XXVI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях: ММТТ-26» в 10 т., Т.1. Нижний Новгород: ННГТУ. - 2013. – С. 57-59.

18. Кобзев, А.А. Программное управление мобильными технологическими роботами / А.А. Кобзев, В.А. Немонтов, Ю.Е. Мишулин, А.А. Абу Махфуз // XV Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти профессора И.Н. Аринина «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств». Владимир: ВлГУ. - 2013. - С. 66-68.

19. Кобзев, А.А. Автоматическая коррекция управляющего воздействия в координатных приводах / А.А. Кобзев, А. А. Махфуз // Труды VI Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2013». Москва: РУДН. - 2013. – С. 269-271.

20. Абу Махфуз, А. Алгоритмы коррекции управляющего воздействия в многокоординатных приводах с перекрестными связями / А. Абу Махфуз // Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности». Могилев. БРУ. - 2012. С. - 149.

21. Alexander, Kobzev, Systems of multi coordinated drives of the technological equipment with cross diverse communications / Alexander Kobzev, Aby Maxfus, // Сборник докладов XVIII научно-технической конференции с международно участие «Транспорт, Экология - устойчиво развитие». Варна. Технически университет, ЕКО - ВАРНА 2012. - Том 19. - P. 487-492.

#### **Статьи в зарубежных изданиях**

22. Ahmad, A. Mahfouz Mechatronics Design of a Mobile Robot System / Ahmad A. Mahfouz, Ayman A. Al, Farhan A. Salem // I.J. Intelligent Systems and Applications, ijisa. URL: <http://www.mecs-press.org>. DOI: 10.5815. 2013. - P. 23-36.

23. Ahmad, A. Mahfouz Modeling, Simulation and Dynamics Analysis Issues of Electric Motor, for Mechatronics Applications, Using Different Approaches and Verification by MATLAB- Simulink / Ahmad, A. Mahfouz , Mohammed M. K., Farhan A. Salem // I.J. Intelligent Systems and Applications. URL: (<http://www.mecs-press.org/>). 2013. - P. 39-57.

#### **Заявка на патент**

24. Кобзев А.А., Еропова Е.В., Лекарева А.В., Махфуз А.А. Способ согласования осей технологического робота и объекта манипулирования. Заявка на патент №2016135606 от 01.09.16.

#### **Личный вклад соискателя в публикациях:**

[4, 10, 11, 12, 13] - анализ технологического процесса роботизации и задачи управления; [1, 15,] - анализ и выбор кинематической схемы технологического робота; [2, 3, 5, 7, 8, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24] - алгоритмы управления технологическим роботом; [6, 9, 14, 17, 19] - моделирование и исследование системы управления технологическим роботом.

Подписано в печать .... 2017.

Формат 60x84/16. Усл. печ.л.0,93 Тираж 100 экз.

Заказ ....

Издательство

Владимирского государственного университета  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.