

4490737
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

СМИРНОВ Евгений Дмитриевич

УДК 681.5.013:621.865.8

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ПРИВодОВ ПОРТАЛЬНОГО РОБОТА
ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ ПРИ УЧЕТЕ УПРУГОСТИ
НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

05.02.03 - Системы приводов

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1990

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Максимов А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Петухов В.П.
кандидат технических наук,
доцент Головин В.Ф.

Ведущая организация Всесоюзный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт автогенного машиностроения (ВНИИАвтогенмаш)

Защита состоится "16" сентября 1990г. в 14
часов на заседании специализированного совета К 053.15.06 в
Московском государственном техническом университете им. Н.Э.
Баумана по адресу: 107005, г. Москва, Б-5, 2-я Бауманская
ул., д. 5.

Ваш от
просьба вы
Совета.

С дисс
ского госуд
мана.

Авторе

чать,
я

ов-
Бау-

г.

Ученый
специализир
к. т. н.

М 480737

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задача ускорения научно-технического прогресса страны неразрывно связана с переходом к высокоэффективным автоматизированным производствам, созданием и внедрением промышленных роботов, машин и оборудования, обеспечивающих высокое качество выпускаемой продукции машиностроения.

Рост потребностей народного хозяйства в металле требует ускорения темпов проведения исследований, проектирования и внедрения оборудования для термической резки листового и трубного проката, повышения уровня автоматизации управления процессами термической резки на основе применения промышленных роботов.

В условиях возрастающих скоростей обработки, характерных для технологических процессов плазменной и лазерной резки, и увеличением габаритов промышленных роботов для раскроя листового материала все более актуальными становятся задачи исследования и разработки систем управления, обеспечивающих высокие динамические и точностные характеристики роботов термической резки (РТР).

Специализированный порталный РТР для раскроя листового проката представляет собой машину, работающую в прямоугольной системе координат. Продольное движение рабочих органов робота осуществляется перемещением всей машины, поперечное - перемещением суппортов вдоль рамы портала.

Экспериментальные исследования первого отечественного широкопортального РТР типа ПКЦВ показали, что упругие колебания рамы портала в направлении продольного движения оказывают существенное влияние на точность изготовления деталей и качество поверхности обработки. Существующие математические модели движения РТР не учитывают упругих свойств несущей конструкции, поскольку они были разработаны для роботов с небольшими габаритными размерами. Упругие колебания портала этих роботов практически не влияют на динамику машины. Отсутствует также методика синтеза системы приводов упругого РТР, обеспечивающая требуемую точность при контурной обработке плоских деталей. Поэтому создание математи-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1490737

Смирнов Е. Д. Синтез системы

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ческой модели движения РТР, учитывающей упругие колебания рамы портала, разработка методики синтеза системы приводов РТР с учетом упругости объекта управления и разработка рекомендаций по выдаче управляющих воздействий на следящие привода при отработке программных траекторий являются актуальными задачами, требующими решения.

Цель работы – создание инженерной методики синтеза системы приводов РТР при учете упругости несущей конструкции. Достижение этой цели требует решения следующих задач:

- создание математической модели динамики РТР, учитывающей упругие колебания рамы портала;
- создание методики синтеза системы приводов РТР при использовании линеаризованных математических моделей;
- разработка прикладного программного обеспечения для автоматизации процедур анализа и синтеза системы приводов РТР.

Методы исследования. В работе использованы методы сопоставления материалов и отрывательной механики, метод сосредоточенных масс теории колебаний, частотные методы синтеза линейных систем управления, метод математического моделирования, методы параметрического синтеза нелинейных систем управления. Проверка адекватности математических моделей выполнялась путем проведения натурных экспериментов.

Научная новизна. I. Впервые создана математическая модель движения порталного РТР, учитывающая упругие колебания несущей конструкции робота.

2. Построена двухступенчатая методика синтеза привода постоянного тока, обеспечивающая демпфирование упругих колебаний трехмассового объекта управления.

3. Создана оригинальная имитационная математическая модель управляемого тиристорного преобразователя с отдельным управлением силовыми комплектами и запирающим неработающим комплектом. Модель ориентирована на моделирование мгновенных значений тока и напряжения преобразователя при его работе на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС.

4. Построена автоматизированная методика синтеза системы приводов РТР с учетом упругих свойств несущей конструкции и механических передач, при использовании которой обеспечи-

вается увеличение точности изготовления деталей и улучшение качества поверхности реза.

Практическая ценность. Созданная математическая модель движения робота портального типа позволяет провести сравнительный анализ различных конструктивных схем, выработать рекомендации по проектированию несущей конструкции робота. Построенная методика синтеза системы приводов РТР и разработанное программное обеспечение могут быть использованы для анализа, синтеза и проектирования нелинейных систем управления роботов портального типа различного назначения.

Эффективность работы связана с повышением динамических и точностных характеристик системы управления РТР, возможность исследования предельных динамических возможностей систем управления, разработки алгоритмов управления ими путем применения методов и средств автоматизированного проектирования.

Реализация работы. Основные научные и практические результаты работы послужили основой для разработки подсистемы автоматизированного проектирования систем управления РТР и были использованы во ВНИИавтогенмаш при выполнении НИОКР по созданию систем управления первого отечественного широкопортального РТР типа ПКЦВ и автоматизированного лазерного технологического комплекса (АЛТК). Прикладное программное обеспечение было использовано в НИИАС при разработке прецизионного привода многостепенной механической системы для идентификации параметров модели привода по выходным характеристикам реального привода и при параметрическом синтезе привода по заданной динамической точности.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-техническом семинаре "Опыт разработки и внедрения САПР объектов химического и нефтяного машиностроения" (Москва, ВДНХ СССР, 1988г.), на заседаниях научно-технического совета ВНИИавтогенмаш (1987-1989 гг.), на научных семинарах кафедры "Автоматические системы и робототехника" МВТУ им.Н.Э.Баумана (1989г.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 5 научных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержит 141 машинописную страницу основного текста, 101 рисунок, 8 таблиц, список литературы на 104 наименования, приложение на 12 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и перечислены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведено краткое содержание работы.

В первой главе представлены результаты экспериментальных исследований динамики первого отечественного широкопортального РТР ПКЦВ (ширина портала составляет 9,8 м). Эксперимент заключался в следующем: выполнялась отработка типовых участков контуров роботом (квадратов, окружностей различных размеров) на различных скоростях, и при помощи специальных самописцев, укрепленных на суппортах, осуществлялся контроль отработки программных траекторий. При этом суппорта с самописцами имели различное расположение вдоль рамы портала. Результаты эксперимента продемонстрировали существенное влияние упругих свойств рамы портала в направлении продольного движения РТР на точность отработки программных траекторий. Причем наибольшие отклонения от заданного контура зафиксированы для суппортов, расположенных около середины портала. Представленный аналитический обзор существующих математических моделей движения РТР и наиболее близких к таким роботам по конструктивному решению механизмов показал, что для описания динамики упругого РТР не существует подходящей математической модели. Обзор литературы по вопросам синтеза электроприводов с упругими связями показал, что при использовании существующих методик не может быть в полной мере решена задача обеспечения динамической точности РТР при контурной обработке плоских деталей. Таким образом обоснована необходимость построения математической модели движения РТР, учитывающей упругие колебания несущей конструкции, и создания методики синтеза системы приводов РТР при учете упругих свойств объекта управления.

Вторая глава посвящена созданию математической модели движения РТР, учитывающей упругость несущей конструкции. Для построения такой модели необходимо сначала разработать математическую модель упругих колебаний рамы портала в направлении продольного движения робота. При движении порталного РТР возможно возникновение двух типов упругих колебаний:

- колебания точек рамы портала относительно синхронно движущихся кареток, вызванные действием распределенных сил инерции при ускоренном движении робота;
- колебания, возникающие из-за неравенства движущих сил, приложенных к кареткам.

При построении статической модели рамы портала были сделаны следующие допущения:

- рама портала заменяется эквивалентной балкой (данная гипотеза сделана на основании достаточно большого отношения длины рамы к ее ширине (для ПКЦВ ≈ 11));
- жесткость сечения эквивалентной балки на изгиб постоянна по длине балки (это допущение принято на том основании, что передняя и задняя балки рамы имеют практически постоянные по длине площади поперечного сечения, а "распоры", соединяющие балки, относительно равномерно распределены по длине рамы);
- граничные условия на концах эквивалентной балки - "упругий шарнир";
- каретки считаются абсолютно жесткими телами;
- повороты кареток синхронизируются пружиной постоянной жесткости (т.к. реальная рамная конструкция портала обеспечивает определенную связь между каретками).

Упругие колебания представленной механической системы с распределенными параметрами описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Для решения задач анализа и синтеза системы управления движением РТР значительно выгоднее иметь математическую модель объекта в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. Известно несколько способов перехода от непрерывных моделей механических систем с распределенными параметрами к дискретным моделям. Поскольку

статическая модель рамы портала имеет в своем составе эквивалентную балку постоянной жесткости сечения на изгиб, для дискретизации непрерывной модели был выбран метод сосредоточенных масс. Математическая модель упругих колебаний системы с сосредоточенными параметрами, полученная из исходной непрерывной системы, описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений: $M\ddot{X} + B\dot{X} + RX = P$, где $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ - вектор перемещений, $M = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n)$ - матрица масс, $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_n)$ - матрица коэффициентов демпфирования, $R = \|r_{ij}\|$ - матрица жесткости, $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T$ - вектор внешних сил.

Для численного решения уравнений, описывающих упругие колебания портала, выполнено преобразование этой системы уравнений к нормальной форме Коши:

$$\dot{Q} = -C^1 D Q + C^1 P,$$

где $Q = [X; \dot{X}]^T$ - вектор переменных состояния, $P = [0; P]^T$,

$$C^1 = \begin{bmatrix} I & 0 \\ V & U \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & I - I \\ R & 0 \end{bmatrix}, \quad V = -\text{diag}\left(\frac{b_1}{m_1}, \frac{b_2}{m_2}, \dots, \frac{b_n}{m_n}\right),$$

$$U = \text{diag}\left(\frac{1}{m_1}, \frac{1}{m_2}, \dots, \frac{1}{m_n}\right).$$

Элементы матрицы масс определяются в соответствии с методом сосредоточенных масс, элементы матрицы демпфирования могут быть определены по результатам экспериментальных исследований свободных колебаний портала. Элементы вектора внешних сил определяются по-разному для двух типов упругих колебаний. При описании колебаний портала в случае синхронно движущихся кареток на все "внутренние" массы (т.е. все сосредоточенные массы, расположенные на эквивалентной балке, за исключением масс и моментов инерции кареток) действуют силы инерции, равные произведению ускорения переносного движения на массу соответствующего сосредоточенного груза. При описании колебаний, вызванных неравенством движущих сил, приложенных к кареткам, единственным отличным от нуля элементом вектора P будет сила, приложенная к условно подвижной каретке и равная разности движущих сил. Элементы матриц

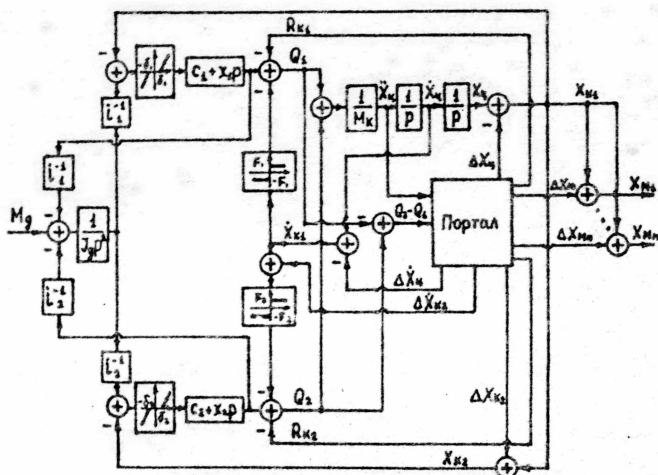
жесткости предложено определять обращением матриц податливости. Для расчета коэффициентов податливости получены аналитические выражения упругих линий балки для двух способов закрепления кареток при действии сосредоточенной силы, приложенной к произвольной точке портала, и под действием моментов, приложенных к каждой из кареток.

Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных исследований свободных колебаний портала РТР ПКЦВ показал, что созданная математическая модель упругих колебаний с высокой степенью точности описывает реальные процессы, происходящие в несущей конструкции РТР. Причем, уже при разделении эквивалентной балки модели портала на два пролета по методу сосредоточенных масс расчетное значение первой собственной частоты при двух закрепленных каретках отличается от экспериментального менее чем на 3%, а при одной закрепленной каретке - менее чем на 7%. При увеличении количества пролетов ошибка моделирования уменьшается, так для 10 пролетов расчетные значения частот первого тона свободных колебаний отличаются от экспериментальных на 1% и 2,5% для различных способов закрепления кареток.

Разработанная математическая модель привода продольного движения РТР (рис.1) учитывает следующие особенности реального робота с двусторонним механическим приводом портала:

- каждая из двух механических передач от двигателя, расположенного в центре портала, до кареток продольного хода обладает упругостью (параметры C_1 , X_1 и C_2 , X_2), люфтом (δ_1 и δ_2), сухим трением (F_1 и F_2);
- учитываются упругие колебания портала в направлении продольного движения РТР (блок структурной схемы с надписью "Портал" предназначен для описания обоих типов упругих колебаний рамы портала).

Математическая модель движения механической части РТР в направлении поперечного движения (перемещение оппортов вдоль рамы портала) может быть представлена в виде двухмассовой модели с упругостью, люфтом и сухим трением в механической передаче. Взаимовлияние приводов выражается в изменении частот и форм свободных колебаний несущей конструкции



M_d - момент двигателя; Q_1, Q_2 - движущие силы, приложенные к кареткам портала; M_k - сумма масс, сосредоточенных в каретках; X_q - перемещение центра масс портала при переносном движении в предположении, что рама портала обладает бесконечной жесткостью на изгиб; X_{k1} - абсолютное перемещение условно неподвижной каретки; X_{k2} - абсолютное перемещение условно подвижной каретки; X_{Mi} ($i = 1, 2, \dots, n$) - абсолютные перемещения сосредоточенных масс эквивалентной балки модели портала; R_{k1}, R_{k2} - реакции, возникающие в сечениях кареток при упругих колебаниях портала.

Рис.1. Структурная схема математической модели движения механической части привода продольного хода порталного РТР.

в направлении продольного движения вследствие перераспределения массы вдоль длины портала, вызванного перемещением суппортов в направлении поперечного движения.

Третья глава посвящена разработке методики синтеза системы приводов РТР при использовании линеаризованных математических моделей. Линеаризованные математические модели приводов отличаются от нелинейных тем, что в них не учитываются ограничения фазовых координат, люфты и сухое трение в механических передачах, а также эффекты квантования по времени и уровню сигналов, вносимые устройством ЧПУ (УЧПУ) (главная обратная связь по углу поворота вала двигателя замыкается через УЧПУ). При построении линеаризованной модели привода продольного движения РТР с двусторонним механическим приводом портала введено следующее допущение: механические передачи от исполнительного двигателя, расположенного в центре портала, до левой и правой кареток имеют идентичные параметры. Данное предположение справедливо с точностью до технологического разброса параметров при изготовлении редукторов и механических валов. При синтезе привода продольного движения учитывается только первая собственная частота упругих колебаний портала, поскольку колебания именно этой частоты оказывают основное влияние на точность работы РТР (такой вывод сделан из анализа результатов экспериментальных исследований РТР ПКЦВ). При данных допущениях математическая модель механической части привода продольного движения представляет собой модель трехмассового упругого объекта управления. Экспериментальные исследования РТР ПКЦВ показали, что упругие свойства механической передачи не оказывают существенного влияния на динамику привода поперечного движения, поэтому упругость нагрузки при синтезе привода поперечного движения пренебрегаем.

Для достижения высокой точности обработки плоских деталей необходимо обеспечить идентичность динамических свойств приводов обеих координат. Предлагается сначала выполнить синтез привода продольного движения, обеспечив демпфирование упругих колебаний нагрузки, а затем синтезировать привод поперечного движения, стремясь достигнуть идентичности свойств приводов обеих координат.

В приводах РТР используется принцип комбинированного управления, применение которого позволяет существенно повысить точность работы без изменения запасов устойчивости. В работе предложено проводить синтез такого привода, обеспечивая требуемые запасы устойчивости без учета компенсирующей связи по первой производной от управляющего воздействия, а о точности комбинированной системы управления судить, используя полученную передаточную функции разомкнутой эквивалентной системы.

Для синтеза привода продольного движения с трехмассовым упругим объектом управления предложена следующая двухступенчатая методика синтеза. Сначала производится синтез системы управления движением вала двигателя, при этом следует обеспечить по возможности большее значение частоты среза разомкнутого контура положения, причем на движение вала двигателя не должны оказывать влияния упругие свойства объекта управления. Затем выполняется синтез дополнительных параллельных корректирующих устройств, обеспечивающих демпфирование упругих колебаний объекта управления. В результате синтеза привода продольного движения РТР ПКЦВ с транзисторным усилителем мощности, ПИ-регуляторами в контурах скорости и положения и П-регулятором в контуре тока по предложенной методике показана необходимость использования дополнительной гибкой корректирующей связи по ускорению центральной точки портала. Сигнал с датчика ускорения, преобразованный активным фильтром изохромного типа (ПИ-регулятор), должен быть заведен на вход регулятора скорости. При использовании подобной дополнительной отрицательной обратной связи удалось задемпфировать упругие колебания портала.

Для того, чтобы обеспечить идентичность динамических свойств приводов обеих координат РТР будем стремиться приблизить разомкнутую логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) привода поперечного движения $Lm W_y(j\omega)$ к эквивалентной разомкнутой скорректированной ЛАЧХ привода продольного движения $Lm W_x(j\omega)$. В низкочастотной и среднечастотной областях достаточно обеспечить равенство коэффициентов усиления разомкнутых передаточных функций и постоянных времени ПИ-регуляторов в контуре положения обоих

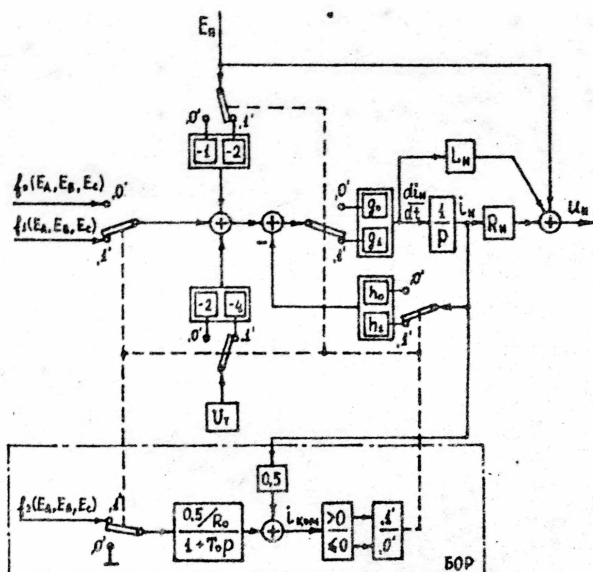
приводов. Для достижения близости ЛАЧХ в высокочастотной области необходимо провести численными методами параметрический синтез при минимизации критерия:

$$J = \int_{\omega_a - \omega_c}^{\omega_a} (LmW_x(j\omega) - LmW_y(j\omega))^2 d\omega,$$

где ω_a - частота среза разомкнутого привода продольного движения; ω_c - частота в высокочастотной области, до которой обеспечивается близость ЛАЧХ обоих приводов.

Найден диапазон изменения значений коэффициентов усиления компенсирующей связи по первой производной от управляющего воздействия для обоих приводов, обеспечивающий величину выбега при прохождении изломов контура, которая не превосходит допустимую ошибку.

В четвертой главе рассмотрены вопросы автоматизации синтеза системы приводов РТР. Во всех осуществляющих РТР в качестве усилителей мощности (УМ) используются управляемые тиристорные преобразователи (УТП) с отдельным управлением силовыми комплектами. Динамические особенности этого типа усилителя мощности таковы, что постоянная времени разгона системы УТП-двигатель постоянного тока (ДПТ) меняется в весьма широких пределах (от сотых долей секунды при больших входных сигналах до единиц секунд - при малых). Для того, чтобы иметь возможность проводить исследования систем приводов с такими УМ, была построена имитационная модель тиристорного преобразователя при работе на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС (рис.2). Выбор коэффициентов модели зависит от положения двухпозиционных ключей. Управление ключами осуществляется блоком определения режима работы преобразователя (БОР), в котором анализируется значение тока коммутации ($i_{ком}$): если $i_{ком} > 0$ - режим коммутации, и все ключи в положении "1"; если $i_{ком} < 0$ - рабочий режим, и все ключи в положении "0". Проведенное сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований показало, что построенная модель описывает процесс, происходящий в реальном УТП с ошибкой, не превышающей 5%. Для проведения синтеза корректирующих устройств построена упрощенная непрерывная модель системы УТП-ДПТ, передаточная функция которой может быть представлена следу-



E_A, E_B, E_C - фазные ЭДС; $g_o = (2L_o + L_n)^{-1}$; $g_u = (3L_o + 2L_n)^{-1}$;
 $h_o = 2R_o + R_n$; $h_u = 3R_o + 2R_n$; R_n, L_n - активное
 сопротивление и индуктивность нагрузки; E_n - проти-
 во-ЭДС; R_o, L_o - активное сопротивление и индук-
 тивность цепи фазной ЭДС (трансформатора); $T_o = \frac{L_o}{R_o}$.

Рис.2. Структурная схема математической модели
 силовой части УТП, работающего на активно-
 индуктивную нагрузку с противо-ЭДС.

шим образом:

$$W_{y-A}(p) = \frac{\omega_y(p)}{u_{BX}(p)} = \frac{K_y/K_{\omega}}{1 + T_n(u_{BX})p + T_n(u_{BX})T_p p^2},$$

где $\omega_y(p)$ - изображение угловой скорости вала ДПТ; $u_{BX}(p)$ - изображение входного напряжения УТП; $T_n(u_{BX}) = \frac{J_0}{K_n K_{\omega}} R_q(u_{BX})$.
Остальные обозначения являются традиционными при описании динамики ДПТ. Зависимость активного сопротивления силовой цепи системы УТП-ДПТ R_q от уровня входного напряжения УТП u_{BX} может быть экстраполирована следующим образом:

$$R_q(u_{BX}) = (b_0 + b_1 |u_{BX}| + b_2 u_{BX}^2)^{-1},$$

причем коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 определяются при помощи численных методов идентификации при использовании имитационной модели УТП.

Для автоматизации процедур анализа и синтеза системы приводов РТР разработан комплекс прикладных программ (МОДС-РТР), позволяющий выполнять моделирование, многовариантный анализ, параметрическую оптимизацию, частотный анализ системы управления движением РТР.

В результате проведенных исследований предложена следующая методика автоматизированного синтеза системы приводов РТР при учете упругости несущей конструкции:

1. По результатам статического эксперимента рассчитать обобщенные параметры статической модели портала при помощи разработанной программы **ASNI**.
2. Экспериментально определить параметры механических передач и коэффициенты демпфирования свободных колебаний портала.
3. При помощи пакета МОДС-РТР рассчитать коэффициент жесткости портала при разделении эквивалентной балки модели портала на два пролета по методу осредоточенных масс.
4. По методике, изложенной в третьей главе, провести синтез привода продольного движения для линеаризованной модели. Построение точных частотных характеристик для определения запасов устойчивости синтезированной системы и ее внутренних контуров выполнить при помощи пакета программ ПАЛС, разработанного в МГТУ им. Н.Э.Баумана.
5. Синтез привода поперечного движения провести из условия

обеспечения близости разомкнутых частотных характеристик приводов обеих координат (ПАЛС).

6. Провести моделирование нелинейной системы управления движением РТР при обработке типовых участков контуров (МОДС-РТР). Модель системы должна учитывать все основные нелинейности: ограничения фазовых координат, квантование по времени сигнала главной обратной связи, нелинейность усилителя мощности и т.д.
7. Если получившаяся система управления не удовлетворяет требованиям по точности, необходимо выполнить параметрическую оптимизацию нелинейной системы при помощи пакета МОДС-РТР.

По представленной методике был выполнен синтез системы приводов РТР ПКЦВ с УТП в качестве УМ. Результаты исследования полученной системы управления показали, что она обеспечивает требуемую точность при обработке типовых участков контуров. По сравнению со штатной системой при обходе излома контура удалось уменьшить величину выбега $\approx$ в 1,5 раза, обеспечив при этом более высокое качество поверхности реза (в синтезированной системе ошибка имеет плавный характер с единственным перебогом через ноль, а в штатной - колебательный, что и приводит к увеличению шероховатости поверхности реза).

Таким образом, предлагаемая методика синтеза системы приводов РТР при учете упругости несущей конструкции показала свою эффективность и может быть успешно использована при проектировании систем управления движением порталных роботов с упругими несущими конструкциями.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе проведенных исследований получены следующие основные научно-технические результаты:

1. Построена статическая модель рамы портала РТР в направлении продольного движения. В этой модели каретки приняты за абсолютно жесткие тела. Рама портала заменена на эквивалентную балку с постоянной по длине жесткостью на изгиб и распределенной массой, а также пружиной, синхро-

- низирующей повороты кареток. Каретки жестко присоединены к эквивалентной балке. Повороту кареток препятствуют пружины, обладающие крутильной жесткостью.
2. При помощи метода осредоточенных масс выполнен переход от непрерывной модели рамы портала к дискретной модели. Построена система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая упругие колебания несущей конструкции РТР в направлении продольного движения, причем выражения для матриц податливости при двух способах закрепления кареток получены аналитически.
 3. Построены математические модели динамики механической системы РТР для двухсторонних механического и электро-механического приводов портала, которые кроме особенностей механических передач учитывают также и упругие свойства несущей конструкции робота.
 4. Создана имитационная математическая модель управляемого тиристорного преобразователя (УТП) с отдельным управлением силовыми комплектами, она учитывает практически все динамические особенности УТП при работе на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС.
 5. Разработана инженерная методика автоматизированного синтеза системы приводов РТР при учете упругости несущей конструкции и упругих свойств механических передач.
 6. Разработано прикладное программное обеспечение для автоматизации решения задач анализа и синтеза систем приводов РТР.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Смирнов Е.Д. Математическая модель движения portalного робота//Управление в гибких производственных системах и робототехнических комплексах: Межвуз. сб. науч. тр. - М.: МИРЭА, 1988. - С.74-78.
2. Орлов В.Б., Смирнов Е.Д. Подсистема автоматизированного проектирования роботов термической резки//Автоматизация проектирования и программирования роботов и ГПС. - М.: Наука, 1988. - С.93-100.
3. Орлов В.Б., Смирнов Е.Д. Разработка программного обес-

печения САПР систем управления роботов термической резки (модель следящего привода)//Интенсификация автогенной обработки, термической резки и напыления.- Балашиха, М.о., 1988.- С.41-49.

4. Смирнов Е.Д. Математическая модель портального робота// Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Межвуз.сб.науч.тр.- М.: МИП, 1989.- С.38-41.
5. Разработка САПР систем управления роботами (машинами) термической резки/ В.Б.Орлов, А.И.Максимов, Е.Д.Смирнов и др.//Опыт разработки и внедрения САПР объектов химического и нефтяного машиностроения: Тезисы докладов отраслевого научно-технич.семинара.- М., 1988.- С.36-37.

