

Учреждение образования  
"БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ"

УДК 621.865.8:621.791

КОЖЕВНИКОВ  
Михаил Михайлович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
РОБОТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕПЯТСТВИЙ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ**

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 2003

Работа выполнена в Учреждении образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"

Научный руководитель-

доктор технических наук, профессор Пашкевич А.П.  
(БГУИР, каф. Автоматического управления)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Куренев В. А.  
(Военная академия РБ, каф. Систем автоматического управления)

кандидат технических наук, доцент Кузьмицкий И. Ф.  
(БГТУ, каф. Автоматизации технологических процессов и электротехники)

Оппонирующая организация-

Государственное научное учреждение "Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси"

Защита состоится 13 марта 2003 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: 220027, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, БГУИР, корп. 1, ауд. 232, тел. 239-89-89

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Диссертационная работа посвящена разработке алгоритмических методов решения задачи синтеза программных движений роботов-манипуляторов при наличии препятствий в рабочей зоне. Такие проблемы возникают при создании современных промышленных роботизированных технологических комплексов, особенно в автомобильной и автотракторной промышленности. Однако существующие коммерческие CAD/CAM системы не позволяют решить данную задачу в полном объеме, поэтому в настоящее время при разработке таких комплексов обычно используют типовые решения, проверяемые путем геометрического моделирования. Но, как показывает практика, такой подход является трудоемким и не исключает ошибок, которые выявляются лишь на этапе наладки. На устранение ошибок и повторное изготовление комплекса уходит до нескольких месяцев, что существенно увеличивает сроки освоения новых изделий.

Как показывает анализ публикаций по данному вопросу, в настоящее время проблема синтеза программных движений роботов-манипуляторов в среде с препятствиями решается на основе упрощенных геометрических моделей, не обладающих достаточной для практики точностью. Эти задачи в полной мере не решены ни в одном из известных зарубежных пакетов для проектирования РТК (ROBCAD, IGRIP и др.), что приводит к необходимости трудоемкой ручной настройки программ, генерируемых средствами автономного программирования. В то же время переход к более точным моделям приводит к резкому повышению размерности задачи, что требует создания специальных математических методов, а также различных эвристических процедур.

Актуальность темы диссертационной работы для Республики Беларусь обусловлена необходимостью в техническом перевооружении автомобильной промышленности. Поэтому решение задачи автоматизированного синтеза программных движений позволяет создать научный задел, необходимый для выполнения в дальнейшем проектов для таких предприятий.

### **Связь работы с крупными научными программами, темами.**

Диссертационная работа выполнена на кафедре Автоматического управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в рамках следующих научно-исследовательских работ: "Разработка научных основ автоматизированного проектирования роботизированных комплексов на базе избыточных манипуляционных систем" (№ ГР1999434); "Разработать теоретические основы параметрической идентификации геометрических моделей роботов-манипуляторов с замкнутыми кинематическими цепями" (№ ГР2000878); "Разработать теоретические основы оптимального управления роботами-манипуляторами в рабочей среде с препятствиями" (№ ГР20023225); "Автоматизация программирования

промышленных роботов при наличии препятствий в рабочей зоне” (№ ГР20021696).

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка и исследование эффективности методов автоматизированного синтеза программных движений роботов-манипуляторов в среде с препятствиями на основе аппарата многослойных нейронных сетей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать методы и алгоритмы синтеза конфигурационного пространства для роботов-манипуляторов антропоморфного типа, основанные на нейросетевых моделях столкновений;
- 2) разработать нейросетевые алгоритмы синтеза движений в конфигурационном пространстве антропоморфных роботов-манипуляторов;
- 3) исследовать устойчивость разработанных нейросетевых процедур синтеза программных движений;
- 4) разработать методы и алгоритмы синтеза программных движений в пространстве обобщенных координат манипулятора, учитывающие специфику сборочно-сварочной технологии;
- 5) исследовать эффективность разработанных методов и алгоритмов при решении реальных производственных задач.

**Объект и предмет исследования.** В данной диссертационной работе объектом исследования являются трехмерные модели сборочно-сварочных роботизированных технологических комплексов (РТК). Предметом исследования являются методы и алгоритмы автоматизированного синтеза программных движений роботов в среде с препятствиями сложной формы.

**Методология и методы проведения исследования.** Рассматриваемые задачи, в отличие от известных, оперируют с точными трехмерными моделями роботов-манипуляторов и препятствий и, как следствие, имеют существенно более высокую размерность. Для решения этих задач использован современный математический аппарат, базирующийся на матричном анализе, аппарате однородных преобразований, многослойных нейронных сетях, нечеткой логике и генетическом программировании.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.**

К числу новых научных результатов относятся следующие:

- 1) метод синтеза конфигурационного пространства роботов-манипуляторов, который позволяет, в отличие от известных, построить трехмерное конфигурационное пространство для антропоморфных роботов-манипуляторов и представить точную модель системы “манипулятор-препятствие” в виде нейронной сети;
- 2) нейросетевой алгоритм синтеза движений, который, в отличие от известных, позволяет построить свободную от столкновений траекторию в

трехмерном конфигурационном пространстве антропоморфного робота за приемлемое для практических приложений время;

- 3) достаточные условия асимптотической устойчивости в нейросетевой модели потенциального поля, лежащей в основе предложенных методов синтеза;
- 4) методы и алгоритмы синтеза программных движений в пространстве обобщенных координат антропоморфного робота-манипулятора, учитывающие особенности сборочно-сварочной технологии.

**Практическая значимость полученных результатов.** Результаты диссертационной работы внедрены и используются для синтеза управляющих программ роботов-манипуляторов на ОКБ "Импульс" (г. Минск) и НПП "Белкотломаш" (г. Витебск), интегрированы в программный комплекс управления роботизированным складом на заводе полиэфирных нитей РУП "МПО "Химволокно" (г. Могилев), 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:

- 1) метод синтеза конфигурационного пространства для робота-манипулятора, основанный на нейросетевой модели столкновений, позволяющий реализовать быстрое преобразование препятствий в конфигурационное пространство и учитывающий точную геометрию звеньев манипулятора и препятствий;
- 2) нейросетевой алгоритм синтеза движений робота, основанный на генерации потенциального распределения над его конфигурационным пространством с последующим поиском свободной от столкновений траектории в потенциальном поле;
- 3) метод синтеза программных движений в пространстве обобщенных координат робота-манипулятора при наличии технологических ограничений на ориентацию инструмента, позволяющий учесть технологические особенности сборки/сварки.

**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 Internationationales wissenschaftliches kolloquium "Mechanical Engineering and Nanotechnology" (IWK 2002 Ilmenau (Thur.), 2002), 5<sup>th</sup> Portuguese Conference on Automatic Control (Controlo 2002,

Aveiro, Portugal, 2002), 9<sup>th</sup> International Multi-Conference “Advanced Computer Systems (ACS 2002, Szczecin, Poland, 2002), VIII Всероссийской конференции “Нейрокомпьютеры и их применение” (НКП-2002 Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия, 2002), международной научно-практической конференции “Моделирование. Теория методы и средства” (Новочеркасск, Россия, 2001), II Международной научно-практической конференции “Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы” (Новочеркасск, Россия, 2001), II Международной научно-практической конференции “Компьютерные технологии в науке, социальных и экономических процессах” (Новочеркасск, Россия, 2001), II Международной научно-практической конференции “Моделирование. Теория методы и средства” (Новочеркасск, Россия, 2002), Пятом Международном молодежном форуме “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (Харьков, Украина, 2001), Восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика” (Москва, Россия, 2002), V Республиканской научной конференции студентов и аспирантов “Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях” (Гомель, Беларусь, 2002), Шестом международном молодежном форуме “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (Харьков, Украина, 2002).

**Опубликованность результатов.** По материалам диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, включая 11 статей в журналах и материалах международных научных конференций, и 4 тезиса научных конференций. Суммарный объем публикаций составляет около 65 печатных страниц.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Она содержит 100 страниц основного текста, 76 рисунков на 31 странице, 23 таблицы на 7 страницах, 10 приложений на 88 страницах, в списке использованных источников на 8 страницах представлено 109 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель и задачи исследования.

**В первой главе** рассмотрены и проанализированы существующие проблемы сборочно-сварочного производства, а также известные системы и методы автоматизации программирования промышленных роботов. В результате сделан вывод о том, что существующие САПР РТК имеют средства разработки управляющих программ, которые ориентированы на трудоемкий интерактивный процесс обучения робота на основе моделирования программных движений в графической среде. Этот процесс базируется на упрощенных методах, не учитывающих особенностей конкретного

технологического производства. Кроме того, в существующих пакетах практически отсутствуют средства, позволяющие решать задачу синтеза последовательности свободных от столкновения программных движений, реализующих траекторию между стартовым и целевым положением манипулятора.

Проведен обзор существующих алгоритмов синтеза программных движений роботов-манипуляторов и показано, что они базируются на упрощенной модели конфигурационного пространства. Поискные процедуры в таком конфигурационном пространстве не позволяют реализовать адекватные движения в сборочно-сварочных РТК, в то же время существующие процедуры генерации конфигурационного пространства большой размерности базируются на трудоемких вычислительных процедурах. В связи с этим возникает необходимость разработки новых эффективных методов формирования трехмерного конфигурационного пространства манипулятора с учетом реальной формы его звеньев, формы технологического инструмента и формы препятствий. Показано, что известные алгоритмы синтеза программных движений в конфигурационном пространстве не учитывают геометрических характеристик конфигурационных пространств сварочно-сборочных роботов, а так же технологических требований, предъявляемых при сборке и сварке. Таким образом, возникает необходимость в разработке новых алгоритмов синтеза программных движений позволяющих учесть геометрические характеристики конфигурационных пространств сварочно-сборочных роботов-манипуляторов, а также технологические требования, предъявляемые при сборке и сварке.

При анализе существующих алгоритмов синтеза программных движений в пространстве обобщенных координат манипулятора выявлено, что они базируются на упрощенной модели РТК, не учитывают реальной размерности задачи и особенностей сборочно-сварочной технологии и, как следствие, не могут быть применены к синтезу программных движений в пространстве обобщенных координат роботов, применяемых в сборочно-сварочных РТК. Отсюда возникает необходимость разработки новых алгоритмов синтеза программных движений в пространстве обобщенных координат манипулятора, основанных на точных геометрических моделях РТК, а также позволяющих учесть специфику сборочно-сварочной технологии.

**Во второй главе** рассмотрена проблема синтеза конфигурационного пространства, сформулирована соответствующая задача и показано, что известные процедуры синтеза основаны на упрощенных плоских моделях РТК и не позволяют учесть реальную форму всех его элементов. Предложен новый численный подход к синтезу трехмерного конфигурационного пространства для сборочно-сварочных роботов, который основан на точных трехмерных геометрических моделях всех элементов роботизированного комплекса. Этот метод включает построение следующих моделей:

- 1) нейросетевой модели столкновений для робота на основе его трехмерной модели;
- 2) векторной модели рабочего пространства на основе его трехмерной модели;
- 3) сопряженной векторной модели препятствий;
- 4) дискретной модели трехмерного конфигурационного пространства на основе сопряженной векторной модели и модели столкновений.

Модель столкновения для манипулятора определяется как векторная функция  $f_Q(d)$ , реализующая преобразование вида

$$\hat{Q} = f_Q(d), \hat{Q} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n | Q_i \in R^3\} \quad (1)$$

где  $\hat{Q}$  множество централизованных конфигураций, задающих столкновения между манипулятором и примитивом, расположенным на расстоянии  $d$  ( $d \equiv d_{nvb}$ ) от несмещенной виртуальной базы. Сопряженная векторная модель препятствия реализуется на основе преобразований

$$d_{nvb} = f_{d_{nvb}}(\sigma, T, K, \alpha), \alpha = f_\alpha(\sigma, T), \alpha_{q_2} = f_{\alpha_{q_2}}(\sigma, T, K, \alpha), \quad (2)$$

где  $\sigma, T, K$  – векторы, определяющие геометрические параметры РТК;  $\alpha, \alpha_{q_2}$  – смещения  $S$ -пространственных структур в трехмерном конфигурационном пространстве. Эти преобразования выполняются для каждого примитива, задающего геометрическую модель препятствия.

Необходимо отметить, что аналитический расчет модели столкновения вида (1) для сборочно-сварочных манипуляторов представляет значительную трудность вследствие сложной геометрической формы звеньев, а также технологического инструмента. Поэтому предложена численная процедура решения, которая состоит из следующих этапов:

- 1) генерация трехмерных  $S$ -пространственных структур на основе модели робота-манипулятора;
  - 2) нейросетевая аппроксимация трехмерных  $S$ -пространственных структур.
- Принятая модель столкновений (1) позволяет рассматривать трехмерную  $S$ -пространственную структуру, как объединение плоских профилей, поэтому предлагаемый алгоритм генерации  $S$ -пространственных структур включает формирование следующих множеств:
- 1) профилей  $S$ -пространственных структур относительно параметров  $Q_2, Q_3$ ;
  - 2) профилей  $S$ -пространственных структур относительно параметра  $Q_1$ ;
  - 3) полных  $S$ -пространственных структур на основе полученных плоских профилей.

Для аппроксимации полученных трехмерных  $S$ -пространственных структур предлагается использовать двухслойную нейронную сеть типа RBFN (*Radial Basis Function Networks*). Предлагаемая модификация этой нейронной



сети представляет собой двухслойную структуру (рис. 1), выходы узлов второго слоя которой формируются как линейная комбинация выходов базисных функций скрытого слоя:

$$Q_{m,s}^{(a)} = \sum_{k=1}^{k'} w_{m,s,k}^{(a)} * f_k(d-c_k) \quad (3)$$

где  $Q_{1,0}^{(a)}$  - значения централизованных углов, описывающих плоский профиль  $C$ -пространственной структуры относительно параметров  $Q_2, Q_3$ , при  $a \in \{1,2\}$ ;  $Q_{m,s}^{(a)}$  - значения централизованных углов, описывающих плоский профиль  $C$ -пространственной структуры относительно параметра  $Q_1$  в дискретных точках  $s \in \{1, \dots, s'\}$  с разрешением  $s'$  при  $m \in \{2,3\}$ ,  $a \in \{0,1,2\}$ ;  $w_{m,s,k}^{(a)}$  и  $c_k$  - веса в выходном и скрытом слоях соответственно;  $f_k$  - функция активации нейронов скрытого слоя.

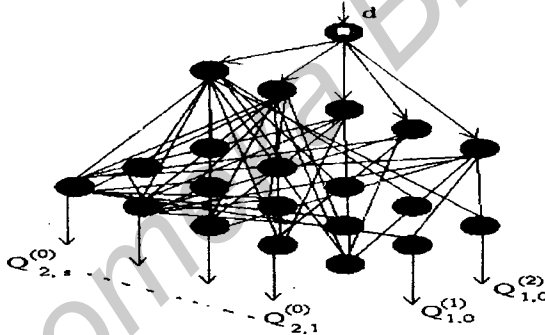


Рис. 1 Нейронная сеть для аппроксимации  $C$ -пространственных структур

В качестве обучающего множества используются  $C$ -пространственные структуры, полученные в соответствии с вышеописанными алгоритмами. Цель алгоритма обучения – снижение интерполяционной ошибки, определяемой как разность между откликом сети на некоторое входное воздействие и соответствующей  $C$ -пространственной структурой, найденной для данного воздействия. Это достигается за счет последовательного увеличения числа нейронов в скрытом слое до тех пор, пока разность между откликом сети на входное воздействие и расчетной  $C$ -пространственной структурой не станет ниже заданного порога. Модифицированный алгоритм обучения включает следующие шаги:

- 1) формирование скрытого слоя сети с малым количеством нейронов  $k'=7..8$  (входное пространство имеет малое разрешение);
- 2) настройка весов выходного слоя исходя из критерия минимизации квадрата отклонения выхода сети от заданного значения на каждом узле второго слоя:

$$\tilde{w}_{m,s,k}^a = \min_{\Delta_{m,s,k}} \left\{ \Delta_{m,1}, \Delta_{m,2}, \dots, \Delta_{m,s} \mid \Delta_{m,s} \in R^3, m = \overline{1,3}, k = \overline{1,k'}, s = \overline{1,s'} \right\} \quad (4)$$

где  $\Delta_{m,s} = [\Delta_{m,s}^{(0)}, \Delta_{m,s}^{(1)}, \Delta_{m,s}^{(2)}]^T$  -вектор квадратов отклонений;

- 3) расчет интерполяционной ошибки сети для входных величин  $d$ , которые не использовались для обучения;
- 4) если интерполяционная ошибка сети выше заданного порога  $T$ , то количество нейронов в скрытом слое сети увеличивается (т.е. увеличивается разрешение входного пространства).

Шаги 2-4 повторяются до тех пор, пока интерполяционная ошибка в сети не станет ниже заданного порога. Оптимальный вектор весов скрытого слоя, при котором величина ошибки аппроксимации на узле минимальна, находится из уравнения

$$\frac{\partial \Delta_{m,s}^{(a)}}{\partial w_{m,s,k}^{(a)}} = 2 \sum_{i=1}^p (\hat{Q}_{m,s,i}^{(a)} - Q_{m,s}^{(a)}(x_i)) \frac{\partial Q_{m,s}^{(a)}(x_i)}{\partial w_{m,s,k}^{(a)}} = 0, \quad (5)$$

решение которого на обучающем множестве  $\{x_i, \hat{Q}_{m,s,i}^{(a)}\}_{i=1}^p$  определяется следующим образом:

$$\tilde{w} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \hat{\mathbf{Q}}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{F}$ -план-матрица сети.

Расчет оптимального весового вектора в соответствии с этим соотношением проводится для каждого выходного узла. Необходимо отметить, что этот алгоритм позволяет реализовать обучение сети при невысокой размерности обучающего множества, что особо актуально в связи с высокой трудоемкостью генерации трехмерных  $C$ -пространственных структур.

Предложенный алгоритм преобразования препятствий основан на модели столкновений (1) и состоит из следующих шагов:

- 1) формирование векторной модели рабочего пространства;
- 2) расчет сопряженной векторной модели препятствий;
- 3) расчет фактического конфигурационного пространства на основе модели столкновений (1) и сопряженной векторной модели.

Таким образом, векторная модель рабочего пространства робота-манипулятора используется для генерации сопряженной векторной модели вида:

$$\tilde{D} = \Delta \{d_{n_{vb}1}, d_{n_{vb}2}, \dots, d_{n_{vb}N} \mid d_{n_{vb}N} \in [d^-, d^+]\} \quad (7)$$

$$\tilde{\alpha} = \Delta \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N \mid \alpha_N \in [\alpha^-, \alpha^+]\} \quad (8)$$

$$\tilde{\alpha}_{q_2}^{\Delta} = \left\{ \alpha_{q_2,1}, \alpha_{q_2,2}, \dots, \alpha_{q_2,N} \mid \alpha_{q_2,N} \in [\alpha_{q_2}^-, \alpha_{q_2}^+] \right\} \quad (9)$$

Расчет фактического конфигурационного пространства реализуется на основе последовательного расчета  $Q_{m,s}^{(a)}$  (3) для каждого элемента множества  $\tilde{D}$  (7). Далее, в фактическом конфигурационном пространстве задаются профили  $S$ -пространственных структур относительно параметров  $Q_2, Q_3$ :

$$\hat{q}_1^{\Delta} = \left\{ q_{1,0,1}^{(a)}, q_{1,0,2}^{(a)}, \dots, q_{1,0,N}^{(a)} \mid a = \overline{1,2}, q_{1,0,N}^{(a)} = Q_{1,0}^{(a)} + \alpha_N \right\} \quad (10)$$

Каждый плоский профиль относительно параметров  $Q_2, Q_3$  дискретизируется с шагом  $\Delta S = |q_{1,0,N}^{(1)} - q_{1,0,N}^{(2)}| / s_q$  и для каждого дискретного значения угла в диапазоне  $q_1 \in [q_{1,0,N}^{(1)}, q_{1,0,N}^{(2)}]$  задается множество плоских профилей соответствующих  $S$ -пространственных структур относительно параметра  $Q_1$ :

$$\hat{q}_2^{\Delta} = \left\{ q_{m,s,1}^{(a)}, q_{m,s,2}^{(a)}, \dots, q_{m,s,N}^{(a)} \mid a = \overline{0,2}, m = 2, s = \overline{1,s'}, q_{m,s}^{(a)} = Q_{m,s}^{(a)} + \alpha_{q_2,N} \right\} \quad (11)$$

$$\hat{q}_3^{\Delta} = \left\{ q_{m,s,1}^{(a)}, q_{m,s,2}^{(a)}, \dots, q_{m,s,N}^{(a)} \mid a = \overline{0,2}, m = 3, s = \overline{1,s'}, q_{m,s}^{(a)} = Q_{m,s}^{(a)} \right\} \quad (12)$$

Предложенный алгоритм был исследован путем моделирования. Множество трехмерных  $S$ -пространственных структур, использованных для обучения нейронной сети, получено экспериментально на основе трехмерной модели манипулятора в САПР ROBOMAX. Проведена оценка точности преобразования препятствий в конфигурационное пространство сборочно-сварочного манипулятора, а также сходимость разработанных алгоритмов синтеза нейросетевой модели столкновения.

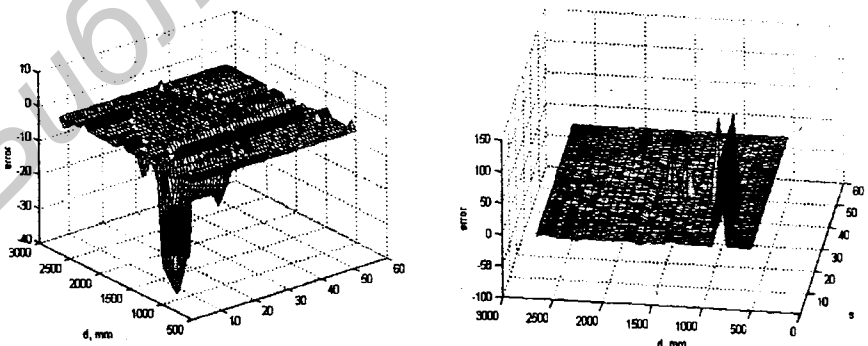


Рис. 2 Поверхности интерполяционной ошибки в предложенной RBFN сети

Показано, что ошибка преобразования определяется дискретностью задания векторной модели рабочего пространства робота  $\delta_{\max}$  и величиной интерполяционной ошибки в нейронной сети, используемой для аппроксимации  $C$ -пространственных структур  $|\text{error}_{\max}|$  (рис. 2). Установлено что, допустимое значение интерполяционной ошибки в сети достигается при достижении в процессе обучения значения размерности скрытого слоя  $\tilde{k} \approx 15$ . При этом расчет выхода сети реализуется за время  $\tau = 60$ с. при размерности выходного слоя  $\tilde{s} = 60$  (микропроцессор Intel PII/400 MHz).

Эффективность разработанных алгоритмов синтеза трехмерного конфигурационного пространства исследована с использованием подсистемы аналитического программирования в САПР ROBOMAX. Объект исследования - РТК на основе робота-манипулятора KR125. В качестве препятствия в данном случае рассматриваются конструкция, технологическая оснастка, а также кондукторная плита. Показано, что использование предложенного метода в системе автономного программирования позволяет существенно снизить трудоемкость процесса генерации технологической программы для манипулятора в сборочно-сварочном РТК.

В третьей главе рассмотрена задача синтеза программных движений в конфигурационном пространстве робота и показано, что существующие алгоритмы синтеза программных движений не учитывают специфики трехмерных конфигурационных пространств сборочно-сварочных роботов, а также технологических требований, предъявляемых при сборке и сварке. Предложен новый эффективный нейросетевой алгоритм синтеза движений сборочно-сварочных манипуляторов. Этот алгоритм основан на синтезе дискретной гармонической функции над конфигурационным пространством. В полученном таким образом потенциальном поле осуществляется градиентный поиск последовательности, соединяющей стартовую  $\mathbf{q}_{start}$  и целевую  $\mathbf{q}_{goal}$  конфигурации. Для реализации гармонической функции разработана модификация NRG (*Neuro Resistive Grid*) сети и получены достаточные условия ее устойчивости. В качестве критерия, характеризующего "качество" последовательности конфигураций, использован функционал вида

$$J(\mathbf{q}(R)) = \sum_{R=0}^{N-1} \Phi(\mathbf{q}(R)), \quad (13)$$

где  $\Phi(\mathbf{q}(R))$ -значение весовой функции на конфигурации  $\mathbf{q}(R)$ .

Элементарной ячейкой предлагаемой нейронной сети является трехмерная структура, образованная шестью нейронами. Выход каждого  $a$ -го нейрона поступает на вход каждого из  $b$  соседних нейронов. Предлагаемая модификация сети, в отличие от известных работ, представляет собой объединение  $N^3$  нейронов, распределенных над областью трехмерного пространства (рис. 3).

Таким образом, каждому нейрону ставится в соответствие узел дискретной карты, задающей конфигурационное пространство.

Показано, что распределение потенциала в NRG описывается системой уравнений вида

$$\tau_a \frac{dF_a(\phi_a)}{d\phi_a} \frac{d\phi_a}{dt} = \sum_{b=1}^{N^3} T_{ab} \phi_b - T_{a0} F_a(\phi_a) + V_a, \quad a=1,2,\dots,N^3, \quad (14)$$

$$T_{ab} = R_{ab}^{-1} / \sum_{b=1}^{N^3} R_{ab}^{-1}, \quad \tau_a = C_0 / \sum_{b=1}^{N^3} R_{ab}^{-1}, \quad T_{a0} = 1 + R_{a0}^{-1} / \sum_{b=1}^{N^3} R_{ab}^{-1},$$

при  $v_a = F_a(\phi_a)$ ,  $a=1,2,\dots,N^3$ ,  $M_a^{-1} \leq dF_a/dx \leq m_a^{-1}$ .

Далее определены достаточные условия асимптотической устойчивости предлагаемой модификации NRG:

$$-p_b \frac{T_{b0}}{M_b} + \sum_{a=1}^{N^3} p_a |T_{ab}| < 0, \quad -\frac{T_{k0}}{M_k} + \sum_{b=1}^{N^3} |T_{kb}| < 0, \quad p_a > 0. \quad (15)$$

Эти соотношения использованы для расчета параметров  $T_{ab}$  рассматриваемой модификации нейронной сети.

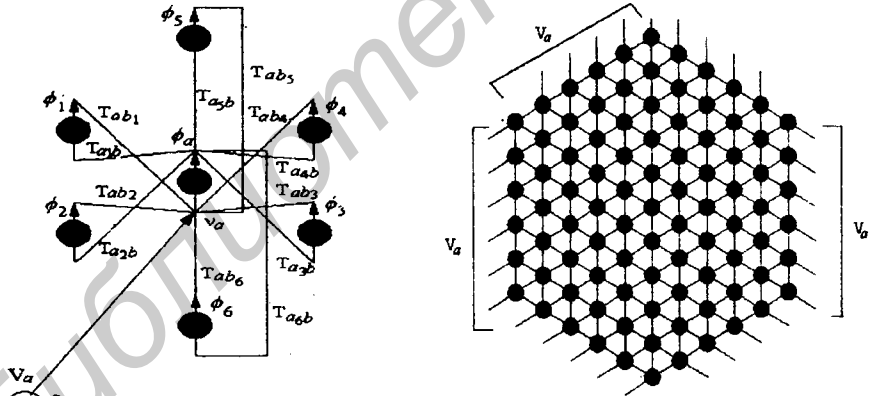


Рис. 3 Топологически упорядоченная NRG на основе трехмерных структур

Моделирование программных движений робота, на основе разработанной NRG подтверждает, что полученные условия асимптотической устойчивости обеспечивают сходимость предложенного алгоритма синтеза движений. Разработанное программное обеспечение включает в себя следующие модули:

- 1) модуль формирования скрытого слоя нейронной сети;
- 2) модуль генерации вектора состояния NRG;
- 3) модуль градиентного поиска траектории в потенциальном поле.

Исходными данными для предлагаемых программ являются векторы, задающие стартовую и целевую конфигурации робота-манипулятора и карта трехмерного конфигурационного пространства.

Предложенное программное обеспечение использовано в среде САПР ROBOMAX для генерации траекторий роботов-манипуляторов. Рассмотренный РТК сварки кабины автомобиля ГАЗ (рис. 4) включает робот KR125, оснащенный сварочными клещами, и технологическую оснастку. Деталь кабины, кондукторная плита и технологическая оснастка рассматриваются как препятствия. Карта трехмерного конфигурационного пространства задана в виде множества запретных конфигураций (конфигурации, задающие столкновения, и конфигурации, задающие ограничительный параллелепипед). Исследование эффективности этого алгоритма в системе автономного программирования показало, что для рассмотренного РТК он позволяет в 3-4 раза снизить затраты времени на генерацию управляющей программы.

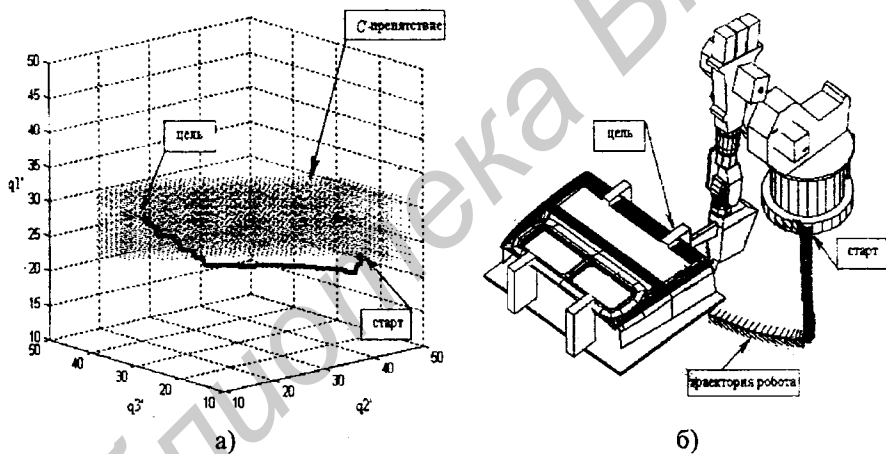


Рис. 4 Свободная от столкновений траектория в дискретном конфигурационном пространстве робота KR125 и соответствующая ей траектория в рабочем пространстве (стартовая конфигурация  $\mathbf{q}_{st} = [-26 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ; целевая конфигурация  $\mathbf{q}_{gt} = [0 \ -57 \ 142 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ )

В четвертой главе рассматриваются задачи синтеза программных движений сборочно-сварочных роботов в пространстве обобщенных координат и разработан новый эффективный метод синтеза, который позволяет эффективно учесть специфику сборочно-сварочной технологии. Первый этап этого метода основан на генетическом поиске свободных от столкновений локаций робота-манипулятора для каждой фиксированной точки, задающей модель сварного шва. На углы сварки наложены ограничения вида:

$$\alpha \in [\alpha^- \alpha^+], \quad \beta \in [\beta^- \beta^+], \quad \gamma \in [\gamma^- \gamma^+] \quad (16)$$

Эти углы, а также конфигурации робота, кодируются в виде генетической строки и далее производится генетический поиск локации манипулятора, на которой максимизируется критерий вида:

$$f = \left( 1 + \sum_{j=1}^N w_j e_j \right)^{-1} \rightarrow \max_{e_j} \quad (17)$$

где  $e_j = \text{mean}_i (\|F_{ij}\|)$  - ошибка положения манипулятора в искусственном потенциальном поле,  $w_i$  - весовые коэффициенты,  $F_{ij}$  - вектор, определяющий искусственную отталкивающую силу, действующую со стороны  $i$ -го препятствия на  $j$ -ое звено робота.

Второй этап разработанного метода синтеза программных движений реализует генерацию участков траекторий между промежуточными точками, заданными в пространстве обобщенных координат. Он основан на генерации базовых правил движения робота с последующей нейросетевой аппроксимацией этих правил.

Для генерации базовых движения манипулятора разработан алгоритм, основанный на генетическом программировании и трехмерных моделях РТК. В основу этого алгоритма положена процедура типа PGBA (*Pseudo-Bacterial-Genetic-Algorithm*), ориентированная на генерацию движений роботоманипуляторов, на которых максимизируется критерий, характеризующий положение звеньев манипулятора в искусственном потенциальном поле. Для аппроксимации базовых правил движения сборочно-сварочных роботов предложена модификация нейронной сети типа RBFN. На рис. 5. приведено схематическое изображение нейросетевой структуры, реализующей аппроксимацию системы правил, которая задает движения робота при наличии препятствия в одной из  $n$  зон сканирования. Входное пространство этой сети имеет размерность 2, и входными переменными являются нормированное отклонение манипулятора от целевой конфигурации  $\Delta q^s \in \Delta \Theta^s$  и расстояние  $d_n \in D_n$  между звеном манипулятора и препятствием в зоне сканирования  $n$ . На выходе сети формируется движение робота  $\Delta q$ .

Алгоритм функционирования модифицированной RBFN:

- 1) множества  $\Delta \Theta^s$  и  $D_n$  аппроксимируются нечеткими множествами  $\{f_1, \dots, f_k\}$  и  $\{f_1, \dots, f_l\}$  соответственно, где  $f_k$  и  $f_l$  являются отображениями вида  $f_k(\Delta q^s): \Delta \Theta^s \rightarrow [0,1]$ ;  $f_l(d_n): D_n \rightarrow [0,1]$ ;
- 2) определяется пересечение полученных нечетких множеств на основе мультипликативного оператора:

$$\begin{aligned}
 \sigma_i^{(r)} &= f_i(\Delta q^g) \cap f_i(d_n) = f_i(\Delta q^g) * f_i(d_n), \\
 \sigma_k^{(r)} &= f_k(\Delta q^g) \cap f_i(d_n) = f_k(\Delta q^g) * f_i(d_n), \\
 &\vdots \\
 \sigma_{\tilde{k}(l-1)+\tilde{k}}^{(r)} &= f_k(\Delta q^g) \cap f_{\tilde{l}}(d_n) = f_k(\Delta q^g) * f_{\tilde{l}}(d_n), \\
 \sigma_{\tilde{k}\tilde{l}}^{(r)} &= f_{\tilde{k}}(\Delta q^g) \cap f_{\tilde{l}}(d_n) = f_{\tilde{k}}(\Delta q^g) * f_{\tilde{l}}(d_n);
 \end{aligned} \tag{18}$$

3) рассчитывается выходной вектор

$$\Delta q = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{\tilde{k}*\tilde{l}} \sigma_i^{(r)} * C_{li}^{(r)}}{\sum_{i=1}^{\tilde{k}*\tilde{l}} \sigma_i^{(r)}} \dots \frac{\sum_{i=1}^{\tilde{k}*\tilde{l}} \sigma_i^{(r)} * C_{mi}^{(r)}}{\sum_{i=1}^{\tilde{k}*\tilde{l}} \sigma_i^{(r)}} \right]^T, \tag{19}$$

где  $C_i^{(r)} = [C_{li}^{(r)} \dots C_{mi}^{(r)}]$ ,  $i = 1 \dots \tilde{k} * \tilde{l}$ ,  $m$ -число степеней свободы манипулятора.

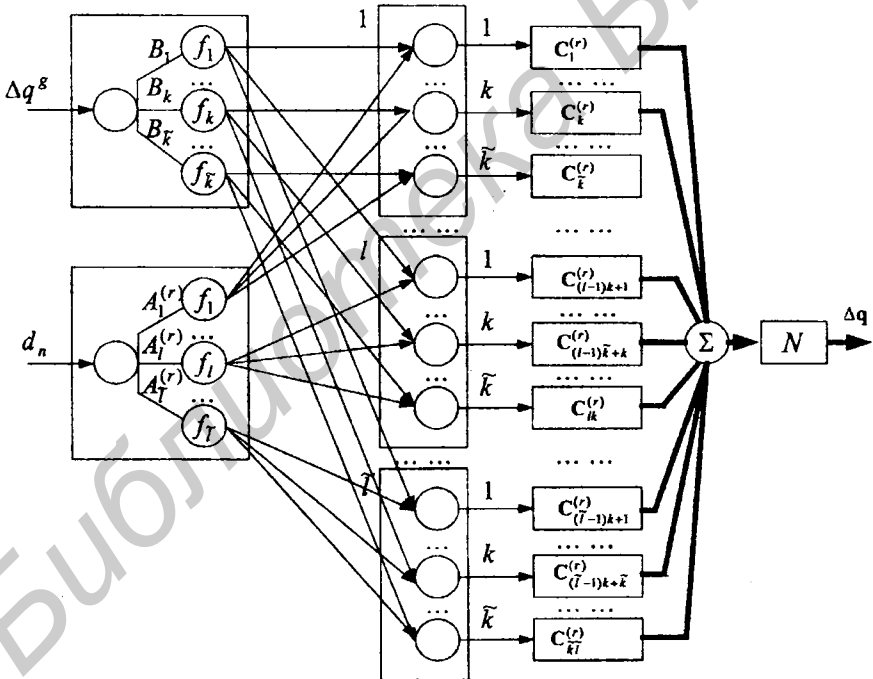


Рис. 5 Нейронная сеть для аппроксимации базового правила размерности  $\tilde{k} * \tilde{l}$

Предложенные алгоритмы синтеза программных движений роботов реализованы программно в среде Visual C++. Это программное обеспечение использовано в системе автономного программирования САПР ROBOMAX при синтезе управляющих программ для РТК дуговой сварки сосудов высокого



давления. Роботизированный комплекс такого типа включает технологическую оснастку и робот, оснащенный технологическим инструментом. Задача заключается в генерации программ движения робота при сварке швов на поверхности сосуда.

Как показали результаты моделирования, среднее время на генерацию движения составляет около 300 сек и приемлемо для практики (микропроцессор Intel PII-400). Среднее время отклика предложенной RBFN модели движений составляет около 1,5 сек, что также гарантирует приемлемое для практических приложений время синтеза траектории. Экспериментальная проверка предложенного подхода в системе автономного программирования, показала, что он позволяет реализовать адекватные движения антропоморфного робота в среде с препятствиями и в среднем в 2-2.5 раза снизить затраты времени на генерацию управляющей программы для РТК.

Приложения содержат характеристики отдельных алгоритмов, исходные тексты программ, а также документы, подтверждающие внедрение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат диссертационной работы заключается в разработке новых эффективных методов и алгоритмов автоматизации программирования антропоморфных роботов-манипуляторов при наличии препятствий в рабочей зоне, что обеспечивает решение важных прикладных задач в области автоматизации технологических процессов и создания промышленных роботизированных систем для сборочно-сварочных производств.

Полученные научные и практические результаты можно сформулировать в виде следующих положений:

1. Разработан новый метод синтеза конфигурационного пространства для роботов-манипуляторов антропоморфного типа. В отличие от известных процедур синтеза, этот подход позволяет учесть реальную форму звеньев манипулятора, форму технологического инструмента и препятствий. Первый шаг разработанного метода основан на реализации нейросетевой модели столкновения для робота-манипулятора и сопряженной векторной модели препятствий. Далее на основе этих моделей реализуется преобразование препятствий в трехмерное конфигурационное пространство [2, 4, 5, 7, 8, 12, 13].

2. Разработан новый нейросетевой алгоритм синтеза движений в конфигурационном пространстве антропоморфных роботов-манипуляторов, который, в отличие от известных, позволяет построить свободную от столкновений траекторию в трехмерном конфигурационном пространстве. Этот алгоритм основан на синтезе дискретной гармонической функции над трехмерным конфигурационным пространством манипулятора. Далее в полученном таким образом потенциальном поле осуществляется градиентный поиск последовательности, соединяющей стартовую и целевую конфигурации. Для реализации гармонической функции над трехмерным конфигурационным

пространством разработана модификация NRG сети. Такой подход позволяет учесть специфику карт трехмерного конфигурационного пространства, а также на уровне задания граничных условий учесть технологические ограничения на траекторию манипулятора. Показано, что алгоритм сходится за приемлемое для практики время (0.47сек, 26.51сек, 134.6 сек. при дискретности трехмерного конфигурационного пространства 8000, 25000 и 1000000 узлов соответственно; микропроцессор РП-400) [6, 9, 15, 11].

3. Получены новые достаточные условия асимптотической устойчивости нейросетевой модели потенциального поля, лежащей в основе предложенных алгоритмов синтеза. Получены соотношения между параметрами сети, которые гарантируют существование сжимающего отображения, что обеспечивает существование и единственность состояния равновесия. Далее на основе анализа производных функций Ляпунова получены соотношения между параметрами, гарантирующие его асимптотическую устойчивость. Экспериментально показано, что предложенные условия обеспечивают сходимость разработанных алгоритмов синтеза программных движений [1, 3].

4. Разработан новый эффективный метод синтеза программных движений в пространстве обобщенных координат манипулятора, который в отличие от известных позволяет эффективно учесть специфику сборочно-сварочной технологии. Его первый шаг основан на генетическом поиске свободных от столкновений локаций робота-манипулятора для каждой фиксированной точки, задающей модель сварного шва. Второй шаг позволяет реализовать синтез участков траекторий между промежуточными целями, и основан на генерации базовых правил движения манипулятора в искусственном потенциальном поле с последующей аппроксимацией этих правил нечеткими множествами. Экспериментальное исследование этого подхода показало, среднее время, затрачиваемое на генерацию программного движения, составляет около 1,5 сек (реализация на языке C++), что гарантирует приемлемое для практических приложений время синтеза траектории [10, 14].

5. Эффективность полученных результатов подтверждена практическим применением при решении реальных производственных задач, для которых удалось в среднем в 2-2.5 раза снизить затраты времени на генерацию управляющей программы. Разработанные в диссертационной работе методы и алгоритмы внедрены и используются на ОКБ "Импульс"(г. Минск) и НПП "Белкотломаш" (г. Витебск) для автоматизации проектирования управляющих программ роботов-манипуляторов, интегрированы в программный комплекс управления роботизированным складом на заводе полиэфирных нитей РУП "МПО "Химволокно" (г. Могилев), а также используются в учебном процессе на кафедре Автоматического управления БГУИР.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах*

1. Пашкевич А.П., Кожевников М.М. Устойчивость нейронной сети в задаче синтеза программных движений роботов- манипуляторов // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. - 2002. - №4-С. 78-81.
2. Кожевников М.М., Пашкевич А.П. Автоматизированный синтез управляющих программ для робота-манипулятора // Известия белорусской инженерной академии. – 2001. - № 1(11)/2. - С. 44-46.
3. Кожевников М.М., Пашкевич А.П. Устойчивость нейросетевой модели при синтезе программных движений роботов // Известия белорусской инженерной академии. – 2002. - № 1(13)/2. - С. 51-53.

*Статьи в сборниках трудов научно-технических конференций*

4. Pashkevich A., Ruano A., Kazheunikau M. Configuration Space Synthesis for Robotic Manipulators using Neural Networks // Proceedings of the 5<sup>th</sup> Portuguese Conference on Automatic Control (Controlo 2002). - Universidade de Aveiro, Portugal, 7 September 2002. - P. 195-200.
5. Pashkevich A., Kozhevnikov M. Neural Network Approach for Configuration Space Syntheses of Robotic Manipulators // Internationationales wissenschaftliches kolloquium. - Technische Universitat Ilmenau (Thur.) 2002. - P. 349-350.
6. Pashkevich A, Kazheunikau M. Neural network approach to trajectory synthesis for robotic manipulators // Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Multi-Conference Advanced Computer Systems ACS'2002. – Szczecin, Poland, 2002. - P. 79-87.
7. Пашкевич А.П., Кожевников М.М. Нейросетевой подход к синтезу конфигурационного пространства роботов-манипуляторов // Труды VIII Всероссийской конференции “Нейрокомпьютеры и их применение” НКП-2002 с международным участием. Москва. - 21-22 марта 2002 г./ Под редакцией проф. А.И. Галушкина. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2002. - С. 346-349.
8. Пашкевич А.П., Кожевников М.М. Моделирование столкновения для робота-манипулятора // Моделирование. Теория методы и средства: Материалы международной научно-практической конференции Часть 4. - Новочеркасск 2001. - С. 11-15.
9. Кожевников М.М., Пашкевич А.П. Синтез оптимальной траектории в конфигурационном пространстве сборочно-сварочных роботов-манипуляторов // Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы: Материалы II Международной научно-практической конференции Часть 1. - Новочеркасск 2001. - С. 13-18.
10. Кожевников М.М. Синтез программных движений в пространстве обобщенных координат сборочно-сварочных роботов-манипуляторов // Компьютерные технологии в науке, социальных и экономических областях: Материалы II Международной научно-практической конференции Часть 1. - Новочеркасск 2001. - С. 13-18.

процессах: Материалы II Международной научно-практической конференции Часть 6. - Новочеркасск 2001. - С. 21-25.

11. Кожевников М.М. Моделирование потенциального поля в задаче синтеза программных движений роботов // Моделирование. Теория методы и средства: Материалы II Международной научно-практической конференции Часть 3. - Новочеркасск 2002. - С. 38-43.

*Тезисы докладов научно-технических конференций*

12. Кожевников М. М. Использование нейронных сетей в задаче синтеза оптимальной траектории робота-манипулятора // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: Сборник научных трудов по материалам 5-го Международного молодежного форума Часть 1. – Харьков, 2001. - С. 302-303
13. Кожевников М. М. Синтез программных движений манипулятора в рабочей среде с препятствиями // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Восьмая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. - М.: Издательство МЭИ, 2002, Т.1. - С. 357-358.
14. Кожевников М.М. Синтез программных движений манипулятора при наличии препятствий в рабочей зоне // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы V Республиканской научной конференции студентов и аспирантов 18-20 марта 2002 года. - Гомель 2002. - С. 124-125.
15. Кожевников М.М. Оптимизация траектории манипулятора в конфигурационном пространстве Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: Сборник научных трудов по материалам 6-го Международного молодежного форума Часть 2. – Харьков, 2002. - С. 138-139

*Кожевников*

## РЭЗЮМЭ

КАЖЭЎНКАЎ Міхаіл Міхайлавіч

АУТАМАТЫЗАЦЫЯ ПРАГРАМАВАННЯ ПРАМЫСЛОВЫХ РОБАТАЎ  
ПРЫ НАЯЎНАСЦІ ПЕРАШКОД У РАБОЧАЙ ЗОНЕ

Ключавыя словы: аўтаматызацыя праграмавання, прамысловыя роботы, робататэхналагічныя комплексы, аўтаматызацыя тэхналагічных працэсаў, нейронныя сеткі, канфігурацыйная прастора.

Мэта дысертacyjнай работы – распрацоўка і дослед эфектыўнасці метадаў аўтаматызаванага сінтэзу праграмных рухаў робатаў-маніпулятараў у асяроддзі з перашкодамі на аснове мнагаслойных нейронных сетак. У якасці аб'екта доследаў выступаюць трохмерныя графічныя мадэлі зборачна-зварачных робатызаваных тэхналагічных комплексаў (РТК). Прадметам доследаў з'яўляюцца метады і алгарытмы аўтаматызаванага сінтэзу праграмных рухаў робатау ў асяроддзі з перашкодамі складанай формы.

Распрацаваны новы метады сінтэзу канфігурацыйнай прасторы робатаў-маніпулятараў антрапаморфнага тыпу. У адрозненні ад вядомых працэдур сінтэзу, гэты метады дазваляе ўлічыць сапраўдную форму звеньяў маніпулятара, форму тэхналагічнага інструмента і перашкод.

Распрацаваны новы нейрасецявы алгарытм сінтэзу рухаў у канфігурацыйнай прасторы антрапаморфных робатаў-маніпулятараў, які ў адрозненні ад вядомых, дазваляе лабудавець свабодную ад сутыкненняў траекторыю ў трохмернай канфігурацыйнай прасторы. Атрыманы новыя дастатковыя умовы асімптатычнай устойлівасці, нейрасеткавай мадэлі патэнцыяльнага поля, лежачай у аснове прапанаваных алгарытмаў сінтэзу.

Распрацаваны новы эфектыўны метады сінтэзу праграмных рухаў у прасторы абабшчоных каардынат маніпулятара, які ў адрозненні ад вядомых дазваляе эфектыўна ўлічыць адметнасці зборачна-зварачнай тэхналогіі. Эфектыўнасць атрыманых вынікаў падцверджваецца практычным выкарыстаннем пры вырашэнні прамысловых задач.

## РЕЗЮМЕ

КОЖЕВНИКОВ Михаил Михайлович

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕПЯТСТВИЙ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ

Ключевые слова: автоматизация программирования, промышленные роботы, робототехнологические комплексы, автоматизация технологических процессов, нейронные сети, конфигурационное пространство.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование эффективности методов автоматизированного синтеза программных движений роботов-манипуляторов в среде с препятствиями на основе аппарата многослойных нейронных сетей. В качестве объекта исследования выступают трехмерные графические модели сборочно-сварочных роботизированных технологических комплексов (РТК). Предметом исследования являются методы и алгоритмы автоматизированного синтеза программных движений роботов в среде с препятствиями сложной формы.

Разработан новый метод синтеза конфигурационного пространства для роботов-манипуляторов антропоморфного типа. В отличие от известных процедур синтеза, этот подход позволяет учесть реальную форму звеньев манипулятора, форму технологического инструмента и препятствий.

Разработан новый нейросетевой алгоритм синтеза движений в конфигурационном пространстве антропоморфных роботов-манипуляторов, который, в отличие от известных, позволяет построить свободную от столкновений траекторию в трехмерном конфигурационном пространстве. Получены новые достаточные условия асимптотической устойчивости нейросетевой модели потенциального поля, лежащей в основе предложенных алгоритмов синтеза.

Разработан новый эффективный метод синтеза программных движений в пространстве обобщенных координат манипулятора, который в отличие от известных позволяет эффективно учесть специфику сборочно-сварочной технологии. Эффективность полученных результатов подтверждена практическим применением при решении производственных задач.

## SUMMARY

KAZHEUNIKAU Mikhail Mikhailovich

COMPUTER-AIDED PROGRAMMING OF INDUSTRIAL ROBOTS  
WITH OBSTACLES IN WORKSPACE

**Keywords:** computer-aided programming, industrial robots, robotic cells and lines, automation of technological processes, neural networks, configuration space.

The thesis focuses on the development and efficiency investigation of the motion synthesis methods for robotic manipulators with obstacles in a workspace using multilayer neural networks. It deals with three-dimensional graphic model of the assembling and welding robotic cells. The main attention is paid to the motion synthesis methods and algorithms for the robotic manipulators with complex obstacle shape in the workspace.

A new method for the configuration space synthesis for robotic manipulators is developed. In contrast to the known techniques, this approach takes into account real links shapes, as well as a robot tool shape, and an obstacle shape.

A new neural network algorithm is proposed for the trajectory syntheses in the robotic-manipulators configuration space, which, in contrast to the known ones, allows computing the collision-free trajectory in the three dimensional configuration space. The sufficient condition is proposed for asymptotical stability of the neural network, which is the core of the proposed algorithm.

It is also proposed a novel technique for the motion synthesis in the manipulator joint space. In contrast to the known approaches, the method takes into account essential constraints, which are important for the assembling and welding technology. The efficiency of the proposed results is proved by practical implementation for real-life industrial tasks.

КОЖЕВНИКОВ Михаил Михайлович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
РОБОТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕПЯТСТВИЙ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 04.02.2003.

Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. 1,63.

Уч.-изд. л. 1,3

Тираж 90 экз.

Зак. 54.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования "Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники"  
Лицензия ЛП №156 от 30.12.2002  
Лицензия ЛВ №509 от 03.08.2001  
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.