

Руабхи Насир

**РАЗРАБОТКА СБОРОЧНОГО РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЗАМЕЩЕНИЯ**

Специальность: 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические
системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2003г

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете
имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: Доктор технических наук,
профессор Ющенко А.С.

Официальные оппоненты:- Доктор технических наук,
профессор, Заслуженный деятель науки Р
Аршанский М.М.

- Кандидат технических наук, доцент,
Игнатьев В.А.

Ведущая организация: АО « Центральный научно-исследовательский
технологический институт» (г.Москва)



Защита диссертации состоится "27" мая 2003 г. в 16 ч. 00 м.
на заседании диссертационного совета Д.212.141.02 в Московском
Государственном Техническом Университете им.Н.Э.Баумана по адресу:
105005, г.Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, к. 613 м

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба
высылать по указанному адресу

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.Н.Э.Баумана

Автореферат разослан "25" 04 2003г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета
к.т.н., доцент

Иванов В.А.

271

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Суть современной научно-технической революции заключается в создании автоматизированного производства. Необходимость частой смены продукции вызвало к жизни развитие компьютерного интегрированного производства (КИП). Большое значение в обеспечении гибкости производства отводится методам групповой технологии и организации на их основе робототехнических комплексов (РТК) для различных технологических процессов: сварки, сборки, штамповки и т.д. Особой сложностью отличаются сборочные РТК, что связано с многовариантностью сборки и сложностью ее реализации, поскольку в состав комплекса кроме манипулятора и технологического оборудования входят различные управляющие и информационные средства. Особую роль в этих комплексах играет система управления (СУ РТК).

В общем случае система управления технологическим оборудованием содержит два основных уровня:

- верхний — устройство управления всеми технологическими комплексами цеха (завода);
- нижний — устройства управления отдельными РТК. Они контролируют выполнение задач, решаемых конкретными комплексами, и обеспечивают связь с системой управления верхнего уровня (цеха).

В свою очередь, РТК включает в себя автоматизированный склад, манипуляционный робот, роботизированный транспорт и другое технологическое оборудование. В работе на примере РТК сборки решается задача оптимизации системы управления нижнего уровня, от которой в значительной мере зависит качество работы всего комплекса.

Создание высокопроизводительного робототехнического комплекса является достаточно сложной задачей. Для сокращения сроков разработки и производственных потерь целесообразно выполнять предварительное математическое моделирование РТК и его оптимизацию. Однако, известные методы моделирования сложных систем плохо адаптированы к исследованию систем управления технологических комплексов и часто не могут быть непосредственно использованы для проектирования конкретных систем. Поэтому проблема разработки эффективного метода для исследования и оптимизации алгоритма работы РТК и его системы управления является весьма актуальной.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка эффективных методов и средств анализа и оптимизации алгоритмов функционирования и структуры систем управления робототехнических комплексов сборки.

В работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбран метод, позволяющий исследовать и оптимизировать алгоритмы функционирования и структуру системы управления РТК сборки.

2. Разработаны модели для математического моделирования технологического процесса сборки и структуры системы управления РТК.

3. Разработаны методы и алгоритмы оптимизации технологического процесса сборки и структуры системы управления РТК.

4. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для оптимизации технологического процесса и структуры системы управления РТК.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы теории графов и методы математического моделирования сложных систем. Проверка полученных результатов осуществлена путем экспериментального исследования промышленного РТК сборки.

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

1. На основе анализа различных робототехнических комплексов разработана обобщенная структура системы управления сборочным РТК.

2. Выбран и обоснован метод замещений, обеспечивающий наиболее эффективное решение задачи оптимизации системы управления РТК.

3. Разработаны математические модели и определены технические характеристики технологического процесса сборки и структур системы управления РТК.

4. Разработаны алгоритмы оптимизации технологического процесса и структуры системы управления РТК, основанные на использовании метода замещений.

Практическая ценность. Разработанный пакет программ для оптимизации систем управления РТК внедрен в промышленное производство. Предложенная методика оптимизации систем управления позволяет сократить время проектирования и повысить производительность РТК сборки в среднем на 15-20%. Разработанное программное и методическое обеспечение может быть использовано при создании АРМ разработчика РТК.

Внедрение работы. Материалы работы использовались в АО “Центральный научно-исследовательский технологический институт”

(г. Москва) при создании алгоритмического и программного обеспечения робототехнического сборочного комплекса КСП-1.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на IX и X научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника» (г. Санкт-Петербург, 1997г., 1998г.), международных научно-технических семинарах “Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации” (г. Алушта, 1998 г., 1999 г.), на научных семинарах кафедры “Робототехнические системы” МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, перечня использованной литературы, содержащего ... наименований и приложения.

Работа выполнена на 150 страницах, включая 137 страниц текста, 52 страниц рисунков и таблиц и приложения на 13 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе приведен обзор существующих робототехнических комплексов, предназначенных для сварки, нанесения покрытия, механообработки, холодной и горячей штамповки, литья под давлением и сборки. Роботизация сборки является одной из самых сложных и наименее разработанных задач автоматизации производства. В связи с этим поставлена задача исследования и оптимизации РТК сборки. В главе приведен анализ состава типовых сборочных РТК и определены их элементы, в том числе:

- сборочные роботы, характеризующиеся грузоподъемностью, объемом рабочей зоны, скоростями перемещения, погрешностью позиционирования и способом управления;
- автоматизированные склады заготовок и готовой продукции, характеризующиеся числом и размерами ячеек, скоростью доставки и массой груза;
- транспортные устройства, характеризующиеся грузоподъемностью, числом степеней подвижности, погрешностью позиционирования, диапазоном и скоростью перемещения;
- технологическое оборудование, которое характеризуется типом выполняемой операции и производительностью.

В результате сформулированы основные задачи, возникающие при создании РТК сборки:

- разработать эффективный алгоритм функционирования РТК, обеспечивающий реализацию заданного технологического процесса за минимальное время;
- выбрать элементы системы управления РТК и разработать ее структуру с учетом возможностей используемого технологического оборудования.

На основании проведенного анализа была разработана обобщенная структура сборочного РТК, представленная на рис.1. Система управления таким комплексом является сложной распределенной системой. Она включает ряд управляющих устройств (УУ) отдельными технологическими элементами РТК, объединенных в общую структуру. В том числе: устройства управления

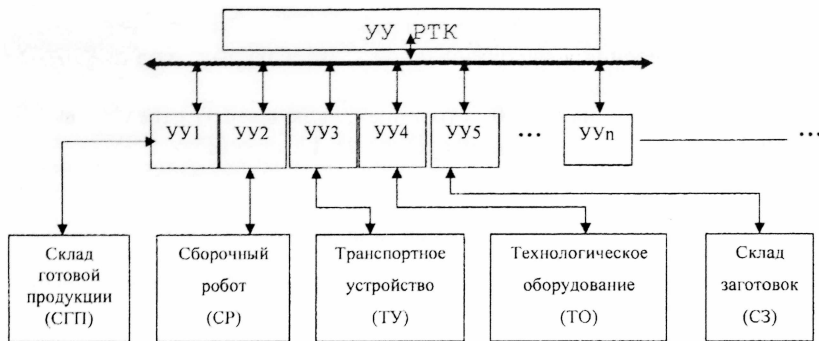


Рис.1. Обобщенная структура сборочного РТК

складами заготовок и готовой продукции, технологического оборудования, транспортного модуля и сборочного робота. Одно из этих устройств является ведущим (УУ РТК). Оно контролирует выполнение общей задачи, решаемой РТК, и обеспечивает связь с системой управления верхнего уровня.

Особое внимание в этой главе уделено обзору методов описания, анализа и оптимизации сложных систем по какому-либо критерию (как правило, это время выполнения технологического процесса). Среди них методы перебора, Монте-Карло, ветвей и границ, массового обслуживания, динамического программирования, конечных автоматов, сетей Петри и метод замещений.

В результате сравнения был выбран метод замещений как наиболее эффективный для решения поставленных в диссертации задач, поскольку он является достаточно простым, универсальным и позволяет решать многопараметрические задачи оптимизации.

В первой главе также приведен обзор основных работ, посвященных аналогичным вопросам и конкретизированы задачи диссертации.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке математического аппарата оптимизации системы управления РТК на основе метода замещений. Метод замещений был разработан в России в 90-х годах. Даны основные понятия и определения метода. Сущность метода замещений заключается в следующем. На основании анализа исходной информации (например, технологической карты) составляется граф, описывающий последовательность сборки конкретного изделия. В результате последовательных преобразований исходного графа находят граф, который имеет минимальное значение целевой функции и таким образом описывает оптимальный техпроцесс. Из полученного графа определяют оптимальный алгоритм работы робототехнического комплекса сборки и наиболее целесообразную структуру его системы управления.

$$\text{Целевая функция в данном случае имеет вид } \tau = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \tau_{ij} \cdot X_{ij} \quad (1)$$

где: m – число дуг графа состояний; i, j – номера граничных вершин ребра; τ_{ij} – весовой коэффициент ребра графа, X_{ij} – наличие или отсутствие ребра графа {0 – нет, 1 – есть}.

Значение функции (1) рассчитывается с использованием матрицы весовых коэффициентов, которая составляется предварительно на основе описания технологического процесса или параметров устройств системы управления в следующем виде

$$T = \begin{pmatrix} \tau_{11} & \dots & \tau_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ \tau_{m1} & \dots & \tau_{mm} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Минимальное значение целевой функции находится с учетом векторов ограничений, с помощью которых задается количество входящих и исходящих ребер для каждой вершины графа. Вектора ограничений определяют возможные (допустимые) связи между отдельными вершинами графа. Формально векторы ограничений описывают минимальное и максимальное количество входов и выходов для каждой вершины: $V_{исх} \text{ макс}$, $V_{исх} \text{ мин}$, $V_{вх} \text{ макс}$, $V_{вх} \text{ мин}$. Здесь $V_{исх}$ – число исходящих, а $V_{вх}$ – число входящих ребер вершины графа соответственно.

В работе метод замещений применяется для решения двух основных задач:

- оптимизации алгоритма функционирования РТК по критерию минимума времени выполнения технологического процесса;
- оптимизации структуры системы управления РТК при реализации выбранного алгоритма техпроцесса по критерию минимума временных затрат, связанных с обменом информацией между устройствами управления.

Для решения этих задач методом замещений были разработаны специальные математические модели. Они основаны на методе замещений, но смысл их различен в зависимости от решаемой задачи.

При решении задачи оптимизации алгоритма функционирования РТК вершинами графа являются отдельные технологические операции (переходы), а ребрами графа – времена их выполнения (τ_{ij}), которые рассчитываются по карте технологического процесса. Эти времена удобно представить в виде квадратной матрицы (2), которая определяет условную цену связи между вершинами графа. На основании элементов матрицы составляется табл.1. При этом учитываются параметры реального оборудования, на основе которых строятся векторы ограничений.

Процедура оптимизации реализуется следующим образом. Ранжируя элементы таблицы 1 по возрастанию весов, определяем среди них кандидатов

на удаление и кандидатов на добавление (табл.2) и из них находим первые N-1 элементы. Из этих элементов строим начальный граф. Если этот граф не удовлетворяет ограничениям, то в процессе коррекции используются остальные элементы таблицы 2. Процедура оптимизации продолжается до тех пор, пока не будет найден граф, обладающий минимальной суммарной длиной ребер. Используя этот граф, мы получаем алгоритм сборки, который имеет минимальное время.

При решении задачи оптимизации структуры системы управления РТК вершины графа соответствуют устройствам управления отдельными элементами РТК, а ребра – временам обмена информацией между ними. Из этих времен составляется матрица (2). Значения времен (τ_{ij}) существенно зависят от типа используемых устройств управления и возможных вариантов их соединения.

Таблица 1

Переход	1-й	2-й			m-й
1-й	—	τ_{12}			τ_{1m}
2-й	τ_{21}	—			τ_{2m}
			...		
m-й	τ_{m1}			τ_{mm-1}	—

Таблица2

№ п/п	Длительность	Кандидаты на удаление
1	τ_1	
2	τ_2	
2	τ_3	Кандидаты на добавление
4	τ_4	
.	.	
.	.	
.	.	
n-1	τ_{n-1}	
n	τ_n	

Например, для рассмотренного ниже комплекса время обмена между УУ IBM PC и УУ «МПСУ» составляет 0,3с, а между УУ «Сфера-36» и УУ «МПСУ» - 0,6с.

Решение задачи оптимизации структуры СУ РТК проводится так же, как и в случае оптимизации алгоритма технологического процесса. В результате мы получаем граф, обладающий минимальной суммарной длиной ребер. По этому графу можно определить структуру системы управления РТК для найденного ранее алгоритма и циклограмму функционирования всего комплекса.

Для автоматизации применения предложенного математического аппарата в работе были разработаны алгоритмы оптимизации технологического процесса (рис.2) и структуры системы управления РТК (рис.3).

При оптимизации техпроцесса (рис.2) исходной информацией являются план РТК, чертежи собираемого изделия и отдельных деталей, а также производительность элементов РТК. На основании этой информации оператор рассчитывает времена выполнения отдельных операций техпроцесса, составляет матрицу времен (2) и определяет векторы ограничений. Элементы матрицы автоматически ранжируются с целью определения кандидатов на удаление и добавление. Из кандидатов на удаление ($N-1$ – вершина) строится начальный граф и проверяется его соответствие векторам ограничений. Если граф удовлетворяет этим ограничениям, то вычисляется целевая функция (1), формируются оптимальный граф и циклограмма техпроцесса. В противном случае с помощью пар кандидатов на добавление строится новый граф и процедура повторяется до тех пор, пока не будет построен граф, удовлетворяющий векторам ограничений.

Для оптимизации структуры системы управления (рис.3) исходной информацией являются число интерфейсов, объем передаваемой информации и скорости ее передачи. Эти данные позволяют оператору составить матрицу (2) и определить векторы ограничений. Далее в процессе оптимизации, которая выполняется аналогично процедуре, описанной выше, определяется структура системы управления РТК, обеспечивающая минимальное суммарное время обмена между устройствами управления. Последовательное применение

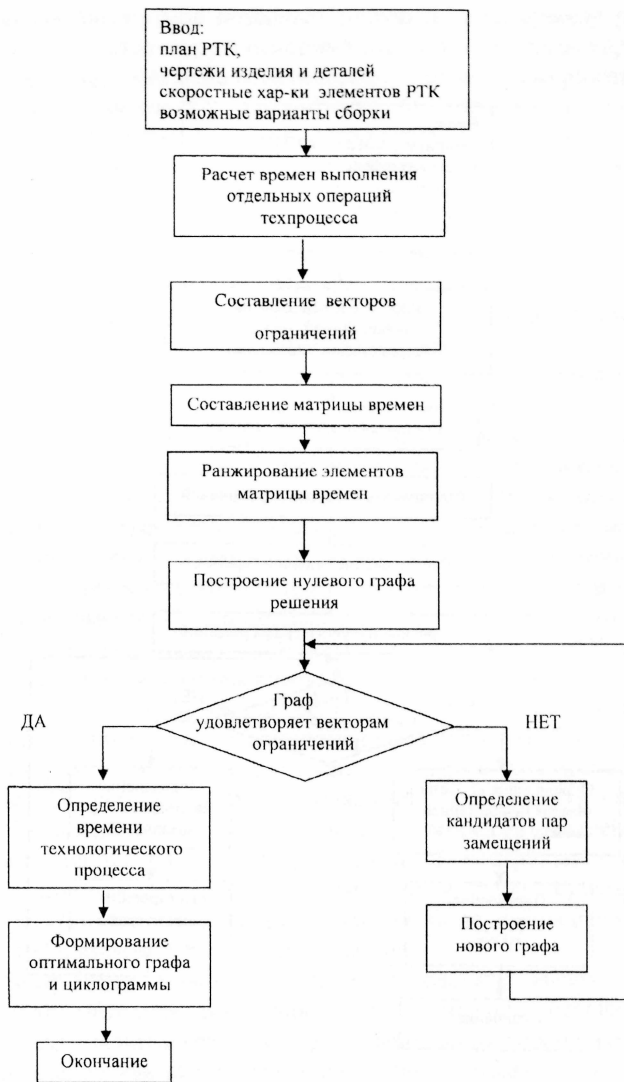


Рис.2. Алгоритм оптимизации технологического процесса

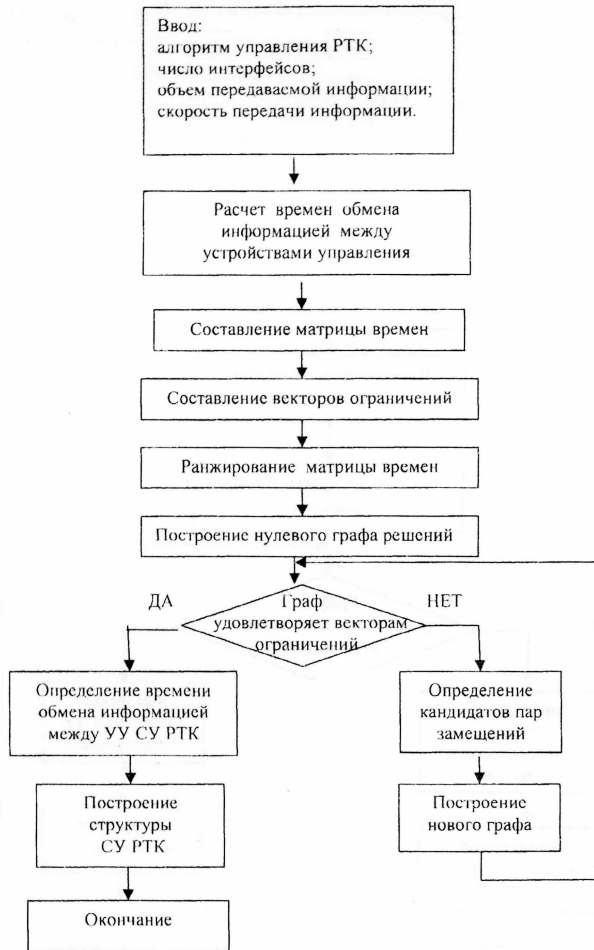


Рис.3. Алгоритм оптимизации структур системы управления РТК

разработанных алгоритмов позволяет получить циклограмму работы РТК, определить состав, структуру и основные параметры системы управления.

Третья глава посвящена практическому применению разработанных на основе метода замещений алгоритмов оптимизации технологического процесса и структуры системы управления РТК. Для подтверждения эффективности работы предложенных алгоритмов были рассмотрены два реальных технологических модуля, выполняющих сборочные операции.

В первом примере была оптимизированная система управления РТК сборки, функционирующего в Центральном Научно-исследовательском Технологическом Институте (г. Москва). Здесь в автоматическом режиме собиралось изделие, представляющее собой вал с двумя подшипниками и одной шестерней. Общее время сборки составляло 57 с.

Оптимизация системы управления выполнялась в два этапа. На первом этапе оптимизировалось время выполнения самой сборочной операции, на втором – время работы устройств управления. В результате первого этапа разработан оптимальный по быстродействию технологический процесс, продолжительность которого составила 30с вместо 40с до оптимизации. На втором этапе учитывались технические характеристики используемых устройств управления и временные потери на обмен информацией между ними. В результате временные потери, связанные с передачей информации, составили 12с вместо 17с до оптимизации. Это говорит о том, что время обмена информацией между устройствами управления РТК существенно влияет на общее время технологического процесса сборки.

На основании полученных результатов была определена структура системы управления и рассчитана циклограмма процесса сборки изделия.

Во втором примере рассмотрена процедура оптимизации системы управления РТК, собирающего блок поворота промышленного робота МП110 на заводе “Красный пролетарий”. Блок состоит из 185 деталей; в процессе сборки выполняются 51 технологическая и 33 контрольных операции. В результате применения рассмотренных алгоритмов суммарное время технологического процесса сборки изделия было сокращено на 8,6% и составило 192 с вместо 210 с до оптимизации.

Рассмотренные примеры позволяют сделать вывод о том, что разработанная методика проектирования на основе метода замещений позволяет существенно сократить время выполнения сборочных операций за счет оптимизации как самого технологического процесса, так и временных потерь на обмен информацией.

Для автоматизации решения рассмотренных задач был разработан пакет программ. Он прост в использовании и не требует высокой квалификации пользователя. От оператора требуется только ввести матрицу времен и составить векторы ограничений. Программа автоматически находит последовательность выполнения технологического процесса и структуру системы управления РТК в соответствии с процедурой, изложенной выше.

Программа написана на языке «Си». Она работает в среде MS-DOS и предъявляет минимальные требования к используемому компьютеру. Объем

программы составляет 318 Кб, время работы зависит от сложности задачи. В рассмотренных примерах оно не превысило 2 мин.

Применение разработанного пакета программ в ЦНИТИ и на заводе “Красный пролетарий” показало его универсальность и возможность адаптации к условиям реального производства.

Заключение

В диссертационной работе представлены теоретические исследования, относящиеся к проблемам анализа и синтеза систем управления промышленных РТК. Итогом работы являются следующие основные результаты:

1. Проведен анализ различных РТК и разработана обобщенная структура сборочного комплекса; сформулированы задачи исследования и оптимизации РТК сборки.

2. Проведен анализ методов оптимизации алгоритмов работы и структур систем управления РТК по критерию минимума временных затрат, в результате которого выбран метод замещений.

3. Разработана математическая модель, позволяющая описывать алгоритм технологического процесса сборки и структуру системы управления робототехнического комплекса.

4. Разработаны алгоритмы оптимизации технологического процесса сборки и структуры системы управления РТК по минимуму временных затрат.

5. Разработаны и внедрены в производство пакет программ и инженерная методика для проектирования систем управления РТК сборки; составлена Инструкция пользователя.

Разработанный автором подход позволяет успешно решать задачу оптимизации системы управления сборочного РТК, а разработанное программное обеспечение может быть использовано для проектирования реальных систем. Полученные результаты теоретических исследований могут быть использованы при автоматизированном проектировании СУ РТК, в том числе в составе АРМ разработчика, а также в процессе отладки РТК в условиях реального производства. Использование разработанных алгоритмов позволит сократить затраты на внедрение систем управления РТК, а также снизить требования к квалификации разработчика.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Руабхи Насир, Михайлов Б.Б. Оптимизация структуры системы управления сложными РТК, работающими в экстремальных условиях // Экстремальная робототехника: IX Всероссийская научно-техническая конференция. – С – Пб., 1998. – С. 116-122.
2. Руабхи Насир. Бездатчиковый асинхронный электропривод с векторным управлением для роботов, работающих в экстремальных условиях // Экстремальная робототехника: X Всероссийская научно-техническая конференция. – С – Пб., 1999. – С. 453-459.

3. Слепцов В.В., Руабхи Насир. Синтез систем управления робототехническими комплексами // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права: Научные труды II Международной научно-практической конференции. – М.: 1999. – С. 149-154.
4. Слепцов В.В., Руабхи Насир, Слепцов Т. В. Информационные измерительные системы: Учебное пособие: . – М.: 1999. – 60 с.
5. Руабхи Насир. Современное состояние и перспективы применения робототехники // Учебное пособие: . – М., 1998. – С. 3-63.
6. Руабхи Насир., Слепцов В.В. Методика проектирования электроприводов производственных систем // Приборы, контрольно-измерительные системы автоматизации и управления.– М.:1999. – С. 18-28.
7. Руабхи Насир., Слепцов В.В. Применения идентификаторов состояния в следящих системах промышленных роботов // Приборы, контрольно-измерительные системы автоматизации и управления. – М.: 1999. – С. 29-35.
8. Руабхи Насир., Слепцов В.В. Оптимизация управления процессом сборки РТК, работающих в экстремальных условиях // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: VIII Международного-технического семинара.– М.: 1999. – С.40-42.