

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.865.8:621.791:658.512.011.56

СЁМКИН
Константин Иосифович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РТК ДУГОВОЙ
СВАРКИ НА БАЗЕ ИЗБЫТОЧНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ
СИСТЕМ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2005

Работа выполнена в Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор Пашкевич А.П.

(Учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”, кафедра автоматического управления)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Куренев В.А.

(Военная академия РБ, кафедра систем автоматического управления)

кандидат технических наук, доцент Кузьмицкий И.Ф.

(Учреждение образования “Белорусский государственный технологический университет”, кафедра автоматизации технологических процессов и электротехники)

Оппонирующая организация –

Учреждение образования “Белорусский национальный технологический университет”

Защита состоится 8 сентября 2005 года в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, БГУИР, корп. 1, ауд. 232, тел. 239-89-89

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Дуговая сварка является одной из быстроразвивающихся областей применения промышленных роботов. По данным Международной федерации робототехники (IFR) в этой области используется около 50% мирового парка роботов-манипуляторов. Такое широкое использование промышленных роботов для дуговой сварки объясняется тем, что их применение позволяет повысить качество и улучшить внешний вид швов, автоматизировать процесс сварки швов с любой формой линии соединения во всех пространственных положениях, а также исключить необходимость изготовления и применения специализированных сварочных установок, станков и машин. Типичный роботизированный технологический комплекс (РТК) сварки наряду с промышленным роботом (манипулятором инструмента), как правило, включает в себя манипулятор изделия (позиционер). Наличие позиционера в составе РТК приводит к появлению кинематической избыточности, которая может быть использована для оптимизации таких технологических параметров, как ориентация шва относительно вектора гравитации и ориентация сварочной горелки относительно шва.

Существующие системы автономного программирования и автоматизированного проектирования РТК имеют довольно ограниченные средства учета кинематической избыточности системы робот-позиционер, что затрудняет их применение в данной области и не позволяет эффективно использовать избыточность для оптимизации приведенных выше технологических параметров дуговой сварки. Однако оптимальная ориентация шва относительно вектора гравитации позволяет существенно увеличить скорость обработки шва, а также повысить качество сварного соединения. С другой стороны, учитывая низкую, по сравнению с промышленным роботом (ПР), скорость движения суставов позиционера, смена ориентации изделия перед обработкой каждого шва приводит к значительному увеличению общего времени обработки всей детали. Таким образом, возникает необходимость определения компромисса между требованием оптимальной ориентации швов и минимизацией времени, затрачиваемого на смену ориентации изделия. В известных работах, посвященных вопросам управления кинематически избыточными системами, рассматриваются лишь общие вопросы управления, не затрагивающие конкретные области применения и, соответственно, не учитывающие указанную специфику дуговой сварки.

Решение указанной проблемы позволит повысить эффективность использования и снизить стоимость внедрения роботизированных комплексов при мелкосерийном производстве, требующем частой переналадки технологического оборудования, что характерно для малых и средних предприятий, на которые ориентирована современная экономика Республики Беларусь.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Диссертационная работа выполнена на кафедре автоматического управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектрони-

ки в рамках научно-исследовательских работ: “Разработка научных основ автоматизированного проектирования роботизированных комплексов на базе избыточных манипуляционных систем” (№ ГР1999434); “Разработать теоретические основы оптимального управления промышленными роботами в рабочей среде с препятствиями” (№ ГР 20031709); “Разработка теоретических основ автоматизированного проектирования и программирования роботизированных комплексов для обработки трехмерных крупногабаритных объектов сложной формы” (№ ГР19987024).

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка методов и алгоритмов автоматизированного синтеза оптимальных программных движений промышленных роботов и манипуляторов изделия в РТК дуговой сварки с учетом кинематической избыточности манипуляционных систем и технологических особенностей процесса сварки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать кинематическую модель РТК сварки, а также методы решения прямой и обратной задач кинематики для системы робот-позиционер с учетом технологических требований процесса сварки;
- 2) разработать алгоритм оптимизации движений манипулятора изделия в РТК дуговой сварки для объектов с большим количеством швов с учетом ограничений на ориентацию изделия;
- 3) разработать автоматизированный алгоритм синтеза компоновки РТК дуговой сварки, обеспечивающий оптимальное взаимное расположение робота, изделия и позиционера с учетом технологических ограничений;
- 4) реализовать программно алгоритмы оптимизации движений манипулятора изделия и алгоритм синтеза компоновки РТК сварки, а также исследовать эффективность этих алгоритмов для решения реальных промышленных задач.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются трехмерные модели роботизированных технологических комплексов дуговой сварки. Предметом исследования являются методы и алгоритмы автоматизированного синтеза программных движений манипуляторов изделия применительно к операциям дуговой сварки.

Методология и методы проведения исследования. Для решения рассматриваемых в диссертационной работе задач использован современный математический аппарат, базирующийся на матричном анализе, однородных преобразованиях, динамическом и генетическом программировании, а также на методах трехмерного моделирования.

Научная новизна и значимость полученных результатов. К числу новых научных результатов относятся следующие:

- 1) разработан новый метод решения обратной задачи кинематики для избыточных манипуляционных систем, который, в отличие от известных, позволяет повысить эффективность управления движением инструмента и изделия при операциях дуговой сварки;
- 2) разработаны алгоритмы синтеза оптимальных движений манипулятора изделия в составе РТК дуговой сварки, которые, в отличие от известных, позволяют повысить качество швов, а также минимизировать суммарное время сварки и смены ориентации изделия;
- 3) разработан алгоритм нахождения оптимального взаимного расположения робота и позиционера, который, в отличие от известных, учитывает изменение ориентации изделия при обработке различных групп швов.

Практическая значимость полученных результатов. Результаты диссертационной работы внедрены и используются для синтеза управляющих программ манипулятора изделия на производственном предприятии “БелМетИзделие” (г. Минск), интегрированы в программный комплекс управления роботизированным комплексом дуговой сварки на РУП “ЗСКА” (г. Минск), а также используются в учебном процессе на кафедре автоматического управления БГУИР в дисциплинах “Системы управления промышленными роботами” и “Разработка управляющих программ промышленных роботов”.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие научные положения:

- метод решения обратной задачи кинематики для избыточных манипуляционных систем, учитывающий технологические особенности дуговой сварки;
- алгоритмы синтеза программных движений манипулятора изделия, позволяющие оптимизировать технологические параметры сварки и сократить время обработки изделия за счет минимизации времени переориентации;
- алгоритм определения оптимального взаимного расположения робота и позиционера, учитывающий изменение ориентации изделия при обработке групп швов.

Личный вклад соискателя. Все предлагаемые методы разработаны и программно реализованы лично автором. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов. Научный руководитель принимал участие в постановке задач и определении возможных путей решения.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10th IFAC Symposium on

Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2001, (Vienna, Austria, Sept. 20-22, 2001); II Международной научно-практической конференции “Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы” (Новочеркасск, Россия, 2001); II Международной научно-практической конференции “Моделирование. Теория, методы и средства” (Новочеркасск, Россия, 2002); II Республиканской научно-технической конференции студентов и аспирантов “Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях” (Гомель, Беларусь, 1999); Шестом международном молодежном форуме “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (Харьков, Украина, 2002); Международной научно-технической конференции “Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов” (Минск, Беларусь, 2003); II Белорусско-российской научно-технической конференции “Технические средства защиты информации” (Минск - Нарочь, 2004); Международной научно-технической конференции “Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах” (Минск, Беларусь, 2004).

Опубликованность результатов. По материалам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, включая 4 статьи в научно-технических журналах, 4 статьи в материалах международных конференций и 4 тезисов докладов научных конференций. Суммарный объем публикаций составляет около 62 печатных страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Она содержит 86 страниц основного текста, 47 рисунков на 20 страницах, 8 таблиц на 8 страницах, 7 приложений на 51 странице, в списке использованных источников на 9 страницах представлено 121 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируются задачи и цели исследования.

В первой главе проведен анализ современных систем автоматизации процессов дуговой сварки на базе промышленных роботов, а также рассмотрены современные технологии и режимы дуговой сварки. В результате установлено, что в роботизированной сварке существенное значение имеет соблюдение определенной ориентации шва относительно вектора гравитации и сварочной горелки относительно шва. Показано, что наиболее эффективным с точки зрения производительности сварки и качества шва является использование манипулятора изделия с целью приближения ориентации шва к оптимальному значению. Однако наличие кинематической избыточности манипуляционной системы робот-позиционер существенно усложняет процесс программирования и управления РТК в режиме реального времени. Существующие САПР РТК обеспечивают автономный режим программирования и имеют средства моделирования манипуляционных систем промышленных роботов, но в то же время имеют ограниченные средства обучения и моделирования движения манипуляторов изделия. Поэтому к числу актуальных задач, возникающих при автоматизации программирования РТК дуговой сварки, относится разработка эффективных методов решения обратной задачи кинематики робота и позиционера, учитывающих такие технологические особенности РТК дуговой сварки, как ориентация шва относительно вектора гравитации и ориентация горелки относительно шва.

Вторая глава посвящена кинематике избыточных манипуляционных систем, применяемых в РТК дуговой сварки. В ней предлагаются методы решения прямой и обратной задач кинематики для системы робот-позиционер с учетом технологических требований процесса сварки.

При моделировании сварной конструкции рассматривается два типа швов (линейный и круговой), которые могут быть реализованы современными ПР. Математическая модель линейного шва представлена скользящим фреймом (рис. 1) с осями, ориентированными по следующим правилам: ось X направлена вдоль сварного соединения; ось Y указывает направление подхода инструмента, а ось Z дополняет фрейм до правой тройки векторов. В результате кинематическая модель сварного шва описывается следующим выражением $W(l) = W_0 \cdot [l \ 0 \ 0 \ 1]^T$; $0 \leq l \leq L$, где l – перемещение сварочного инструмента, L – длина шва, а W_0 матрица однородного преобразования размерностью 4×4 , указывающая на начало шва. Эту матрицу можно получить, используя соответствующий вектор направления шва n_{w0} (ось X), вектор подхода инструмента s_{w0} и точку начала шва – вектор p_{w0} :

$$W_0 = \begin{bmatrix} n_{w0} & s_{w0} & n_{w0} \times s_{w0} & p_{w0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

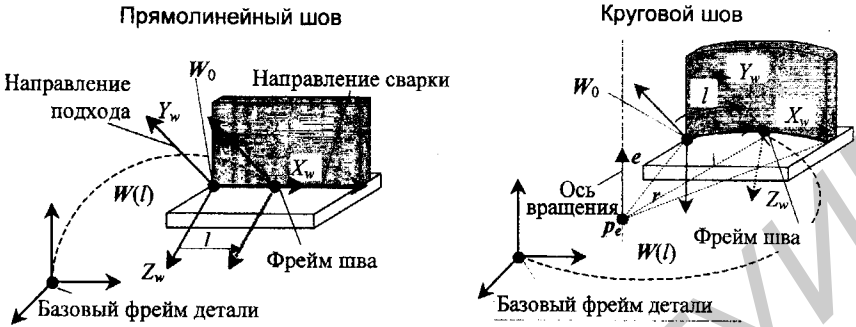


Рис.1 Определение фрейма сварного шва.

При этом вектор s_w направлен вдоль биссектрисы угла, образованного свариваемыми поверхностями. Подобный подход используется и для кругового шва, но скользящий фрейм рассчитывается как касательная оси X к линии сварки в каждой точке. С учетом приведенных обозначений расположение шва в мировой системе координат (СК) описывается следующим выражением:

$${}^0W(l) = [{}^0T_{PB} \cdot P(q) \cdot {}^{PF}T_{WB}] \cdot W(l), \quad (2)$$

где матрица ${}^0T_{PB}$ определяет положение позиционера в мировой СК, матрица ${}^{PF}T_{WB}$ описывает положение точки крепления детали относительно фланца позиционера, а матричная функция $P(q)$ описывает кинематическую модель позиционера в зависимости от вектора обобщенных координат q .

Ориентацию шва относительно вектора гравитации предлагается задавать двумя углами: $\theta \in [-\pi/2; \pi/2]$ – *наклон шва*, т.е. угол между направлением шва n_w и плоскостью X_0Y_0 ; $\xi \in [-\pi; \pi]$ – *крен шва*, т.е. угол между направлением подхода s_w и вертикальной плоскостью, в которой лежат вектор n_w и ось Z_0 .

Численные выражения для этих углов получены непосредственно из определения RPY-углов, принимая во внимание, что нулевое значение углов θ , ξ определяет горизонтальную ориентацию оси X_w и вертикальную ориентацию Y_w :

$${}^0W_R = R_z(\psi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_x(\pi/2 - \xi), \quad (3)$$

где 0W_R – подматрица ориентации шва размерностью 3×3 ; R_x , R_y , R_z – матрицы вращения вокруг осей X , Y , Z соответственно, размерностью 3×3 , а ψ – произвольный параметр. После перемножения этих матриц углы ориентации шва θ и ξ могут быть представлены в виде:

$$\theta = \operatorname{atan}2 \frac{-{}^0n_w^z}{\sqrt{({}^0s_w^z)^2 + ({}^0a_w^z)^2}}; \quad \xi = \operatorname{atan}2 \frac{{}^0a_w^z}{{}^0s_w^z}, \quad (4)$$

где n_w, s_w, a_w – соответствующие векторы-столбцы ортогональной матрицы 0W_R .

В РТК сварки желаемая ориентация шва относительно вектора гравитации достигается с помощью позиционера, который устанавливает требуемые значение наклона и крена шва, изменяя обобщенные координаты. Используя кинематическую модель (2), задачи ориентации шва при помощи позиционера можно определить следующим образом.

Прямая задача кинематики. Для заданных значений обобщенных координат позиционера q и известных матриц однородного преобразования ${}^0T_{PB}$, ${}^{PF}T_{WB}$, а также известного положения шва относительно базовой точки детали W найти ориентацию фрейма шва в мировой системе координат 0W и углы наклона/крена (θ, ξ) .

Обратная задача кинематики 1. Для заданных значений углов наклона и крена шва (θ, ξ) , и известных однородных матриц преобразования ${}^0T_{PB}$, ${}^{PF}T_{WB}$ и положения шва W найти значения обобщенных координат позиционера q .

Существует альтернативная формализация обратной задачи кинематики, основанная на упрощенной версии выражения (2), и описывающая преобразование единичного вектора

$${}^0s_w = \left[{}^0T_{PB} \cdot P(q) \cdot {}^{PF}T_{WB} \right]_{3 \times 3} \cdot s_w, \quad (5)$$

Обратная задача кинематики 2. Для заданного в мировой системе координат вектора подхода 0s_w , а также для известных матриц однородного преобразования ${}^0T_{PB}$, ${}^{PF}T_{WB}$ и положения сварного шва относительно основания детали (вектор s_w) найти значение обобщенных координат позиционера q .

Решением прямой задачи кинематики является произведение матриц элементарного преобразования, которое можно получить непосредственно из кинематической схемы позиционера (рис. 2):

$$P(q_1, q_2) = {}^{PB}T_1 \cdot R_x(q_1) \cdot {}^1T_2 \cdot R_z(q_2), \quad (6)$$

где ${}^{PB}T_1 = T_x(a_1) \cdot T_z(d_1) \cdot R_y(-\alpha)$, ${}^1T_2 = R_y(\alpha) \cdot T_x(a_2) \cdot T_z(d_2)$, а $T(\cdot)$, $R(\cdot)$ – матрицы однородного преобразования размерностью 4×4 .

Ниже приведены решения для обеих формулировок ОЗК позиционера.

Задача ОЗК–1. Поскольку углы ориентации шва полностью определяют третью строку матрицы 0W_R , то выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$\eta^T \cdot {}^0W_R = \eta^T \cdot \left[{}^0T_{PB} \cdot P(q) \cdot {}^{PF}T_{WB} \right]_{3 \times 3} \cdot W_R, \quad (7)$$

где индекс 3×3 означает подматрицу вращения соответствующей матрицы однородного преобразования, а $\eta^T = [0 \ 0 \ 1]$. Далее, после соответствующего умножения матриц выражение (7) может быть приведено к виду: $v^T = \eta^T \cdot P(q)_{3 \times 3}$, где $v^T = [-S_\theta \ C_\theta C_\xi \ C_\theta S_\xi] \cdot [{}^{PF}T_{WB} \cdot W]_{3 \times 3}^T$, откуда получаем систему трех скалярных уравнений, решение которых дает выражения для q_1 и q_2 :

$$q_1 = \pm \operatorname{acos} \frac{v_z - S_\alpha^2}{C_\alpha^2}, \quad q_2 = \operatorname{atan2} \frac{S_1 \cdot v_x - S_\alpha V_1 \cdot v_y}{S_1 \cdot v_y + S_\alpha V_1 \cdot v_x}. \quad (8)$$



Рис.2 Кинематическая схема системы "робот-позиционер"

Задача ОЗК-2. Поскольку для второй формулировки ОЗК входные данные определяются вторым столбцом матрицы 0W_R , то выражение (2) можно переписать следующим образом:

$${}^0W_R \cdot \eta = [{}^0T_{PB} \cdot P(q) \cdot {}^{PF}T_{WB}]_{B \times 3} \cdot W_R \cdot \eta, \quad (9)$$

где $\eta = [0 \ 1 \ 0]^T$. После соответствующих перемножений матриц выражение (9) трансформируется в следующую форму:

$$u = P(q)_{3 \times 3} \cdot w, \quad (10)$$

где $w = [{}^{PF}T_{WB} \cdot W]_{3 \times 3} \cdot \eta$, а $u = [{}^0T_{PB}]_{B \times 3} \cdot {}^0W_R \cdot \eta$.

Дальнейшее разложение $P(q)$ позволяет получить выражения для q_1 и q_2 :

$$q_1 = \operatorname{atan2} \frac{u_y}{u_{xz}} \pm \operatorname{acos} \frac{(u_z - w_z) + C_\alpha u_{xz}}{C_\alpha \cdot \sqrt{u_x^2 + u_y^2}}, \quad q_2 = \operatorname{atan2} \frac{w_x \cdot v_y - w_y \cdot v_x}{w_x \cdot v_x + w_y \cdot v_y}, \quad (11)$$

где $u_{xz} = S_\alpha u_x - C_\alpha u_z$, $v_x = u_x + S_\alpha (S_1 u_y - V_1 u_{xz})$, $v_y = C_1 u_y - S_1 u_{xz}$.

На основе полученных выражений построена область допустимых значений входных параметров (ориентационное пространство) и определены сингулярные состояния позиционера.

Третья глава посвящена оптимизации управления манипулятором изделия в процессе дуговой сварки. В ней рассматриваются задача анализа достижимости углов ориентации шва (θ, ξ) при различном расположении изделия на позиционере, а также задачи оптимальной группировки швов и нахождения оптимальной траектории позиционера, обеспечивающих минимум суммарного времени сварки и движения позиционера.

Для оценки "качества" ориентации шва использовалась следующая функция, учитывающая увеличение времени сварки при отклонении шва от оптимальной ориентации относительно вектора гравитации:

$$F_{\tau}(\theta, \xi, \alpha, \beta) = (F_{v_0} + \eta_{\theta}(|\theta| - \theta_0)^2 + \eta_{\xi}(|\xi| - \xi_0)^2 + \eta_{\alpha}(\alpha - \alpha_0)^2 + \eta_{\beta}(\beta - \beta_0)^2) \cdot l, \quad (12)$$

где $\theta_0, \xi_0, \alpha_0, \beta_0$ – оптимальные значения соответствующих углов, $\eta_{\theta}, \eta_{\xi}, \eta_{\alpha}, \eta_{\beta}$ – весовые коэффициенты, учитывающие влияние отклонения соответствующего угла от оптимума на скорость сварки, l – длина шва, F_{v_0} – константа, определяющая скорость сварки в оптимальном для данного типа шва положении.

Тогда суммарное время сварки одной группы швов определяется следующим выражением:

$$\sum_i F_{\tau}(F_{\theta_i}(q_P), F_{\xi_i}(q_P), F_{\alpha_i}(q_P, q_R), F_{\beta_i}(q_P, q_R)) \cdot l_i \rightarrow \min_{q_P}, \quad (13)$$

где $F_{\theta_i}(q_P)$ и $F_{\xi_i}(q_P)$ – функции влияния углов θ и ξ на время сварки шва в зависимости от конфигурации позиционера q_P , а $F_{\alpha_i}(q_P, q_R)$ и $F_{\beta_i}(q_P, q_R)$ – функции влияния углов α и β на время сварки шва в зависимости от конфигурации позиционера q_P и робота q_R . Для минимизации выражения (13) необходимо найти оптимальное значение обобщенных координат позиционера q_P , которые обеспечивают "компромиссную" ориентацию всех швов, входящих в группу. При этом следует учитывать, что кинематическая структура позиционера в общем случае не позволяет обеспечить любые углы ориентации шва (θ и ξ) относительно вектора гравитации. Однако на диапазон достижимых углов θ и ξ можно влиять путем изменения ориентации шва относительно планшайбы позиционера, используя различную оснастку для крепления детали.

Если ориентация шва относительно планшайбы позиционера определяется с помощью углов (θ_w, ξ_w, ψ_w), имеющих тот же смысл, что и углы θ, ξ и ψ (3), то ориентация шва в мировой СК описывается выражением:

$${}^0T_F(q_1, q_2)^F T_W(\theta_w, \xi_w, \psi_w) = {}^0T_W, \quad (14)$$

где ${}^0T_F(q_1, q_2)$ – матрица ориентации планшайбы детали относительно мировой СК, ${}^FT_W(\theta_w, \xi_w, \psi_w)$ – матрица ориентации шва относительно планшайбы, 0T_W – матрица ориентации шва в мировой СК. С учетом равенства (4) и (14) выражения для углов θ и ξ имеют следующий вид:

$$\xi = \text{atan2} \frac{{}^0n_F^z \cdot {}^F a_w^x + {}^0s_F^z \cdot {}^F a_w^y + {}^0a_F^z \cdot {}^F a_w^z}{{}^0n_F^z \cdot {}^F s_w^x + {}^0s_F^z \cdot {}^F s_w^y + {}^0a_F^z \cdot {}^F s_w^z}, \quad (15)$$

$$\theta = \text{atan2} \frac{-({}^0n_F^z \cdot {}^F n_w^x + {}^0n_F^z \cdot {}^F n_w^y + {}^0a_F^z \cdot {}^F n_w^z)}{\sqrt{({}^0n_F^z \cdot {}^F s_w^x + {}^0s_F^z \cdot {}^F s_w^y + {}^0a_F^z \cdot {}^F s_w^z)^2 + ({}^0n_F^z \cdot {}^F a_w^x + {}^0s_F^z \cdot {}^F a_w^y + {}^0a_F^z \cdot {}^F a_w^z)^2}}. \quad (16)$$

На основе соотношений (15) и (16) были получены уравнения, которые позволили исследовать изменение области допустимых значений обобщенных координат позиционера q_1, q_2 при различной ориентации шва относительно планшайбы (θ_w, ξ_w) . Из анализа полученных результатов следует, что максимальный объем ориентационного пространства достигается при установке детали таким образом, что шов находится в положении, близком к оптимальному (отклонение шва не превышает значения $\Delta_{\text{доп}}$). При отклонении шва от оптимального положения можно наблюдать значительное изменение формы и объема ориентационного пространства. При дальнейшем отклонении (на угол более $3 \cdot \Delta_{\text{доп}}$) объем и форма изменяются незначительно.

Поскольку оптимальное ориентационное пространство для отдельной группы сварных соединений представляет собой несвязанное в общем случае множество в пространстве обобщенных координат позиционера \mathcal{Q}^k , то актуальной является задача нахождения оптимального пути обхода заданной последовательности групп швов. При этом предполагается, что имеется заданная последовательность из n групп швов $\{W_1^1\}, \{W_1^2\}, \dots, \{W_1^n\}$ размером m_1, m_2, \dots, m_n соответственно. Каждая группа швов обрабатывается в фиксированной конфигурации манипулятора $q^k \in \mathcal{Q}^k$ из $\{\mathcal{Q}^1\}, \{\mathcal{Q}^2\}, \dots, \{\mathcal{Q}^n\}$, где \mathcal{Q}^k множество конфигураций позиционера, в которых выражение (13) отклоняется от минимума не более, чем на заданную величину $\Delta_{\text{доп}}$, т.е. каждому $\{W_i^k\}$ соответствует область \mathcal{Q}^k , в пределах которой обработка всех швов группы является допустимой. Тогда время обхода заданной последовательности швов определяется как

$$T'' = \sum_{k=1}^n \left(\max_i \{ \eta_i | q_i^k - q_i^{k+1} \} + t_{\text{app}} \cdot \begin{cases} 1, & q^k \neq q^{k+1} \\ 0, & q^k \equiv q^{k+1} \end{cases} + \sum_i \Omega_i \cdot \begin{cases} 1, & q_i^k \neq q_i^{k+1} \\ 0, & q_i^k \equiv q_i^{k+1} \end{cases} \right), \quad q_i^k \in \mathcal{Q}^k, \quad (17)$$

где η_i – весовые коэффициенты, определяемые скоростью движения звеньев позиционера, t_{app} – время отхода/подхода инструмента и Ω_i – штраф на движение i -ым суставом.

В результате задача оптимального управления манипулятором при сварке группы швов состоит в следующем: *необходимо найти такие значения q^k , которые обеспечат минимум критерия (17) с учетом ограничений на конфигурацию манипулятора $q^k \in Q^k$, а также весовых коэффициентов η_i , определяемых скоростью движения каждого звена позиционера и времени подхода инструмента t_{app}* . Поскольку области Q^k имеют сложную прерывную форму, то целесообразно аппроксимировать их равномерной сеткой. Такая аппроксимация преобразует область поиска решений в направленный граф, каждый узел которого определяет вектор конфигурации позиционера q^k . При этом ребра графа соединяют только те узлы сетки, которые соответствуют соседним областям в заданной последовательности $\{Q^1\}, \{Q^2\}, \dots, \{Q^n\}$. Поэтому допустимое пространство поиска может быть представлено направленным графом с узлами

$$K = \{q_j^k\}, \quad q_j^k \in Q^k \quad (18)$$

и ребрами

$$E = \left\{ \langle q_j^k, q_i^{k-1} \rangle, q_j^k \in Q^k, q_i^{k-1} \in Q^{k-1}, k = 2 \dots n, \forall j, l \right\}. \quad (19)$$

В результате рассматриваемая задача нахождения конфигураций позиционера для обработки последовательности групп швов сводится к следующей оптимизационной задаче на графе: *для заданных множеств узлов K и множеств ребер E найти путь $P = \langle Q^1 \rightarrow Q^2 \rightarrow \dots \rightarrow Q^n \rangle$ с начальным узлом $K_0 \in Q^0$ и конечным узлом $K_n \in Q^n$, который минимизирует критерий качества (17)*. Для решения данной задачи использован метод динамического программирования, основанный на рекуррентном соотношении

$$T_{r+1}^*(p_j^{r+1}) = \min_i \left[T_r^*(p_i^r) + T^r(p_i^r, p_j^{r+1}) \right], \quad (20)$$

где $T_r^*(p_i^r)$ – оптимальное значение времени перехода при обходе группы швов с индексами $1 \dots r$.

В большинстве случаев технология сварки допускает произвольную последовательность обработки групп швов, что позволяет минимизировать время смены ориентации изделия путем определения оптимальной последовательности обхода. Задача нахождения оптимальной последовательности формулируется следующим образом: *найти такую последовательность обобщенных координат позиционера $\{q^{k_1}, q^{k_2}, \dots, q^{k_n}\}$, которая бы обеспечивала минимальное время (17) обхода всех q^k при заданных ограничениях $q^k \in Q^k$ и $k_j = \text{const}$ для некоторых j* . Последнее ограничение обеспечивает фиксированную позицию для некоторых групп швов, используемых для "прихватки" или уменьшения сварочных деформаций. Поставленная задача

является обобщением классической задачи комбинаторной оптимизации "о коммивояжере", в которой узловые точки пути заданы с точностью до несвязных множеств. В данной работе используется метод два-перестановки, усовершенствованный применительно к рассматриваемой задаче, причем, в отличие от классического метода два-перестановки предложенный алгоритм использует оригинальную процедуру вычисления целевой функции, основанную на динамическом программировании.

Проведенный сравнительный анализ эффективности и быстродействия разработанного алгоритма и метода полного перебора показал, что алгоритм 2-перестановки дает оптимальное или квазиоптимальное решение за гораздо меньшее время. Причем, при количестве групп швов более 10 при сетке 5 градусов, и более 6 при сетке 1 градус, алгоритм перебора вообще не позволяет получить решение за приемлемое время.

В рассмотренных выше задачах оптимизации траектории позиционера предполагалось, что швы уже объединены в фиксированные группы. Однако сама процедура группировки швов также дает возможность оптимизации с целью уменьшения времени их обработки.

С учетом приведенных обозначений задача группировки швов, формулируется следующим образом: *найти разбиение совокупности швов $\{W_i\}$ на оптимальное количество непересекающихся подмножеств $W^{(1)} \dots W^{(n)}$ таких, что $W^{(i)} \cap W^{(j)} = \emptyset$, $i \neq j$ и $\cup_i W^{(i)} = \{W_i\}$, обеспечивающих при этом минимум суммарного времени обхода всех групп швов (17) и минимум суммарного времени сварки всех швов определяемого выражением*

$$T^{\text{weld}} = \sum_i F_t (F_{\theta_i}(q_P), F_{\xi_i}(q_P)) \cdot l_i. \quad (21)$$

Поскольку данная задача является NP-сложной, то в работе предлагается эвристический алгоритм группировки швов, основанный на взаимной близости ориентации швов относительно вектора гравитации. Исходя из содержательного смысла задачи, функция расстояния между двумя швами определена следующим образом:

$$\rho_{ij} = \sqrt{w_\theta^2 (|\theta_i| - |\theta_j|)^2 + w_\xi^2 (|\xi_i| - |\xi_j|)^2}, \quad (22)$$

где w_θ и w_ξ – весовые коэффициенты, определяющие влияние соответствующего угла ориентации на время сварки. Тогда рассматриваемую задачу группировки швов можно свести к классической проблеме кластеризации точек на плоскости. Для решения этой задачи были выбраны два алгоритма: k-средних и модификация алгоритма ISODATA, входными параметрами которого, в отличие от классического случая, являются Δ_{max}^θ , Δ_{max}^ξ – максимальное удаление точки от центра кластера по каждой координате (θ, ξ), и Δ_{min}^θ , Δ_{min}^ξ – минимальное расстояние между кластерами. Такая параметризация является более удобной с точки зрения задач дуговой сварки, т.к. по-

звolyет управлять группировкой швов, задавая максимальное отклонение угла $\theta \xi$ от оптимального значения внутри группы.

Как показали проведенные эксперименты, использование предложенных алгоритмов дает значительное сокращение времени перехода между группами швов (до 20 %) и сокращает время обработки швов (до 10 %).

Четвертая глава посвящена программной реализации алгоритмов оптимизации движения позиционера, группировки швов и синтеза компоновки

РТК. Разработанные алгоритмы интегрированы в САПР Robomax (рис. 3) и впервые позволили автоматизировать процесс обучения позиционера с учетом технологических требований дуговой сварки. Разработанные программные средства предоставляют разработчику набор инструментов, позволяющий объединять швы в кластеры по признаку близости ориентации относительно вектора гравитации, как в автоматическом, так и в ручном режиме; находить оптимальную ориентацию позиционера для каждого кластера (из выбранного набора), а также такую последовательность обработки кластеров, которая минимизирует суммарное время сварки и смены ориентации изде-

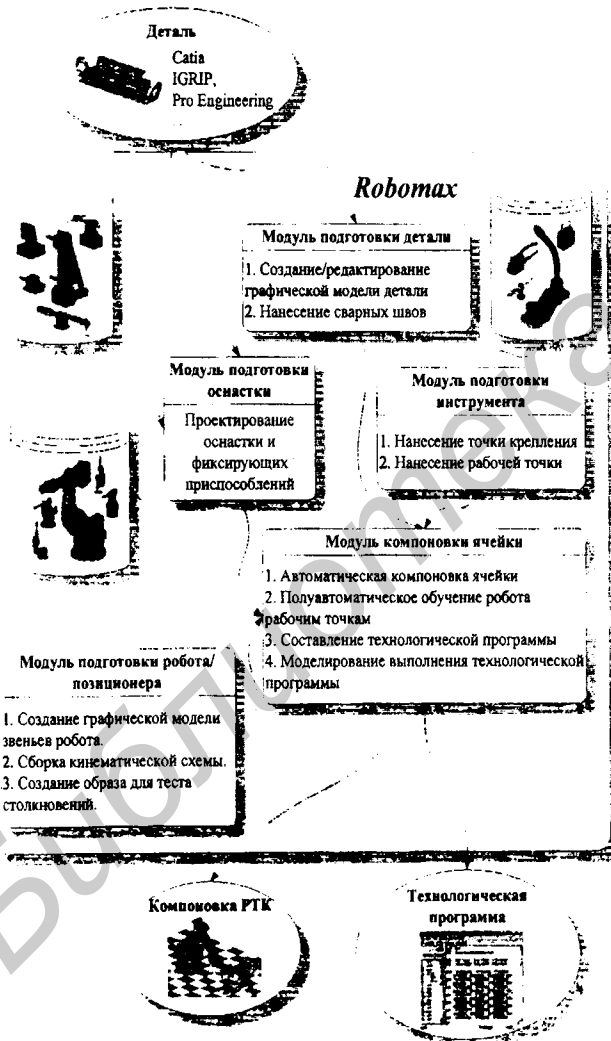


Рис. 3. Программные модули САПР ROVOMAX и их назначение

ля; определять взаимное положение робота и позиционера с учетом изменения ориентации изделия при обработке каждой группы швов. Разработан метод автоматизированного программирования РТК дуговой сварки с манипулятором изделия, позволяющий синтезировать компоновку РТК и генерировать управляющую программу для позиционера, обеспечивая при этом минимум суммарного времени обработки изделия с учетом особенностей процесса дуговой сварки. Эффективность разработанного метода подтверждена практическим применением на РУП "ЗСК" (г.Минск) и ПП "БелМетИзделие" (г.Минск) при подготовке управляющих программ роботизированной сварки металлоконструкций различной формы.

Приложения содержат: листинги программ синтеза оптимальных траекторий позиционера; группировки швов; оптимизации положения робота в РТК сварки, с учетом кинематической избыточности; исходные данные и результаты моделирования; листинги программного модуля обучения позиционера встроенного в ROBOMAX; акты внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработан новый метод решения обратной задачи кинематики для избыточных манипуляционных систем, состоящих из промышленного робота и манипулятора изделия. В отличие от известных, разработанный метод позволяет получить решение обратной задачи кинематики, входными параметрами для которого являются углы ориентации инструмента относительно шва, а также шва относительно вектора гравитации. Это позволяет повысить эффективность управления движением инструмента и изделия при операциях дуговой сварки [1, 5, 6, 8, 9, 10].

2. Разработаны алгоритмы синтеза оптимальных движений манипулятора изделия в составе РТК дуговой сварки. В отличие от известных, предложенные алгоритмы используют кинематическую избыточность системы "робот-позиционер" для минимизации времени рабочего цикла и улучшения качества сварного соединения. Объединение швов в группы с близкой взаимной ориентацией позволяет минимизировать количество движений позиционера. При этом для минимизации времени, затрачиваемого на изменение ориентации изделия, допускается отклонение ориентации группы швов от оптимального значения, обеспечивающего минимум времени сварки. В результате создано алгоритмическое обеспечение, позволяющее получить траекторию движения позиционера с минимальным суммарным временем, затрачиваемым на обработку швов сварной конструкции и изменение ориентации изделия. Полученная траектория также обеспечивает обработку швов в положении, близком к оптимальному. Проведены исследования эффективно-

сти предложенного алгоритма и показана его эффективность при решении задач высокой размерности [2, 3, 4, 7, 11, 12].

3. Разработан алгоритм автоматизированного синтеза компоновки РТК дуговой сварки, который, в отличие от известных, учитывает кинематическую избыточность манипуляционной системы "робот-позиционер", а также особенности сварки изделий с большим количеством коротких швов с различной пространственной ориентацией. Алгоритм основан на разбиении пространства поиска положения робота равномерной решеткой и проверкой достижимости роботом каждой группы швов при оптимальной ориентации позиционера. В результате находится взаимное расположение робота и позиционера минимизирующее суммарное время изменения ориентации детали и обработки швов [2, 5].

4. Разработаны и интегрированы в САПР Robotax программные модули для синтеза оптимальных программных движений позиционера, а также для автоматизированного синтеза компоновки РТК дуговой сварки с учетом наличия позиционера, что позволяет производить оптимизацию положения робота относительно позиционера с учетом изменения ориентации детали для обработки каждой группы швов. Разработан модуль для автоматизированного программирования РТК сварки, который позволяет генерировать управляющую программу для системы управления РТК в автоматическом режиме с учетом технологических особенностей процесса дуговой сварки [1, 5, 6, 7, 8, 9].

Эффективность полученных результатов подтверждена практическим применением при решении реальных производственных задач. Разработанные в диссертационной работе методы и алгоритмы внедрены на производственном предприятии "БелМетИзделие" (г.Минск) для автоматизации проектирования управляющих программ манипуляторов изделия, интегрированы в программный комплекс управления роботизированным комплексом дуговой сварки на РУП "ЗСКА" (г.Минск), а также используются в учебном процессе на кафедре автоматического управления БГУИР в дисциплинах "Системы управления промышленными роботами" и "Разработка управляющих программ промышленных роботов".

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научно-технических журналах

1. Pashkevich A. , Dolgui A. , Semkin K. Kinematic aspects of a robot-positioner system in an arc welding application // Control Engineering Practice, IFAC journal, 2003. – Vol 11/6. – P. 633 – 647.
2. Сёмкин К.И. Автоматизация проектирования роботизированных технологических комплексов дуговой сварки с использованием манипулятора изделия // Информатика – Минск, 2005. – №1(5). – С. 112-122.
3. Сёмкин К. И. Оптимизация ориентации детали относительно позиционера при роботизированной сварке // Известия Белорусской инженерной академии. – Минск, 2004. – №1(17)/2. – С. 48-50.
4. Сёмкин К. И. Оптимальное управление манипулятором изделия при сварке группированных швов // Доклады БГУИР. – Минск, 2005. – №1 (9). – С. 93-97.

Статьи в материалах международных конференций

5. Pashkevich A., Dolgui A., Zaikin O., Semkin K. Integrated design of robotic welding systems // In: Information Control Problems in Manufacturing 2001. A Proceedings volume from the 10th IFAC Symposium, Vienna, Austria, 20-22 September 2001., Elsevier Science, 2002. – P. 269-275.
6. Сёмкин К. И. Математическая модель системы "позиционер-изделие" для робототехнических комплексов дуговой сварки // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 2002. – С. 49-53.
7. Сёмкин К. И. Оптимальное управление манипулятором изделия в составе РТК дуговой сварки при обработке большого количества швов // Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах: Материалы Международной научно-технической конференции. – Минск, 2004. – С. 319-322.
8. Сёмкин К. И. Оптимальное управление позиционером для задач дуговой сварки // Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы: Материалы II Междунар. Науч.-практ. конф., – Новочеркасск, 2001. – С. 18-20.

Тезисы докладов

9. Пашкевич А. П. Сёмкин К. И. Статистический контроль качества при роботизированной дуговой сварке // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы II Республиканской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Гомель, 1999. – С.84-85.

10. Сёмкин К. И. Управление позиционером с учетом технологических особенностей дуговой сварки // 6-й Международный молодежный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке. – Харьков, 2002.– Ч.2. – С. 142-143.
11. Сёмкин К. И. Проблемы оптимального управления манипулятором изделия в процессе дуговой сварки. // Технические средства защиты информации: Тез. докл. II Белорусско-российской научно-технической конференции. 17 мая - 21 мая. – Минск – Нарочь, 2004. – С 42.
12. Сёмкин К. И. Оптимальное расположение детали на манипуляторе изделия в задачах дуговой сварки // Современные проблемы радиоэлектроники: седьмая Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и студентов.– Красноярск, 5 - 6 мая 2005. – С. 476 - 478.



РЭЗЮМЭ

дысертацыі Сёмкіна Канстанціна Іосіфавіча

"Аўтаматызацыя праектавання РТК дугавой зваркі на базе надмерных маніпуляцыйных сістэм "

Ключавыя словы: прамысловы робат, пазіцыянер, маніпулятар вырабу, аўтаматызацыя праектавання, дугавая зварка, off-line праграмаванне.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца трохмерныя мадэлі рабатызаваных тэхналагічных комплексаў дугавой зваркі. Прадметам даследавання з'яўляюцца метады і алгарытмы аўтаматызаванага сінтэзу праграмных рухаў маніпулятараў вырабу ў дачыненні да аперацый дугавой зваркі.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка метадаў і алгарытмаў аўтаматызаванага сінтэзу аптымальных праграмных рухаў прамысловых робатаў у РТК дугавой зваркі з улікам кінематычнай надмернасці маніпуляцыйных сістэм і тэхналагічных асаблівасцей працэсу зваркі.

Распрацован новы метады вырашэння адваротнай задачы кінематыкі для надмерных маніпуляцыйных сістэм, якія складаюцца з прамысловага робата і маніпулятара вырабу, які дазваляе павысіць эфектыўнасць кіравання рухам прылады і вырабу пры аперацыях дугавой зваркі. Распрацованы алгарытмы сінтэзу аптымальных рухаў маніпулятара вырабу ў складзе РТК дугавой зваркі, якія выкарыстоўваюць кінематычную надмернасць сістэмы робат-пазіцыянер для мінімізацыі часу працоўнага цыклу і паляпшэння якасці зварнога злучэння. Пры гэтым зварныя злучэнні аб'ядноўваюцца ў гурты з блізкай узаемнай арыентацыяй, што дазваляе мінімізаваць колькасць рухаў пазіцыянера. Праведзены доследы эфектыўнасці прапанаванага алгарытму і паказана яго працаздольнасць пры вырашэнні задач высокай памернасці. Распрацован алгарытм аўтаматызаванага сінтэзу кампануюкі РТК дугавой зваркі, які ўлічвае кінематычную надмернасць маніпуляцыйнай сістэмы робат-пазіцыянер, а таксама асаблівасці зваркі вырабаў з вялікай колькасцю кароткіх зварных злучэнняў з рознай прасторавай арыентацыяй. У выніку знаходзіцца такое ўзаемае размяшчэнне робата і пазіцыянера, пры якім мінімізуецца сумарны час змянення арыентацыі дэталі і апрацоўкі зварных злучэнняў.

Выканана праграмная рэалізацыя распрацаваных алгарытмаў і зроблена іх інтэграцыя ў САПР Robomax.

РЕЗЮМЕ

диссертации Сёмкина Константина Иосифовича

"Автоматизация проектирования РТК дуговой сварки на базе избыточных манипуляционных систем"

Ключевые слова: промышленный робот, позиционер, манипулятор изделия, автоматизация проектирования, дуговая сварка, off-line программирование

Объектом исследования являются трехмерные модели роботизированных технологических комплексов дуговой сварки. Предметом исследования являются методы и алгоритмы автоматизированного синтеза программных движений манипуляторов изделия применительно к операциям дуговой сварки.

Целью работы является разработка методов и алгоритмов автоматизированного синтеза оптимальных программных движений промышленных роботов в РТК дуговой сварки с учетом кинематической избыточности манипуляционных систем и технологических особенностей процесса сварки.

Разработан новый метод решения обратной задачи кинематики для избыточных манипуляционных систем, состоящих из промышленного робота и манипулятора изделия, который позволяет повысить эффективность управления движением инструмента и изделия при операциях дуговой сварки. Разработаны алгоритмы синтеза оптимальных движений манипулятора изделия в составе РТК дуговой сварки, использующие кинематическую избыточность системы робот-позиционер для минимизации времени рабочего цикла и улучшения качества сварного соединения. При этом швы объединяются в группы с близкой взаимной ориентацией, что позволяет минимизировать количество движений позиционера. Проведены исследования эффективности предложенного алгоритма и показана его работоспособность при решении задач высокой размерности. Разработан алгоритм автоматизированного синтеза компоновки РТК дуговой сварки, учитывающий кинематическую избыточность манипуляционной системы робот-позиционер, а также особенности сварки изделий с большим количеством коротких швов с различной пространственной ориентацией. В результате находится такое взаимное расположение робота и позиционера, при котором минимизируется суммарное время изменения ориентации детали и обработки швов.

Выполнена программная реализация разработанных алгоритмов и произведена их интеграция в САПР Robomax.

SUMMARY

SIOMKIN Kanstantsin Iosifovitch

"Computer aided design of arc welding robotic cells based on redundant manipulating systems"

Key words: industrial robotic, positioner, CAD, arc welding, off-line programming.

The thesis deals with 3D models of industrial robotic cells for arc welding, which is the object under investigation. It focuses on computer-aided methods and algorithms for program motions generation for positioner at robotic arc welding.

The primary objective of this work is development of methods and algorithms for synthesis of optimal robot motion for arc welding taking into account kinematic redundancy of manipulating system and arc welding technology features.

It was developed the new inverse kinematic algorithm for redundant manipulating system that consist of industrial robot and positioner. It allows to increase the efficiency of tool and workpiece movement control during arc welding operations. It was developed algorithms for synthesis of optimal positioner's motions that presented at arc welding robotic cell. It uses the kinematic redundancy of the robot-positioner system for work time minimization and improvement of weld quality. Consolidation of arc seams that has closed space orientations allows to minimize volume of positioner motion. It was investigated of efficiency of proposed algorithms and was shown it's adaptability at high dimension tasks. It was developed computer-aided algorithm of the robotic cell optimal design, that take into account kinematic redundancy of robot-positioner manipulating system and also the arc welding technology features of workpiece that has great count of short seams with different space orientation. This technique leads to robot-positioner layout that ensures minimum of full work time (the sum of welding time and time for change workpiece's orientation).

The developed algorithms have been implemented in industrial software tools and integrated in ROBOMAX CAD.

СЁМКИН

Константин Иосифович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РТК
ДУГОВОЙ СВАРКИ НА БАЗЕ ИЗБЫТОЧНЫХ
МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ**

05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и про-
изводствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать	07.07.2005.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,4.
Уч.-изд. л. 1,2.	Тираж 60 экз.		Заказ 477.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0131518 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровка, 6.