

11441157

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

ХОРУЖЕНКО Владимир Михайлович

УДК 621.865.8-113:621.757

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ
ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ С СИНТЕЗОМ ПЛАНОВ
МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА В ЦЕЛЕВОМ ПРОСТРАНСТВЕ
СОСТОЯНИЙ /НА ПРИМЕРЕ СБОРКИ КАРДАННЫХ ШАРНИРОВ
ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ/

Специальности: 05.13.07 - Автоматизация технологичес-
ких процессов и производств
/машиностроение/

05.13.12 - Системы автоматизации проек-
тирования /машиностроение/

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 1990

Работа выполнена во Всесоюзном ордена Трудового Красного
Знамени Заочном Политехническом Институте
Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Капустин Н.М.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Лохин В.М.

– кандидат технических наук, старший
научный сотрудник Кузнецов П.М.

Ведущее предприятие – Научно-производственное объединение
технологии автомобильной промышленности
НПО "НИИТавтопром"

Защита диссертации состоится "7" мая 1990 г. на
заседании специализированного Совета К 053.15.01 в Московском
государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по ад-
ресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный
печатью, просим направить по указанному адресу.

Храниться в библиотеке МГТУ им.

ите должны заблаговременно
ванных организаций на имя

сфл 1990 г.

В.Т.Рябов

каз № 263

Ротапринт МГТУ

М 491151

Актуальность проблемы. В решениях XXVI съезда КПСС и на I-ом Всесоюзном съезде технологов-машиностроителей (Москва, ноябрь, 1989) отмечалось, что одним из главных направлений по ускорению научно-технического прогресса является комплексная автоматизация технологических процессов (ТП) на основе применения высокопроизводительного оборудования. В этих целях ускорить создание гибких автоматизированных производств и систем автоматизированного проектирования. Особое значение в этой связи придается повышению уровня автоматизации сборочных операций.

Сборочные работы (СР) становятся основным элементом гибкости производства благодаря возможности их перепрограммирования, предоставляемой системами управления (СУ) на микропроцессорах. Успехи в создании математического и программного обеспечения систем автоматизированного проектирования позволили разрабатывать высокоэффективные автоматизированные методы и алгоритмы подготовки управляющих программ (УП) в роботизированных сборочных комплексах (РСК) вместо применявшихся ранее методов ручной подготовки УП, которые более трудоемки и подвержены значительному влиянию на их эффективность субъективного фактора.

По мере увеличения парка СР, применяемых в промышленности, задача разработки универсальных алгоритмов и методов автоматизированной подготовки УП на базе систем автоматизированного программирования (САП), отвечающих оптимальным, научно обоснованным решениям на более ранних этапах проектирования операции и разработки проекта РСК становится необычайно актуальной поскольку УП является завершающим элементом проектирования, от качества которого зависит степень совершенства всей разработки.

Оптимизация на уровнях модели движения СР и логики управления УП на основе подхода к разработке УП как сложной системе позволяет существенно улучшить эффективность УП и вместе с ней производительность всей сборочной операции. Поэтому весьма актуальной является научная задача повышения эффективности математического и программного обеспечения при параметрической оптимизации УП.

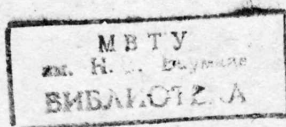
I

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1491151

Хоруженко В. М. Автоматизаци



Возможности по логическому анализу ситуаций, возникающих в процессе работы алгоритма сборочной операции, языковыми средствами СУ на микропроцессорах позволяют вводить оперативную корректировку параметров УП, повышают степень адаптации УП к реальному ТП и надежность работы программного обеспечения, а параметрическая оптимизация элементов УП уменьшает время цикла роботизированной операции.

К настоящему времени накоплен богатый теоретический и практический опыт по различным автоматизированным методам подготовки элементов структуры УП для промышленных роботов, выполняющих транспортные операции, и закономерностям построения САП станков с ЧПУ.

Нерешенными остаются задачи, связанные с обоснованным выбором степени гибкости (сложности роботизации) заданного рабочего места на основе формального анализа существующего ТП, вопросы структурной оптимизации алгоритмов работы РСК, определяющих общую структуру УП СР, вопросы разработки алгоритмов автоматизированного синтеза модели движения СР на фазе соединения деталей и оптимизации параметров элементов УП.

Цель работы и основные задачи исследования. Целью диссертации является разработка метода автоматизированной подготовки УП с оптимизацией структуры и параметров УП антропоморфных роботов, уменьшающего время цикла сборочной операции и трудоемкость подготовки УП.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1. Разработана методика многоуровневой автоматизации подготовки УП для СР антропоморфной кинематической структуры с системой программирования на языке высокого уровня.

2. Разработана методика синтеза планов модели движения антропоморфного СР на фазе соединения деталей.

3. Разработаны модели обслуживания СР внешнего технологического оборудования РСК.

4. Разработаны средства автоматизированного анализа возможности СР антропоморфной кинематической структуры для автоматизации заданного сборочного рабочего места.

5. Сформулирована и экспериментально подтверждена гипотеза о возможности планирования неопределенности внешней технологической среды планированием управления сборочной операцией робот-

венно логическими и программными средствами с применением простейших датчиков состояния технологической системы (ТС).

6. Разработан программно-аппаратный комплекс подготовки УП.

Методы исследований. Исследование проводилось на основе комплексного подхода к решению поставленных проблем. Разработка метода и алгоритмов автоматизированной подготовки УП СР осуществлялась на основе теорий сложных систем, математического моделирования, функциональных схем, методов принятия решений, теории графов, теории матриц, элементов эвристического программирования, теории массового обслуживания, методов дискретной математики, а также принципов и методов разработки программного обеспечения САП и теории технологического проектирования. Исследования эффективности разработанных алгоритмов и программы осуществлялось с помощью вычислительных экспериментов, а достоверность разработанных моделей проверялась на реальном РСК по сборке карданного шарнира рулевой колонки автомобиля "Москвич-2141".

Научная новизна. В диссертации предложена эмпирическая зависимость для определения манипуляционной гибкости операции сборки и области оптимальности применения СР с антропоморфной кинематической структурой для автоматизации анализа технологического процесса и программирования сложных контурных траекторий соединения деталей, выдвинута гипотеза о возможности парирования неопределенности технологической среды планированием управления сборочной операцией собственно логическими и программными средствами с применением простейших датчиков состояния ТС; предложены: функциональные зависимости между оптимальными параметрами модели движения антропоморфного робота на фазах операции сборки и переменной интенсивности операции; теоретически доказана и практически проверена возможность автоматизированного анализа логической части УП СР на основе определения вычислимости ее фрагментов в ограниченном логическом базисе.

Получены новые существенные научные результаты:

1. Методика автоматизированной подготовки УП для роботизированной сборки, основанная на многоуровневом подходе, включающего в себя автоматизированный анализ ТП сборки и правильности управления операцией.

2. Методика синтеза планов модели движения антропоморфного СР на фазе соединения деталей с использованием эвристических правил и оптимизацией параметров модели движения по критерию плавности в целевом пространстве состояний робота.

3. Детерминированная и стохастическая модели обслуживания СР внешнего технологического оборудования в комплексе.

Все вышесказанное определяет научную новизну диссертации.

Практическая ценность работы заключается в разработке подсистемы автоматизированного анализа процесса сборки на основе микроэлементов движения, позволившего до начала эскизного проектирования РСК сформулировать требования к операции, СР и технологическому оборудованию, а реализации метода анализа и модификации алгоритмов работы РСК позволила еще на стадии проектирования операции оптимизировать структуру УП. Разработанная автоматизированная подсистема анализа логики управления операцией на уровне представления задачи управления на стадии подготовки УП позволила избежать конфликтов и тупиковых ситуаций до ее отладки на реальном оборудовании и в процессе работы. Разработка УП автоматизированным методом позволила улучшить структуру и параметры подготавливаемых УП для СР, сократить трудоемкость подготовки УП.

Уменьшилось время цикла роботизированной сборочной операции за счет оптимизации структуры и параметров УП. Оптимизация структуры и параметров УП СР позволила снизить процент брака на операции.

Реализация результатов работы. Разработанный метод и результаты работы нашли применение на автомобильном заводе им. Ленинского комсомола АЗЛК (П/О "Москвич") при проектировании и эксплуатации комплекса по сборке карданного шарнира рулевой колонки автомобиля "Москвич-2141" роботом РМ-01 ("Пума-560") в подсистеме подготовки УП СР. Реальный годовой экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составил 3480 рублей. Внедрение подтверждено соответствующим актом. Кроме того, методы и алгоритмы оптимизации использованы, а основные положения работы включены в учебный курс и лабораторный практикум кафедры "Автоматизация производства и проектирования в машиностроении" Всесоюзного заочного политехнического института (ВЗПИ).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной ра-

боты докладывались автором и обсуждались на:

Семинарах, заседаниях кафедры "Автоматизация производства и проектирования в машиностроении" ВЭИ; XXXI научно-технической конференции Всесоюзного политехнического института, г. Москва, 1988г.; Всесоюзной научно-технической конференции "Конструкторско-технологическая информатика. Автоматизированное создание машин и технологий", г.Москва, Мосстанкин, 1989г.; XXII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов НПО "НИИТавтопром", г.Москва, 1989г.; научно-практической конференции "Автоматизация машиностроительного производства на основе применения промышленных роботов и роботизированных технологических комплексов (программа "Прогресс-95)", г.Москва, 1989г.; Всесоюзной научно-технической конференции "Интегрированные системы автоматизированного проектирования", г.Вологда, 1989г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 4 печатные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 150 страницах машинописного текста, иллюстрируется рисунками и таблицами на 62 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 108 наименований и приложений.

Основные положения, представляемые к защите:

- Методика автоматизированной подготовки УП для роботизированной сборки, основанная на многоуровневом подходе.
- Методика синтеза планов модели движения антропоморфного сборочного робота на фазе соединения собираемых деталей.
- Детерминированная и стохастическая модели операции обслуживания сборочным роботом внешнего технологического оборудования в РСК.

Работа выполнена в отделе и лаборатории Управления Главного Конструктора по станкостроению и технологической оснастке Ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени автомобильного завода имени Ленинского комсомола Производственного объединения "Москвич" и на кафедре "Автоматизация производства и проектирования в машиностроении" Ордена Трудового Красного Знамени Всесоюзного Политехнического института.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен обзор публикаций по ранее выпол-

ненным исследованиям, дается описание конкретных реализаций по ручным и полуавтоматизированным методам подготовки УП для СР.

Отмечается, что известные методы подготовки УП для роботов очень трудоемки, особенно, метод обучения, носят субъективный характер, определяющий степень эффективности разрабатываемого прикладного программного обеспечения выполняемой роботом операции. К факторам, определяющим субъективность относятся: квалификация разработчика программы, являющейся частью всего программного обеспечения комплекса, состояние программиста-технолога в момент ввода элементов УП в СУ, состояние пульта управления и пульта программирования, особенности системы программирования.

По мере усложнения задач, решаемых СР с антропоморфной кинематической структурой и микропроцессорными системами управления, ручные методы подготовки УП становятся все более сдерживающим фактором расширения технологических возможностей этого типа оборудования. Возможным методом преодоления этих недостатков является автоматизация подготовки УП на базе имитационного моделирования операции и автоматизированным формированием файла данных по УП в системе программирования робота. Таким образом, для получения оптимальных УП автоматизированным методом необходим многоуровневый подход к проектированию операции роботизированной сборки. Для автоматизации процесса программирования УП необходима формализация данных по УП на уровне общей структуры программы, определяемых результатами автоматизированного анализа существующего ТП сборки, технологической структурой и компоновкой РСК; на уровне разработки общих алгоритмов взаимодействия СР с внешним технологическим оборудованием; на уровне анализа и представления логики управления операцией; на уровне модели обслуживания СР внешнего технологического оборудования; на уровне модели движения СР на фазах технологической операции и оптимизации параметров движения. Результаты анализа специфики соединений класса карданных шарниров со сложными контурными траекториями соединения деталей, типа вилки и крестовины обусловили необходимость разработки новых методов проектирования роботизированной операции с целью автоматизации процесса подготовки УП для СР антропоморфной кинематической структуры. В результате выполненного анализа существующих методов подготовки УП и

постановки цели исследования сформулированы основные задачи (см. стр.2).

Во второй главе разработана методика моделирования операции роботизированной сборки. Первым этапом в разработке такой методики является разработка метода автоматизированного анализа существующего ТП сборки с целью применения на данной операции антропоморфного СР с 6-ю степенями подвижности и СУ на микропроцессоре. Для проведения такого анализа разработан язык описания микроэлементов движения при выполнении операции, с помощью которого удалось описать все движения для рассматриваемого класса соединений. Каждый микроэлемент характеризуется временем его выполнения и позволяет определить обобщенную характеристику сложности реализации операции роботом. Для количественного анализа технологического процесса сформулированы коэффициенты: неопределенности технологической среды, неопределенности технологического процесса, частоты изменения различных типов движения, критической точности, критического времени позиционирования при выполнении операции. Фактическое сочетание значений этих коэффициентов для конкретной операции позволяет осуществить автоматизированный выбор СР и его СУ.

Для этого любое перемещение детали в рабочем пространстве состояний представляется в виде отдельных движений манипулирования. Каждый элемент движения характеризуется несколькими параметрами со своим кодом и весом. Действие с объектом в процессе выполнения операции выражается зависимостью:

$$G = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n G_i W_i \right)$$

где n — количество элементов манипулирования, G_i — характеристика i -го элемента манипулирования, W_i — вес i -й характеристики.

Проведен анализ факторов, влияющих на решение задачи получения оптимального маршрута обслуживания СР внешнего технологического оборудования РСК. Для этого разработаны детерминированная модель операции, для которой определена циклическая последовательность обслуживания в соответствии с последовательностью выполнения технологической операции, и стохастическая, параметры которой являются случайными величинами.

Каждая единица технологического оборудования характеризуется двумя параметрами:

время обслуживания t_{oj} , $j = \overline{1, n}$

где n — количество обслуживаемых единиц технологического оборудования РК;

технологически обусловленное время t_{pi} , $i = \overline{1, n}$

Если обозначить время, в течение которого СР занят с i -ой единицей технологического оборудования Δt_i :

$$\Delta t_i = t_{ni} + t_{oi} \quad (I)$$

где t_{ni} — время простоя СР с i -ой единицей технологического оборудования, то время цикла одного обслуживания T_u^0 :

$$T_u^0 = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (2)$$

Время простоя СР у i -ой единицы технологического оборудования равно:

$$t_{ni} = \max \left(0, t_{pi} - \sum_{j=1}^n \Delta t_j \right) \quad (3)$$

Подставляя Δt_j из уравнения (I), получаем следующую систему нелинейных уравнений для t_{ni} :

$$t_{ni} = \max \left(0, t_{pi} - \sum_{j=1}^n t_{oj} - \sum_{j=1}^n t_{nj} \right) \quad (4)$$

Рассмотрены два случая операции:

Случай 1: для всех единиц технологического оборудования

$$t_{pi} \leq \sum_{j=1}^n t_{oj} \quad \text{или} \quad t_{pi} + t_{oi} \leq \sum_{j=1}^n t_{oj} \quad (5)$$

Случай 2: хотя бы для одной i -ой единицы технологического оборудования $t_{pi} > \sum_{j=1}^n t_{oj}$ или $t_{pi} + t_{oi} > \sum_{j=1}^n t_{oj}$ (6)

Для случая 1, подставляя (5) в (4) следует:

$$t_{ni} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

т.е. СР при выполнении операции не простаивает. Время выполнения операции обслуживания равно:

$$T_u^0 = \sum_{i=1}^n t_{oi} \quad (8)$$

Для случая 2 обозначим: $d = \max(t_{pi} - \sum_{j=1}^n t_{oj})$ (9)

и этот максимум достигается для $i = i_0$. Решение (4) в этом случае имеет вид:

$$t_{ni} = \begin{cases} d, & \text{при } i = i_0 \\ 0, & \text{при } i \neq i_0 \end{cases} \quad (10)$$

Тогда выражение для времени цикла обслуживания имеет вид:

$$T_u^0 = \sum_{i=1}^n t_{oi} + d \quad (II)$$

В результате анализа разработанных моделей операции в рамках принятых допущений получены аналитические зависимости между параметрами модели движения СР на фазах операции от переменной интенсивности операции. Оптимизация компоновки РСК по критерию минимума простоя СР в цикле обслуживания внешнего технологического оборудования отвечает задаче подготовки оптимальной структуры и параметров УП СР, т.к. в этом случае УП для системы управления СР становится программой управления работой всего РСК.

В третьей главе рассматривается разработка общесистемной модели роботизированной сборочной операции. Отмечается, что правила взаимодействия СР с внешней технологической средой должны обеспечить необходимое отражение практически значимой области операционной обстановки на фазовое пространство состояний системы управления СР. Прямое решение этой проблемы заключается в создании СР, работающих с точностью выше уровня требуемой дискретности описания операционной обстановки, т.е. в придании детерминизма СР на аппаратном уровне.

Однако такой путь не всегда возможен в виду недетерминизма реакции внешней технологической среды на действия СР. В то же время использование управляющей ЭВМ на микропроцессорах по обработке логических условий позволяет в ряде случаев получить детерминированную систему алгоритмическим путем.

Алгоритмическое обеспечение СУ СР представляет собой многоуровневую систему алгоритмов обработки данных: технический уровень – драйверы устройств, предметный уровень алгоритмы обработки сигналов с датчиков и алгоритмы построения движений, процедурный уровень – алгоритмы мониторов системы программирования, системный уровень – операционная система, программируемый контроллер, уровень обучения – языки программирования и алгоритмы обучения СР.

Задача алгоритмической детерминизации работы системы управления заключается в определении места алгоритмов детерминизации в системе уровней. Локализация этих алгоритмов является наиболее желательной на уровне драйверов устройств. Структура логической части УП формируется на предметном уровне. Именно поэтому автоматизация процесса подготовки логической части УП предусматривает разработку модели взаимодействия СР с внешним технологическим оборудованием в пространстве состояний системы "СР-внешняя

технологическая среда". Такая модель построена по иерархическому принципу. Для взаимодействия СУ СР с управляющей ЭВМ рассмотрены два варианта распределения функций управления. Внешняя ЭВМ производит опрос состояния СР и выдает в СУ СР управляющие сигналы и другая стратегия: для текущего положения управляющая ЭВМ передает СР конечную цель операции и параметры этой цели. После чего СР перемещается по своей УП, взаимодействуя с внешней технологической средой через систему датчиков. Уровень цели соответствует тому языку, на котором записана УП. По этой цели строится модель генерируемых решений. Каждое такое принятое решение должно быть эффективным.

Число элементов системы принято конечным, пропорциональным числу операций и равным N . Минимальное число связей — $N-1$. Все связи определены структурой $\|g_{zs}\|$, где

$$g_{zs} = g(t)$$

$$g_{zs} \in (1,0)$$

Если обозначить: n_i — число входов системы, m_i — число выходов системы, t — дискреты функционирования системы, то векторами $X = (x_1, \dots, x_n)$, $Y = (y_1, \dots, y_m)$ можно определить зависимости выходов системы от входов в заданные дискреты времени,

где

$$x_i \in (1,0) \quad X = GY$$

$$y_i \in (1,0) \quad Y = PX$$

где P и G — операторы преобразования, определяющие поведение системы, реализуемое алгоритмами операции, либо функциями.

Поскольку для рассматриваемых нами систем входы-выходы одного состояния не могут быть связаны непосредственно, то все связи системы представляются матрицами размерности N с субматрицами G_{zs} .

$$X_i^{(s)} = G_{zs} P_z (X^{(z)})$$

$$X = T_{zs} (X^{(z)})$$

$$Y_i^{(s)} = R_{zs} (Y^{(z)}),$$

где $T_{zs} = G_{zs} P_z$ и $R_{zs} = P_s G_{zs}$, $g, z = \overline{1, N}$

Вектор-столбцы левой части равенств определяют состояние входов и выходов в результате изменения системы.

Сформулированы понятия эффективности алгоритма из $\{P\}$ и показателя эффективности алгоритма логической части УП. Введены правила для автоматизации принятия решения по эффективности

алгоритма УП для сложной системы в пространстве состояний:

1. $\forall S \exists \varphi: \varphi[(G_i, Q_j) \rightarrow z]$, где φ — оператор отображения точка в пространстве состояний системы неотделимая от другой

2. $\forall S \exists \angle(z): z_1 > z_2 > \dots > z_i$

где $z_i \in R$ и $\angle$ — упорядочивающее правило

3. $\exists \mu(z): a) \mu(z_i) \geq 0$, б) $\mu(z) = \sum \mu(z_i)$,

где $\forall z: z = \bigcup z_i$ и $\mu(z)$ — определяется как мера предпочтительности, S — сложная система, $\{G_i\}$ — множество состояний системы, $\{Q_j\}$ — множество воздействующих ситуаций на систему, $\{R_i\}$ — множество реакций системы.

Для повышения гибкости модели, ее способности к модификации проведена декомпозиция алгоритмов на предметном уровне. Сформулированы правила модификации структуры алгоритма операторами: обменять, исключить, добавить, выполнить. Модификация выполняется по правилам исчисления предикатов I-го порядка с унарной операцией: А жди выполнения Б, либо жди период времени. Упорядочивающее правило в этом случае имеет вид: для G_j при Q_j , выполнить R_j . Мера предпочтительности имеет вид: если $X^i, \dots$, тогда $Y^i, \dots$.

Вводится проблематика последовательного подхода к представлениям функциональных требований логической части УП на уровне обучения и языковой поддержки. Выделено три основных группы представлений в задаче автоматизации представления логической части УП: представления, связанные с функциональными требованиями, которые должна осуществлять СУ. Эти представления характеризуют поведение управляемых частей перед поступлением рабочей информации от оператора СУ или других управляющих частей; представления, связанные с операционными требованиями, соответствующими эксплуатационным данным системы управления, требованиями к надежности, безаварийности, удобству технического обслуживания и диалогу "человек-пульт системы управления"; представления, связанные с технологическими требованиями по управляющей части. Каждую из этих групп можно представить с несколькими последовательными уровнями детализации при этом действие управляющей части может быть описано с большей или меньшей степенью детализации, причем начинаться с "макропредставления" с дальнейшей постепенной детализацией, где учитываются все элементы действия и виды информации.

Вводится определение формальной системы представления логики управления ТП и ее аксиоматика. Процесс представления в динамике предполагается фрагментарным, т.е. каждый новый фрагмент описания логики управления процесса рассматривается как основа для формулирования теорем представления. В рамках формальной логической системы правильность фрагмента представления определяется как доказательство теорем представления, формируемых на основе анализа фрагмента представления. Формальная система представления логики управления операции построена на основе логики предикатов I-го порядка. Под правильностью фрагмента представления понимается его вычислимость, т.е. возможность построения такого плана вычислений, при котором все переменные схемы управления однозначно вычислимы. План вычислений — это последовательность операторов отображений, реализующих отношения в соответствии с их аксиомами вычислимости. Аксиомы вычислимости отношений выступают в роли собственных аксиом формальной логической системы представления.

Отношения характеризуются порогом вычислимости h , понимаемым как число минимально задаваемых переменных схемы управления, при которых отношение вычислимо. При этом остановка алгоритма анализа вычислимости возможна в 2-х случаях: а) $\rho < h$ и б) $\rho > h$, где ρ — число вычисленных переменных из числа, связанных отношением A . В случае а) недоопределенное отношение будет ожидать наступления момента, когда ρ станет равным h . В случае б) необходимо поискать обходной путь на графе, при котором неопределенность отношения не возникает, либо перестроить схему логики управления операцией. В этом смысле весьма важной представляется задача о вычислимости фрагмента схемы управления чисто логическими методами. Исходную задачу автоматизированного анализа логики управления операцией, представленной в УП, удалось описать на уровне исчисления логических высказываний, в рамках которого применение метода резолюций оказалось наиболее эффективно.

Рассмотрены примеры доказательств теорем представления на графах опровержений. Приведены некоторые, часто встречающиеся теоремы представления, истинность которых доказана в процессе проведения исследования. Теоремы представления позволили свести процесс доказательства правильности фрагмента схемы управления операцией к процессу его представления как суперпозиции

12

теорем представления. Разработанный метод получил свое практическое применение при разработке подсистемы анализа логической части УП СР.

Четвертая глава посвящена разработке автоматизированного метода подготовки модели движения СР на фазе соединения деталей как части УП СР. Отмечено отсутствие эффективных алгоритмов автоматизированного синтеза модели движения при соединении деталей по контурным траекториям. Метод решения задачи автоматизированной подготовки УП представляет собой трехуровневый комплекс, состоящий из генератора множества опорных точек траектории движения СР на фазе соединения деталей, генератора планов модели движения и анализатора оптимальности выхода в целевую точку. Метод состоит из следующих этапов:

- синтеза множества опорных точек траектории движения СР на фазе соединения деталей в пространстве состояний СР;
- оптимизации модели движения СР на фазе соединения;
- преобразование данных по модели движения СР в систему команд языка программирования УП конкретной СУ СР в виде символических цепочек;
- коррекции данных по модели движения в УП с помощью коэффициентов масштабирования языка реализации УП.

Основная идея метода состоит в том, что в системе геометрического моделирования создаются модели собираемых деталей в собранном состоянии и моделируется разборка деталей в заданную точку начала фазы соединения деталей пространства состояний СР. При этом, неподвижная деталь и подвижная деталь представляют из себя "твердые" трехмерные тела, т.е. сама неподвижная деталь, подвижная деталь в захвате робота и захват являются ограничениями на возможные движения захвата с деталью из собранного состояния в пространстве состояний СР. В начальном собранном состоянии деталей задается начальный вектор состояния СР с ориентацией захвата, исходя из особенностей и условий выполнения соединения. Описан алгоритм разборки собранного соединения с использованием эвристических правил выбора следующей точки и обхода препятствия, т.е. ограничений на выполнение движения роботом с помощью управления переменными состояния СР в каждой разрешенной точке пространства состояний СР. Указываются условия останова алгоритма, его модификации, определено доказательство услов-

ной сходимости алгоритма в фазовом пространстве параметров координат манипулятора СР. В качестве целевой функции для оптимизации модели движения СР выбрана плавность на фазе соединения деталей, т.к. известные критерии оптимизации параметров движения робота, основанные на минимизации времени выполнения движения представляются менее эффективными в этом случае из-за необходимости обеспечения надежного завершения фазы соединения. Задание значения скорости в начальной точке фазы соединения позволяет по значению положения и скорости в предыдущей опорной точке траектории движения СР пространства состояний СР определить значения скорости и ускорения в текущей точке.

Проведенный анализ предложенного алгоритма и результаты моделирования на ЭВМ подтвердили эффективность алгоритма по сравнению с известными алгоритмами. Сформулированы требования к программно-аппаратному комплексу для реализации метода.

В пятой главе рассматривается реализация разработанного метода и прикладные задачи, связанные с этим. Дано описание разработанного информационного и программно-технического обеспечения подсистемы автоматизированной подготовки УП для СР антропоморфной кинематической структуры, реализованного в промышленности. Приведены области эффективного использования подсистемы автоматизированной подготовки УП по сравнению с ручными методами и области допустимых параметров модели движения СР на сборочной операции.

Метод реализован при проектировании РСК по сборке карданного шарнира легкового автомобиля и подготовке УП для СР РМ-ОИ с микропроцессорной системой управления и системой программирования на языке высокого уровня. СР выполняет в РСК все операции по обслуживанию технологического оборудования и часть технологической операции, алгоритмы работы комплекса были оптимизированы по разработанной методике. В результате производительность сборочной системы увеличилась на 20% и уменьшилось время простоя СР.

Реальный годовой экономический эффект от внедрения подсистемы автоматизированной подготовки УП для СР антропоморфной кинематической структуры с микропроцессорной системой управления СР и системой программирования на языке высокого уровня на Производственном Объединении "Москвич" составил 3500 рублей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результатами выполненных исследований являются:

1. Методика автоматизированной подготовки управляющих программ для роботизированной сборки, основанная на многоуровневом подходе.

2. Методика синтеза планов модели движения антропоморфного сборочного робота на фазе соединения деталей.

3. Детерминированная и стохастическая модели операции обслуживания сборочным роботом внешнего технологического оборудования в роботизированном сборочном комплексе.

4. Программно-аппаратный комплекс, реализующий предложенный метод и алгоритмы в подсистеме автоматического программирования роботов антропоморфной кинематической структуры.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Одним из путей повышения производительности и стабильности процесса сборки роботами следует считать оптимизацию процесса программирования операции, проводимую на следующих уровнях: а) анализа существующего сборочного рабочего места перед роботизацией; б) формирования структуры УП; в) синтеза элементов УП на уровне логики управления взаимодействием с внешним технологическим оборудованием и уровне модели движения робота на фазе соединения деталей и транспортных перемещениях; г) определения эффективных алгоритмов обслуживания внешнего технологического оборудования; д) расчета оптимальных параметров движения робота; е) оперативной коррекции структурных и основных элементов УП робота.

2. Технологические возможности манипулирования антропоморфных сборочных роботов типа РМ-ОІ "Пума-560" с 6-ю степенями подвижности используются в большей степени на сложных операциях сборки с контурными траекториями соединения деталей. Однако это требует специальных подходов к проектированию сборочной операции и методов подготовки УП.

3. Проектирование технологического процесса на роботизированном предприятии предусматривает сопряжение САПР и АСУТП с целью непосредственной выдачи УП робота в его СУ. Формируемые при этом алгоритмы зависят от текущего состояния технологического оборудования, сложности выпускаемых изделий и выполняемых действий. Необходимым условием автоматизированного программирования

является формализация операции на уровне исполняемых движений и логики управления ими.

4. Разработанный метод подготовки управляющих программ для роботизированной сборки целесообразно применять для сложных контурных траекторий соединения (более 40 опорных точек) и сложной логики управления движением (более 100 логических операторов в УП) с точностью соединения деталей ниже точности позиционирования сборочного робота в 8-10 раз.

5. Проведенные исследования показали, что при использовании положений разработанной методики автоматизированной подготовки УП для сборочных роботов с 6-ю степенями подвижности и антропоморфной кинематической структурой и системой управления на микро-ЭВМ для сборки карданного шарнира легкового автомобиля время цикла операции уменьшилось на 20% по сравнению с ручной сборкой и на 25-30% по сравнению с подготовкой УП методом обучения. На 10-15% снизился процент брака на операции сборки.

6. Выполненный комплекс исследований прошел промышленную проверку и реализован на автозаводе им. Ленинского комсомола ПО "Москвич" с реальным годовым экономическим эффектом около 3500 рублей на один сборочный комплекс.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Капустин Н.М., Хоруженко В.М. Автоматизация подготовки управляющих программ для роботизированных операций сборки // Вестник машиностроения. - 1989. - №1. - С. 31-36.

2. Капустин Н.М., Хоруженко В.М. Конструкторско-технологическая информатика роботизированной сборки // Конструкторско-технологическая информатика. Автоматизированное создание машин и технологий: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Москва, Мосстанкин, 1989. - С. 8.

3. Капустин Н.М., Хоруженко В.М. Комплексная автоматизация для роботизированной сборки // Интегрированные системы автоматизированного проектирования: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Вологда, 1989. - С. 75-77.

4. Капустин Н.М., Хоруженко В.М. Разработка математических моделей роботизированных сборочных операций // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1989. - №10. - С. 49-54.