

М. 498340

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

На правах рукописи

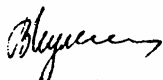
КУЛЕМИН Вячеслав Сергеевич

СИНТЕЗ МНОГОПРОЦЕССОРНОГО КОНТРОЛЛЕРА
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТА

05.02.05 – роботы, манипуляторы и робототехнические
системы
05.13.05 – элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва

1991

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

Научный руководитель: Доктор технических наук,
профессор ВЕРЕШАГИН А. Ф.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук,
профессор СОЛОМАТИН Н. М.

Кандидат физ. - мат. наук,
ведущий научный сотрудник
ЯРОШЕВСКИЙ В. С.

Ведущее предприятие: Научно - исследовательский
институт многопроцессорных
вычислительных систем при
Таганрогском радиотехническом
институте им. В. Д. Калмыкова

"21" октября 1991 г.

Совета КОБЗ. ИС. 06 "Автоматизация" Московского ордена Ленина, ордена Трудового Красного Знамени университета им. Н. Э. Баумана
Бауманская ул., дом 5.

И 498340

ярах, заверенные гербовой печатью по адресу.

хранятся в библиотеке МГТУ

----- 1991 г.

Удостоверенного Совета

 МАКСИМОВ А. И.

Лист 1 п.л. Зак. 723 Тир. 100

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Задача автоматизации производства на основе широкого применения роботов и робототехнических комплексов является одной из важнейших задач экономического и социального развития СССР.

Появление в составе современных производственных модулей высокоскоростных антропоморфных манипуляторов требует создания систем управления, способных в режиме реального времени выполнять задачи управления движением этих манипуляторов.

В настоящее время при проектировании систем управления не используются полные динамические модели манипуляторов, в результате чего на высоких скоростях качество управления снижается. Основное препятствие при этом заключается в сложности реализации требуемых законов управления. Даже при решении задач кинематики мощность одного процессора часто оказывается недостаточной для их выполнения с частотой квантования, гарантирующей необходимое качество движения по заданной траектории.

Распараллеливание задачи динамики и специальная организация межпроцессорного обмена данными позволяют сформировать вычислительные ресурсы, сопоставимые с ресурсами мощной ЭЕМ. Поэтому проблема создания многопроцессорных контроллеров для систем управления манипуляционными роботами со структурой, соответствующей их динамическим моделям, является одной из важнейших. Выбор архитектуры таких контроллеров, оптимизация загрузки процессоров — многоплановая задача, от успешной реализации которой во многом зависят качественные параметры системы управления робота.

Значительный интерес представляет также проблема использования таких контроллеров для моделирования в реальном масштабе времени движения высокоскоростных манипуляционных роботов.

Цель исследования. Диссертационная работа посвящена разработке методики структурного синтеза контроллеров для многопроцессорных систем, реализующих алгоритмы управления манипуляционными роботами, а также вопросам имитационного моделирования таких систем с целью оценки их параметров и выбора оптимальной структуры на этапе проектирования. Для достижения данной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

I. Провести анализ вычислительной сложности задач управления движением манипуляционных роботов с целью выработки требований к

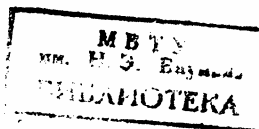
1

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1498340

Кулемин В.С. Синтез многопроцессорных систем управления манипуляционными роботами



проектируемой системе.

2. Разработать методику структурного синтеза многопроцессорных контроллеров для систем управления манипуляционных роботов.

3. Разработать алгоритмы автоматического распределения задач по процессорам проектируемой системы, позволяющий оптимизировать загрузку процессоров системы и выбрать необходимое число процессоров для решения задачи.

4. Разработать средства моделирования для анализа синтезируемых систем, в том числе язык моделирования.

5. Провести экспериментальные исследования многопроцессорного контроллера по предложенной методике с целью подтверждения положений и рекомендаций данной работы.

Методы исследования. В диссертационной работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования.

При разработке алгоритма автоматического распределения задач применялись методы теории графов и аппарат матриц. Имитационное моделирование системы проводилось посредством описания системы оценочными сетями (Е – сетями).

Экспериментальная проверка полученных результатов выполнялась с помощью имитационного моделирования систем управления известных манипуляционных роботов, а также посредством натурального эксперимента на промышленном образце системы управления манипулятора с использованием встроенных средств измерения.

Научная новизна. В процессе проведения теоретических и экспериментальных исследований в диссертационной работе получены следующие новые научно-технические результаты:

1. Разработана методика структурного синтеза многопроцессорного контроллера для систем управления (моделирования) сложных манипуляционных роботов, позволяющая провести целенаправленный выбор структуры и количества процессоров в соответствии с требованиями задачи управления. Предложен критерий оптимизации при построении подобных систем.

2. В рамках методики разработан оригинальный алгоритм автоматического распределения макрооператоров решаемой задачи по процессорам проектируемой системы, позволяющий учитывать временные задержки, связанные с синхронизацией работы процессоров и передачей информации между ними.

3. Выбран и обоснован способ моделирования системы управления, отвечающий требованиям прикладной задачи, и разработаны

средства для описания этой системы посредством специального языка моделирования.

Практическая ценность. Разработанная методика построения многопроцессорного контроллера системы управления движением манипуляционного робота содержит конкретные рекомендации по проектированию, позволяет эффективно использовать оборудование за счет уменьшения количества используемых процессоров при оптимизации их загрузки. Разработанный на основе методики пакет программ позволяет при синтезе контроллера:

- провести автоматическое назначение отдельных подзадач на процессоры системы;
- осуществить моделирование варианта проектируемой системы с целью анализа на соответствие требованиям проекта, как для всей системы, так и для ее отдельных компонент;
- выбрать необходимое для решения задачи управления число процессоров;
- получить полную статистику для всех элементов, входящих в проектируемую систему, которую можно использовать для улучшения структуры системы и ее элементов на последующих этапах синтеза.

Внедрение работы. Материалы диссертации использовались и результаты работы внедрены в Ю "Радиатор" (г. Оренбург) при создании двухпроцессорной системы управления для сборки изделия.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались на Международной конференции "COMPCONTROL-89" (г. Братислава, 1989 г.), на VII региональном семинаре "Многопроцессорные вычислительные системы" (г. Таганрог, 1987 г.), на II Всесоюзном семинаре "Роботы и гибкие производственные системы" (г. Челябинск, 1988 г.), на V Всесоюзном совещании по робототехническим системам (г. Геленджик, 1990 г.), на региональной научно-технической конференции "Сокращение ручного труда на основе повышения эффективности использования режущего, штампового инструмента, деталей машин и оборудования в машиностроении" (г. Оренбург, 1986 г.)

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня используемой литературы. Работа выполнена на 174 страницах, включая 130 страниц машинописного текста, 33 страницы рисунков и таблиц, 1 страницу приложений, 10 страниц списка литературы, содержащего 90 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи, решаемые в диссертации. Приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе проведен анализ задач управления движением манипуляционных роботов траекторного уровня, к которым относятся различные алгоритмы разделения движений (управление по вектору скорости, управление по вектору силы, позиционное управление и др.) и планирования траекторий.

Особое внимание уделено вопросу решения обратной задачи динамики, использование которой в перспективных системах управления позволит существенно повысить качество управления. Приведена сравнительная оценка сложности решения этой задачи при различных формах записи.

На основании проведенного анализа методов решения задач управления роботом автор делает вывод об актуальности создания методики синтеза многопроцессорных систем, ибо во многих случаях только такие системы способны в реальном времени решить поставленные задачи.

В главе рассмотрены характеристики и архитектурные особенности многопроцессорных систем управления роботом, отмечены их достоинства и недостатки.

Анализ работ советских и зарубежных авторов, посвященных данной тематике, позволил сформулировать важнейшие требования к проектируемой системе управления. С другой стороны, он показал, что в настоящее время практически отсутствует целостная методика синтеза таких систем, что является сдерживающим фактором при создании систем, адекватно соответствующих решаемым задачам управления.

Увеличение количества процессоров в системе управления при решении сложных задач не всегда приводит к желаемому результату. Например, ряд авторов при решении обратной задачи динамики, основываясь на рекуррентном характере процедуры метода Ньютона - Эйлера, предлагают специализированный вычислитель конвейерного типа, в котором каждый процессор выполняет вычисления, связанные с одним сочленением манипулятора.

Проведенное автором исследование таких манипуляционных роботов, как рима 56Q, УЭМ - 5, "Стенфордская рука" показало, что

объем вычислений для различных звеньев этих роботов по формулам Ньютона – Эйлера имеет большие отличия. Эта разница в количестве арифметических операций, объясняется спецификой выбора систем координат, связанных со звеньями манипулятора, который проводится по специальным правилам Денавита-Хартенберга, а также использованием различных уравнений для сочленений поступательного и вращательного типов при решении задачи. Поэтому использование вычислителя, имеющего архитектуру конвейерного типа, часто не дает ожидаемых результатов и в каждом случае должно быть оправдано данными анализа.

Вопрос проектирования системы управления робота требует для своего решения системного подхода, который заключается в том, что должна быть определена цель поведения системы, критерии эффективности при ее создании, построена модель и произведена разработка системы с учетом требований к различным элементам.

При реализации системного подхода в рамках данной работы была создана методика для этапа структурного синтеза многопроцессорного контроллера, которая может быть представлена в виде следующих этапов:

1. Формирование критерия оптимизации структуры системы
2. Представление решаемой задачи графом подзадач (макрооператоров).
3. Выбор варианта типовой структуры контроллера системы и количества процессоров.
4. Построение модели проектируемой системы
5. Статическое распределение отдельных макрооператоров решаемой задачи по процессорам системы с использованием модели.
6. Анализ варианта системы по результатам моделирования на соответствие требованиям критерия оптимизации.
7. Выбор полученного решения как базового в случае удовлетворения поставленных требований, переход к шагу 2 в противном случае.

Многие вопросы методики синтеза в настоящее время либо не решены, либо слабо исследованы для систем управления реального времени, к которым относятся системы управления роботами.

В рамках предложенной методики поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбор и обоснование критерия синтеза.
2. Создание эффективного алгоритма распределения макроопе-

раторов решаемой задачи по процессорам системы.

3. Построение модели системы, учитывающей как специфику решаемой задачи, так и особенности работы аппаратных средств.

Перечисленные проблемы поддаются формализации, поэтому их решение и создание соответствующих пакетов программ дает возможность автоматизировать отдельные этапы процесса синтеза, провести детальный анализ существующих и проектируемых систем, сделать целенаправленным поиск искомого решения.

Вторая глава диссертации посвящена решению одной из проблем методики синтеза – созданию алгоритма распределения, способного автоматически, по заданному критерию составить расписание выполнения задачи управления процессорами контроллера. Одновременно определяется количество процессоров, способных решить задачу управления за заданный интервал времени.

Поскольку рассматриваемая система управления робота должна работать в реальном масштабе времени, в диссертации сделан вывод, что в качестве критерия оптимизации структуры системы должно быть выбрано время решения задачи в целом. При этом необходимо найти такое распределение макрооператоров по процессорам контроллера, которое минимизирует этот критерий:

$$\min_{\{x_{ij}\} \in G} \left(\max_j \sum_{i=1}^I (t_{ij} + t_{ij}^*) \cdot x_{ij} \right)$$

где t_{ij} – время решения i – макрооператора на процессоре j ; t_{ij}^* – вынужденное время простоя процессора j после выполнения макрооператора i , требуемое для обеспечения отношений предшествования; x_{ij} – признак выполнения макрооператора на процессоре. $x_{ij} = 1$, если макрооператор выполняется в j – процессоре, $x_{ij} = 0$ в противном случае; G – множество всех возможных распределений.

Задача оптимального распределения блоков макрооператоров по процессорам системы характеризуется высокой трудоемкостью вычислений и является NP-полной. Известно, что точное решение такой задачи становится невозможным даже на супер-ЭВМ, если число отдельных подзадач, распределяемых на два процессора, превышает несколько десятков. Таким образом, использование точных алгоритмов для решения поставленной задачи невозможно.

На основе анализа существующих эвристических алгоритмов, таких как метод ветвей и границ, метод критического пути и др.,

в работе сделан вывод, что эти алгоритмы не позволяют составить расписание, которое учитывало бы особенности архитектуры многопроцессорного контроллера, связанные с обменом информацией между процессорами при решении задачи управления движением робота.

Задача учета архитектурных особенностей контроллера в алгоритме распределения диктует необходимость разработки нового подхода при составлении расписания. Именно этим объясняется предпринятая в диссертационной работе попытка объединения процесса распределения макрооператоров по процессорам системы с имитационным моделированием этого процесса на каждом шаге распределения, что предполагает исследование вопросов синхронизации задач, обмена данными, потерь времени при использовании общих ресурсов системы и других.

Такой подход позволяет составить реальную картину взаимодействия процессов в системе, сравнить работу систем с различной архитектурой для ее правильного выбора при решении прикладной задачи и определения минимально необходимого количества процессоров.

За основу построения алгоритма взят алгоритм Ю. Шварца, предназначенный для упорядочения выполнения макрооператоров априорно назначенных на процессоры. Этот алгоритм не учитывает временные затраты на межпроцессорные связи, поэтому он был существенно переработан. Были изменены как правила упорядочения, принятые в этом алгоритме, так и сам способ назначения на процессоры, что обусловлено спецификой задач управления движением робота. Существенным является также и то обстоятельство, что в отличие от упомянутого алгоритма, процессоры для макрооператоров задачи априорно не назначаются.

Идея предлагаемого в работе подхода показана на рис. I. При наличии свободных процессоров происходит поиск макрооператоров в матрице распределения, выполнение которых на текущий момент времени не сдерживается отношениями предшествования.

После сортировки по определенным правилам происходит назначение макрооператоров на свободные процессоры системы. Возможность объединения макрооператоров в блоки позволяет уменьшить количество межпроцессорных связей.

Включение в алгоритм распределения модели системы позволяет составить такое расписание выполнения задачи, которое учитывает все особенности архитектуры системы. При этом разработчику пре-

доставляется возможность на основе статистических данных провести анализ влияния отдельных устройств системы на параметры распределения, что дает возможность исключить ошибки при проектировании.

После завершения работы макрооператора он поглощается моделью и вычеркивается из матрицы распределения. Процесс продолжается до тех пор, пока матрица распределения не будет пуста.

Последовательность назначения макрооператоров на процессоры определяется графом задачи управления, каждая вершина которого соответствует макрооператору, представляющему собой одно из уравнений, составляющих эту задачу. При всех исследованиях в данной работе решалась обратная задача динамики манипулятора как одна из наиболее сложных в вычислительном отношении, записанная в форме Ньютона-Эйлера. Фрагмент графа этой задачи для одного звена манипулятора представлен на рис. 2.

Третья глава посвящена вопросам моделирования проектируемых систем. Способ моделирования, с одной стороны, должен отражать природу моделируемых задач, а, с другой стороны, предоставлять разработчику возможность использовать модель в алгоритме автоматического распределения.

На основании исследования методов моделирования сделано заключение о целесообразности использования для этих целей оценочных сетей (Е - сетей). Эти сети позволяют исследовать временные факторы поведения системы, дают возможность учесть специфику прикладной задачи, могут быть эффективно использованы при моделировании многопроцессорных систем. Модель, описанная Е - сетью, хорошо вписывается в структуру алгоритма распределения.

Важным вопросом является выбор языка моделирования. Использование какой-либо из существующих универсальных систем моделирования в данном случае затруднено, так как модель системы тесно связана с алгоритмом распределения и они используют общие массивы и структуры данных. Поэтому в рамках данной работы был создан язык моделирования, который осуществляет разбор "снизу вверх" по LR (I) - грамматике.

Грамматика языка имеет в своем составе средства для описания макрооператоров, входящих в состав задачи управления движением манипуляционных роботов. Вектор атрибутов, характеризующих каждый макрооператор, может содержать любые сведения, интересующие разработчика, например: порядковый номер макрооператора,



Рис. 1.

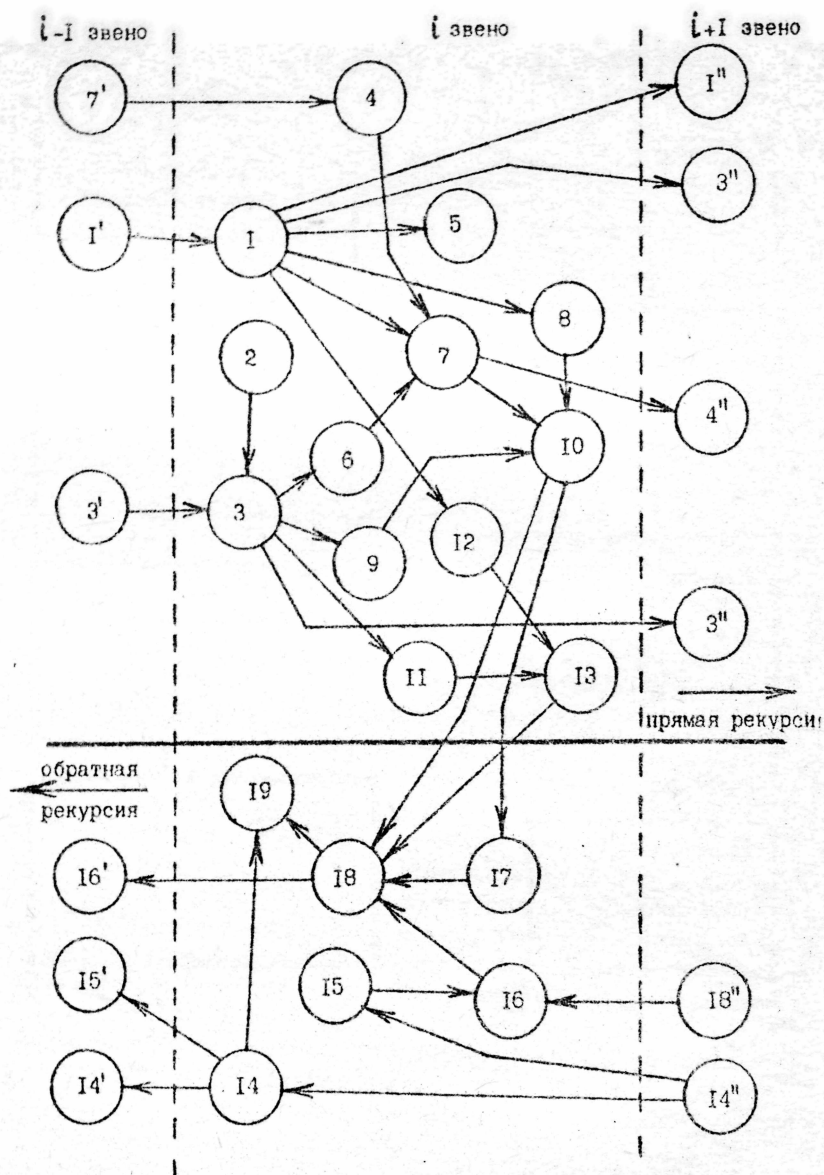


Рис. 2

время его выполнения, количество слов, передаваемых другим под-задачам и т. д.

Модели, составленные на основе Е – сетей, довольно громоздки, время моделирования при увеличении размерности модели быстро возрастает. Однако, при проектировании контроллера для систем управления манипуляционных роботов, использование Е – сетевых моделей является оправданным, так как число процессоров в таких системах обычно не превышает 6 – 8. Все вычисления при моделировании производятся с использованием обратной польской записи, что позволяет существенно сократить время прогона модели на ЭВМ.

Разработанный автором язык моделирования позволяет описать не только аппаратные средства проектируемой системы, но и операции над данными, отражающие особенности решаемой задачи управления роботом.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям многопроцессорных систем управления манипуляционных роботов с целью подтверждения полученных в работе результатов.

Исследования состояли из двух независимых этапов. На первом этапе проверялась работоспособность предложенной методики. Был проведен эксперимент по имитационному моделированию различных многопроцессорных систем, построенных на базе известных процессоров, с целью анализа и сравнения полученных при этом результатов с результатами других работ. Второй этап предполагал использование алгоритма распределения задач и моделирование работы конкретной системы управления с дальнейшей проверкой результатов на действующем в условиях цеха гибком производственном модуле (ГПМ) сборки.

Эксперимент по имитационному моделированию был проведен для систем с магистральной структурой, широко используемых в устройствах управления роботами.

При этом в качестве основных вопросов исследования были взяты следующие:

- влияние производительности процессоров на время выполнения задачи;
- влияние количества процессоров на время выполнения задачи (для разных классов процессоров);
- влияние пропускной способности системной магистрали на задержки в системе;
- влияние способов доступа к общей памяти на задержки в

системе.

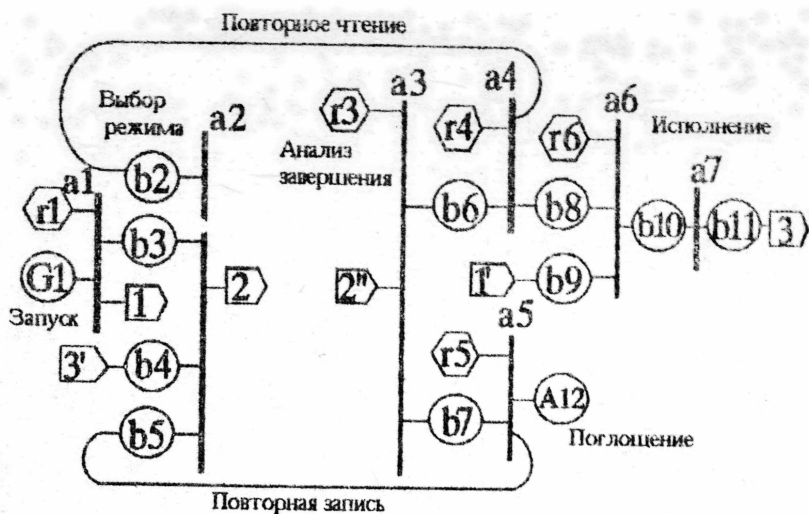
Фрагмент модели, описывающий процесс решения задачи на каждом процессоре, показан на рис. 3а, а конкуренция между процессорами за доступ к общим ресурсам (системной магистрали и общей памяти) показана на рис. 3б.

При моделировании контроллера, решающего обратную задачу динамики для робота PUMA 560 и робота Стенфордского университета, число процессоров в системе менялось от двух до шести. Получены сравнительные оценки времени решения для процессоров М2 (микро-ЭВМ "Электроника-60"), Intel 8086/8087, PDP - II/45.

Результаты моделирования показали, что при использовании данной методики удается получить существенный выигрыш в экономии вычислительных ресурсов. Время выполнения задачи на 6 процессорах для робота Стенфордского университета, полученное при аналогичном эксперименте сотрудниками университета Пардью (США), составляет 9,7 мс, коэффициент ускорения вычислений за счет одновременной работы нескольких процессоров - 2,64. Почти такая же производительность системы, но уже на 3 процессорах достигается при использовании методики, предложенной в диссертации. Кроме того, поскольку в данной работе учтены временные затраты на синхронизацию задач в системе, на обмен информацией между отдельными макрооператорами и потери времени при использовании общих ресурсов, то полученные результаты представляются более достоверными. Следует заметить, что разработчик аппаратных средств системы при моделировании может описывать свою систему с любой степенью детализации. Единственным ограничением является мощность компьютера, на котором проводится моделирование.

Интерес представляют и некоторые частные выводы, связанные с природой рассматриваемой задачи динамики робота.

Полученные результаты показали, что с увеличением количества процессоров время выполнения задачи уменьшается нелинейно, а в случае, если количество процессоров становится больше трех, рост производительности системы при дальнейшем увеличении числа процессоров практически прекращается, что вызвано высокой степенью связи между отдельными макрооператорами задачи. Такое заключение дает разработчику системы возможность на основании проведенных оценок отказаться от разработки контроллеров, число процессоров выбранного типа в которых превышает определенное значение. В данном случае он может сделать вывод, что число про-



а)



б)

Рис. 3

цессоров синтезируемого контроллера не должно превышать 3 - 4, и направить свои усилия на создание системы, состоящей из процессоров большей вычислительной мощности.

Проведенный анализ потерь при использовании общих ресурсов системы, решающей обратную задачу динамики робота, показал, что, если для двухпроцессорной системы на базе процессоров Intel 8086/8087 они составляют около 18% от времени решения, то в случае использования 6 процессоров это время увеличивается до 35%. Этот результат - дополнительное свидетельство важности учета факторов, связанных с потерями времени при передаче данных в системе.

Разработанная методика была использована при проектировании системы управления ГТМ сборки пробки радиатора тракторного двигателя для ПО "Радиатор" (г. Оренбург). Система включала в себя две микро-ЭВМ "Электроника-60", связанные через последовательный интерфейс, одна из которых управляла движением робота "Тур-IG", а другая выполняла операции контроля рабочей сцены, используя информацию системы технического зрения.

Поскольку ограничения, связанные с работой алгоритма распределения, в данном случае оказались выполненными, то задачу сборки пробки радиатора удалось представить в виде направленного графа. Для всего технологического процесса времени выполнения отдельных подзадач для случая выполнения сборки без отклонений от техпроцесса были измерены.

Использование алгоритма автоматического распределения дало возможность ускорить процесс сборки за счет параллельного выполнения отдельных технологических операций, при этом время сборки изделия было существенно сокращено. Полученные расчетные результаты были подтверждены на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1. Проведен анализ методов решения задач динамического управления манипуляционными роботами и проанализированы существующие подходы к решению этих задач с использованием микропроцессорных систем управления. На основании анализа определены требования, которые должны быть реализованы при синтезе контрол-

14

лера системы управления или моделирования.

2. Разработана методика системного проектирования контроллера многопроцессорных систем управления (моделирования) для роботов, занятых на сборочных и транспортных операциях.

3. Разработан алгоритм автоматического распределения макрооператоров, составляющих задачу управления, по процессорам проектируемой системы, учитывающий время, затрачиваемое на межпроцессорные связи.

4. Предложен способ моделирования аппаратных и программных средств проектируемой системы, который дает возможность получения детальной статистики по всем элементам системы на этапе ее проектирования.

5. Разработан язык моделирования, средствами которого может быть описана проектируемая система, а также параметры макрооператоров решаемой задачи.

6. Выполнены экспериментальные исследования, подтвердившие эффективность предложенной методики.

На основании результатов, полученных в диссертационной работе, сделаны следующие выводы:

1. При создании многопроцессорного контроллера системы управления робота необходимо учитывать требования и особенности технологического процесса, на основании которых определяется круг задач управления движением, а также максимально допустимое время выполнения этих задач.

2. При создании систем на базе современных высокоскоростных процессоров пренебрежение затратами времени на межпроцессорные связи недопустимо. Расписание решения задачи управления движением в реальном масштабе времени должно быть составлено на основании точного учета временного ресурса.

3. Высокая степень связи между отдельными макрооператорами решаемой задачи управления может препятствовать ее распараллеливанию. Поэтому разработчик системы в каждом случае должен по результатам моделирования сделать правильный выбор между увеличением количества процессоров и повышением их мощности.

4. Использование методики при синтезе структуры контроллера позволяет получить экономию вычислительных ресурсов за счет высокого коэффициента загрузки процессоров и оптимизации связей между ними, что может дать выигрыш в количестве процессоров, способных решить поставленную задачу.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Организация сборочного процесса коллективом роботов под управлением ЭВМ / А. Ф. Верещагин, С. Л. Зенкевич, В. С. Кулемин, А. В. Назарова // Научные принципы автоматизации проектирования, построения, алгоритмического обеспечения и эксплуатации робототехнических систем: Материалы Всесоюзного совещания. - Цехкадзор, 1983. - С. II0 - II3.
2. Верещагин А. Ф., Кулемин В. С. Методика оптимизации структуры многопроцессорной системы управления робота // Автоматизация производственных процессов на основе промышленных роботов нового поколения: Сб. научных трудов. - М. ЭНИМС, 1991. - С. 88 - 93.
3. Верещагин А. Ф., Кулемин В. С. Проектирование мультипроцессорного контроллера для решения обратной задачи динамики манипуляционного робота // Труды 9 - ой международной конференции COMPCONTROL - 89. - Братислава, 1989. - С. II6 - II7.
4. Верещагин А. Ф., Кулемин В. С. Статическое распределение задач при построении многопроцессорной системы управления манипулятора // Роботы и гибкие производственные системы: Тезисы докладов 2 - го Всесоюзного семинара. - Челябинск, 1988. - С. I74 - I75.
5. Кулемин В. С. Алгоритм распределения задач при проектировании мультипроцессорной системы управления манипулятора // Многопроцессорные вычислительные системы: Тезисы докладов 7 - го регионального научно - технического семинара. - Таганрог, 1987. - С. 58 - 59.
6. Кулемин В. С. Выбор оптимальной структуры многопроцессорной системы управления роботом // Тезисы докладов V Всесоюзного совещания по робототехническим системам. - Геленджик, 1990. - Ч. 2. - С. I6.
7. Кулемин В. С. Опыт разработки системы управления гибкого производственного модуля для сборки деталей // Сокращение ручного труда на основе повышения эффективности использования режущего, штампового инструмента, деталей машин и оборудования в машиностроении: Тезисы докладов научно-технической конференции. - Оренбург, 1986. - С. 46.

В. Кулемин