

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.865.8:621.791

**Илюшин  
Игорь Эдуардович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
СВАРОЧНЫМИ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ ПРИ НАЛИЧИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Минск 2021

Работа выполнена в учреждении образования «Могилевский государственный университет продовольствия».

Научный руководитель **Кожевников Михаил Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств учреждения образования «Могилевский государственный университет продовольствия».

Официальные оппоненты **Татур Михаил Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электронных вычислительных машин учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
**Карпович Дмитрий Семенович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Оппонирующая организация Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Защита состоится 25 марта 2021 г. в 14:00 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, корп. 1, ауд. 232, тел.: (017) 293 89 89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Автореферат разослан 10 февраля 2021 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент



М.П.Ревотюк

## **ВВЕДЕНИЕ**

Предлагаемая работа посвящена задачам моделирования и управления сварочными роботами-манипуляторами при наличии технологических ограничений. Такие задачи возникают при модернизации сварочных производств на базе роботизированных технологических комплексов (РТК). При автоматическом управлении сварочными роботами необходимо учитывать сложные геометрические характеристики элементов РТК и ограничения на ориентацию сварочного инструмента и сварных швов, обусловленные технологией. Использование промышленных роботов-манипуляторов в сварочном производстве обусловлено как желанием повышения производительности, так и стремлением к повышению качества сварных конструкций в условиях мелко- и среднесерийного производства. Кроме того, серьезными стимулами применения роботов-манипуляторов являются снижение их стоимости на фоне подорожания рабочей силы, недостаток квалифицированного рабочего персонала, освобождение работающих на производстве от тяжелого, интенсивного и монотонного труда, а также возможность снижения влияния вредных факторов сварочного производства на здоровье персонала.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

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

Диссертационная работа выполнена на кафедре автоматизации технологических процессов и производств (АТПП) Могилевского государственного университета продовольствия (МГУП). Тематика диссертационной работы соответствует перечню приоритетных направлений научно-технической деятельности Республики Беларусь на 2016–2020 годы (пункт 3 «Промышленные и строительные технологии и производство» – «Робототехника, интеллектуальные системы управления»).

Исследования проводились в рамках следующих научно-исследовательских работ (НИР): госбюджетные НИР ГБ 31-16 «Разработка и исследование математических моделей ресурсосбережения в системах автоматизации пищевой и химической промышленности» (2011–2015 гг., № ГР20112369) и ГБ 36-15 «Разработка и исследование систем автоматизации, алгоритмических методов и информационных моделей производственных процессов и технологических аппаратов в пищевой и химической промышленности» (2015–2020 гг., № ГР20162564); НИР по заданию подпрограммы «Механика» Государственной программы научных исследований «Механика, металлургия. Диагностика в машиностроении» 1.43 по теме «Методы и алгоритмы управления сборочно-

сварочными роботами-манипуляторами в рабочей среде с препятствиями» (2016–2018 гг., № ГР20161758); НИР по гранту Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Ф17М-123 «Разработка методик и алгоритмов управления промышленными роботами в условиях неполной информации о внешней среде» (2017–2019 гг., № ГР 20170952).

### **Цель и задачи исследования**

**Целью** диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов моделирования и автоматического управления сварочными роботами-манипуляторами при наличии технологических ограничений.

Для достижения цели диссертационной работы необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать метод моделирования траекторий сварочного робота-манипулятора при наличии технологических ограничений;
- разработать метод управления сварочным роботом-манипулятором с учетом кинематических и пространственных ограничений;
- разработать алгоритм управления роботом-манипулятором в процессах дуговой и точечной контактной сварки при наличии технологических ограничений;
- исследовать эффективность разработанных методов и алгоритмов.

**Объектом** исследования являются промышленные роботы-манипуляторы и роботизированные технологические комплексы.

**Предметом** исследования являются методы и алгоритмы моделирования и автоматического управления сварочными роботами-манипуляторами.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

- предлагаемый метод моделирования траекторий сварочного робота-манипулятора, в отличие от известных методов, основан на использовании кинематической модели траекторий для описания допустимых конфигураций робота и использовании упорядоченной решетки для нахождения траектории в случаях, когда использование нерегулярной структуры позволяет сделать это лишь с определенной вероятностью;
- разработанный метод управления сварочным роботом в условиях кинематических и пространственных ограничений, в отличие от известных методов, основан на задании модели траекторий робота в виде графа, вершинам которого соответствует множество допустимых конфигураций и скоростей манипулятора, причем поиск траектории на этом графе выполняется с учетом ограничений на деформацию токоподводящего кабеля;
- предложенный алгоритм управления роботом-манипулятором в процессах дуговой и точечной контактной сварки при наличии технологических ограничений, в отличие от известных алгоритмов, использующих элементы

ручного обучения, основан на представлении множества допустимых траекторий в виде графа, вершинам которого соответствуют конфигурации всех подвижных элементов РТК, причем поиск траектории на этом графе выполняется с учетом ограничений на ориентацию технологических инструментов точечной контактной и дуговой сварки.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод моделирования траекторий сварочного робота-манипулятора, основанный на использовании кинематической модели траекторий, позволяющий учесть сложную форму препятствий и звеньев манипулятора, а также технологические особенности роботизированных сварочных операций.

2. Метод управления роботом-манипулятором с учетом кинематических и пространственных ограничений, основанный на задании модели траекторий робота в виде графа, вершинам которого соответствует множество допустимых конфигураций и скоростей, учитывающий геометрические характеристики элементов роботизированного комплекса, а также ограничения сварочной технологии.

3. Алгоритм управления роботом-манипулятором в процессе дуговой и точечной контактной сварки, основанный на представлении множества допустимых траекторий в виде графа, вершинам которого соответствуют конфигурации всех подвижных элементов РТК, позволяющий учесть геометрические характеристики элементов РТК, а также ограничения, накладываемые на углы ориентации технологического инструмента и ориентацию сварного шва.

### **Практическая значимость**

Результаты диссертационной работы внедрены в производство для роботизации технологического процесса дуговой сварки обечаек при изготовлении двутавровых стальных балок на ООО «Протос» (Могилевский район, акт внедрения от 27.09.2019) и технологического процесса дуговой сварки тороидальных баллонов на предприятии ЧНПУП «Дакор-инжиниринг» (г. Минск, акт внедрения от 12.12.2019). Также результаты диссертационной работы внедрены в образовательный процесс МГУП и используются на кафедре АТПП в курсах дисциплин «Мехатроника и автоматизация средств механизации в химической (пищевой) промышленности» (специальность 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств»), а также «Программное обеспечение систем автоматизации» (специальность 1-40 05 01 «Информационные системы и технологии»).

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Диссертация является самостоятельной законченной научной работой и обобщает результаты научных исследований. Все предлагаемые методы и алгоритмы разработаны и программно реализованы лично автором. В совместно

опубликованных научных работах соискателю принадлежат положения, выносимые на защиту, вклад соавторов в совместно опубликованных работах заключается в участии в постановке задач и определении возможных путей решения, руководстве при проведении научных исследований, в планировании и обсуждении результатов, а также в решении общих вопросов моделирования и управления.

### **Апробация результатов диссертации**

Результаты диссертационного исследования были представлены, докладывались и обсуждались на научных конференциях: Информационные технологии и системы: международная научная конференция (Минск, БГУИР); Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: республиканская научная конференция (Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины); Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: международная научно-техническая конференция (Могилев, ГУВПО «Белорусско-Российский университет»); Техника и технология пищевых производств: международная научная конференция студентов и аспирантов (Могилев, МГУП); Интеллект и наука: всероссийская молодёжная научная конференция с международным участием (Железногорск, Железногорский филиал СФУ); Техника и технология пищевых производств: международная научно-техническая конференция (Могилев, МГУП); Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: международная научно-техническая конференция молодых ученых (Могилев, ГУВПО «Белорусско-Российский университет»); Новые горизонты 2015: Белорусско-китайский молодежный инновационный форум (Минск, БНТУ); Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана: научно-практическая конференция (Минск, БНТУ); Молодежь в науке 2017: международная научная конференция (Минск, НАНБ); Авиация: история, современность, перспективы развития: международная заочная научно-практическая конференция (Минск, БГАА); Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: международная научно-техническая конференция (Минск, БГТУ).

### **Опубликование результатов диссертации**

По полученным в рамках данного диссертационного исследования результатам было опубликовано 37 печатных научных работ: 4 статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК Республики Беларусь, 1 статья в других научных журналах, 24 опубликованные работы в сборниках материалов конференций, а также 8 тезисов докладов. Суммарный объем всех авторских публикаций составляет 6,47 а.л.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация включает в себя перечень условных обозначений, введение, общую характеристику работы, основную часть работы, состоящую из трех глав,

заключение, библиографический список, а также – приложения. Суммарный объем работы составляет 181 страницу машинописного текста, диссертация содержит 16 таблиц на 4 листах, 77 рисунков на 37 листах, 6 приложений на 38 листах, 164 источника (в том числе 37 авторских публикаций соискателя) на 15 листах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Введение** диссертации и **общая характеристика работы** раскрывают актуальность темы диссертационной работы. В данных разделах заложены направления исследований, а также определены цель и задачи диссертационного исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации проанализирована область применения роботов-манипуляторов и РТК в промышленности: выявлены основные особенности и технологические требования, предъявляемые к роботизированным сварочным операциям; выделены основные группы существующих подходов, применяемых для моделирования траекторий и управления роботами-манипуляторами при наличии ограничений, основанные на концепции конфигурационного пространства (на основе карт траекторий, на основе декомпозиции конфигурационного пространства робота, на основе планирования «тонких» движений). Установлено, что существующие подходы к моделированию траекторий роботов-манипуляторов не учитывают сложные геометрические характеристики элементов сварочных РТК. Кроме того, для ряда известных методов моделирования траекторий характерна проблема размерности. Поэтому возникает необходимость разработки метода моделирования траекторий робота-манипулятора, позволяющего учесть сложную форму препятствий и звеньев, а также технологические особенности роботизированных сварочных операций. Известные алгоритмы управления промышленными роботами не учитывают сложных геометрических характеристик элементов РТК (препятствий и звеньев робота) и ряд технологических требований, предъявляемых к роботизированным сварочным операциям. Поэтому возникает необходимость в разработке методов и алгоритмов управления сварочными роботами-манипуляторами, которые будут учитывать геометрические характеристики элементов РТК, а также технологические ограничения на ориентацию сварочного инструмента в процессах дуговой сварки (ДС) и точечной контактной сварки (ТКС).

**Вторая глава** посвящена разработке метода моделирования траекторий сварочного робота-манипулятора при наличии технологических ограничений. При этом в рабочей зоне робота-манипулятора рассматривается некоторое множество препятствий  $\mathbf{V} = \{\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_m\}$ . Конфигурация манипулятора

определяется как вектор  $\mathbf{q} = [q_i]^T$ , где  $q_i$  – это значения углов в сочленениях робота-манипулятора, рад;  $i = 1..n$ ,  $n$  – число степеней свободы робота-манипулятора. Полное конфигурационное пространство представляет собой множество всех возможных конфигураций робота, в том числе и конфигураций, в которых происходит столкновение робота с препятствиями  $\mathbf{C} = \{\mathbf{q}\}$ . Технология сварки накладывает ограничения на ориентацию сварочного инструмента при его движении вдоль сварных швов, соответственно, это приводит к ограниченным диапазонам изменения углов в сочленениях робота-манипулятора. Множество углов в сочленениях, удовлетворяющих технологическим ограничениям, задано в виде

$$\mathbf{C}_T = \{\mathbf{q} \in \mathbf{C} \mid \mathbf{T}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\gamma}) \cap \mathbf{T}_{don}\}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\gamma})$  – множество, описывающее геометрическую модель сварочного инструмента, находящегося в точке с координатами, заданными вектором  $\mathbf{x}$ , с ориентацией, заданной вектором  $\boldsymbol{\gamma}$ ;  $\mathbf{T}_{don}$  – множество геометрических моделей сварочного инструмента, удовлетворяющих технологическим ограничениям при изменении координат вектора  $\boldsymbol{\gamma}$  в допустимых диапазонах.

Если геометрическая модель робота-манипулятора в конфигурации  $\mathbf{q}$  определяется как множество  $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ , то пространство конфигураций, свободное от столкновений, описывается как  $\mathbf{C}_f = \{\mathbf{q} \in \mathbf{C} \mid \mathbf{M}(\mathbf{q}) \cap \mathbf{V} = \emptyset\}$ . Тогда задача моделирования траектории движения сварочного робота-манипулятора формулируется следующим образом: *среди всех последовательностей дискретных конфигураций  $\mathbf{q}_{s1}, \mathbf{q}_{s2}, \dots, \mathbf{q}_{sg} \in \mathbf{C}_f$ , координаты которых принадлежат допустимому множеству (1), найти последовательность, при которой минимизируется объем движений робота-манипулятора*

$$\sum_{m=1}^{g-1} (\mathbf{q}_{s(m+1)} - \mathbf{q}_{sm}) \rightarrow \min.$$

Пространство свободных конфигураций сварочного робота-манипулятора описано в виде кинематической модели траектории, которая представляет собой неориентированный граф  $\mathbf{R} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$ . Формирование множества вершин графа  $\mathbf{V}$  производится за счет генерации случайных конфигураций сварочного робота-манипулятора из допустимого множества (1) и проверки робота на столкновение с препятствиями. Если столкновение отсутствует, то конфигурация включается в множество вершин  $\mathbf{V}$ , в противном случае она отбрасывается. Ребрам графа  $\mathbf{E}$  соответствуют прямолинейные фрагменты траекторий от одной вершины из множества  $\mathbf{V}$  к соседней. Зона, в которой определено большое количество препятствий (так называемый «узкий коридор»), дискретизируется при помощи упорядоченной решетки из-за того, что вероятность выявления такой зоны случайным методом мала. В результате вершины и ребра, упорядоченные в виде



решетки, включаются в граф  $\mathbf{R}$ . Такой подход позволяет обойти проблему размерности ввиду того, что решетчатая дискретизация применяется лишь в ограниченной области конфигурационного пространства.

Предложенный метод моделирования траекторий предполагает реализацию следующих этапов:

1. Формируется множество  $\mathbf{V}$ , которое включает  $N_{max}$  конфигураций сварочного робота-манипулятора, свободных от столкновений и принадлежащих допустимому множеству (1).

2. Осуществляется поиск прямолинейных фрагментов траекторий между соседними конфигурациями  $\mathbf{q}_i$ ,  $\mathbf{q}_j$ , и эти фрагменты включаются в множество  $\mathbf{E}$ .

3. В случае, когда между соседними конфигурациями  $\mathbf{q}_i$ ,  $\mathbf{q}_j$  не существует прямолинейного фрагмента траектории и рассматриваемые конфигурации лежат в области, насыщенной препятствиями, осуществляется поиск криволинейного фрагмента траектории между  $\mathbf{q}_i$  и  $\mathbf{q}_j$ , который дискретизирован при помощи решетки  $\mathbf{G}$ . В случае нахождения такого участка он включается в граф  $\mathbf{R}$ .

4. Создание множества ребер  $\mathbf{E}$  осуществляется при помощи циклического повтора шагов 2, 3 в количестве  $K_{max}$  раз.

5. Производится поиск траектории с минимальным объемом движений на графе  $\mathbf{R}$ .

Тестирование разработанного метода было осуществлено в среде автономного программирования промышленных манипуляторов, а в качестве объекта исследования выступал роботизированный комплекс для ДС (рисунок 1, *а*). Исследуемый РТК построен на базе манипулятора KR125, который оснащен сварочной горелкой (рисунок 1, *б*), и предназначен для сварки конструкции, включающей 9 металлических труб.

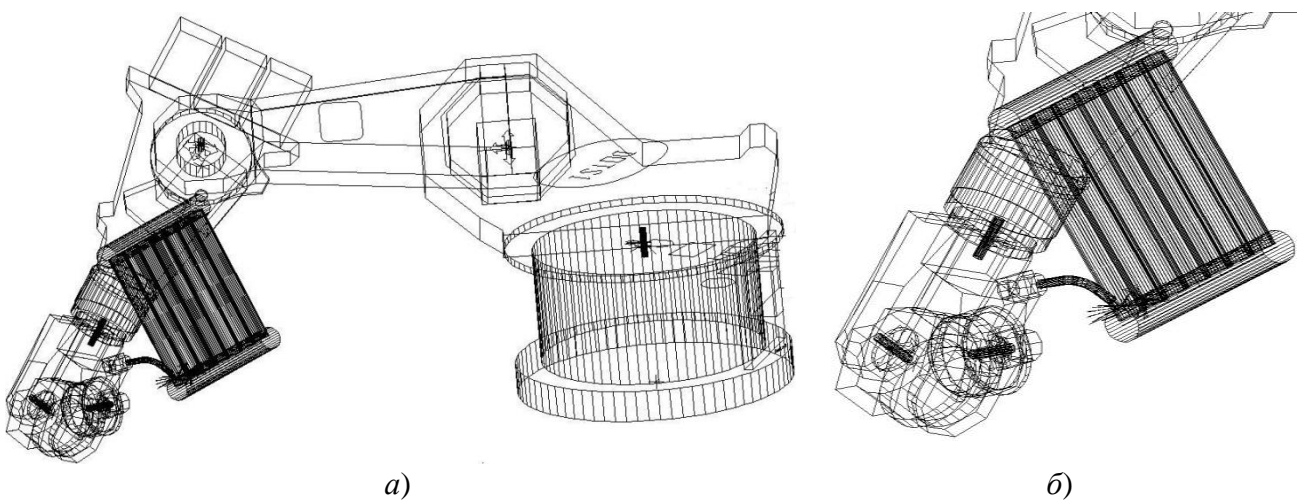


Рисунок 1. – Экспериментальная роботизированная ячейка для дуговой сварки (*а*) и ориентация сварочной горелки относительно шва (*б*)

Эксперимент заключался в нанесении на трехмерную модель сварной конструкции 14 швов: швы наносятся в форме эллипсов, которые при этом изогнуты в пространстве. Предложенный метод позволил осуществить моделирование траекторий движения в условиях ограничений на ориентацию сварочной горелки и при этом обеспечить ее перемещение вдоль всех 14 сварных швов.

Полученные на основе предложенного метода траектории были протестированы в ходе экспериментов с РТК дуговой сварки, смонтированного в исследовательской лаборатории. РТК включает сварную конструкцию, робот-манипулятор Fanuc M-710iC/50 с 6 степенями свободы, оснащенный горелкой ДС. Программная реализация предложенной кинематической модели траектории робота-манипулятора использована совместно с системой моделирования ROBOGUIDE для формирования траекторий движения манипулятора относительно линий сварных швов сложной формы. Показано, что при движении реального робота-манипулятора вдоль экспериментальных траекторий обеспечено отсутствие столкновений горелки и звеньев манипулятора с препятствиями, а также обеспечено выполнение технологических ограничений на ориентацию горелки и конструктивных ограничений на углы в сочленениях. Проведенные эксперименты показали, что предложенный метод позволяет в среднем на 30 % снизить количество тестов столкновений по сравнению с известными методами.

В **третьей главе** описывается разработка методов и алгоритмов автоматического управления сварочным роботом-манипулятором с учетом кинематических, пространственных и технологических ограничений. Предложенный метод управления роботом-манипулятором применяется для технологического процесса ТКС с роботом-манипулятором, имеющим подвесной трансформатор, кабель которого подвержен изгибу и скручиванию. Предлагаемый метод управления роботом-манипулятором для ТКС основан на задании ограничений на деформацию кабеля. Изгиб кабеля оценивается косвенно по длине кривой  $L$ , м, которая соединяет две точки его крепления и характеризуется длиной не более установленного предела  $L_{\max}$ . Скручивание кабеля оценивается при помощи величины углов  $\varphi$  и  $\psi$ , рад, характеризующих поворот клещей относительно осей  $x$  и  $y$  соответствующего клещам фрейма, для них установлены максимально допустимые углы поворота клещей  $\varphi_{\max}$  и  $\psi_{\max}$ . В результате ограничения на деформацию кабеля имеют вид

$$L \leq L_{\max}, \quad \varphi \leq \varphi_{\max}, \quad \psi \leq \psi_{\max}. \quad (2)$$

Для учета угловых скоростей манипулятора всем конфигурациям ставятся в соответствие векторы скоростей

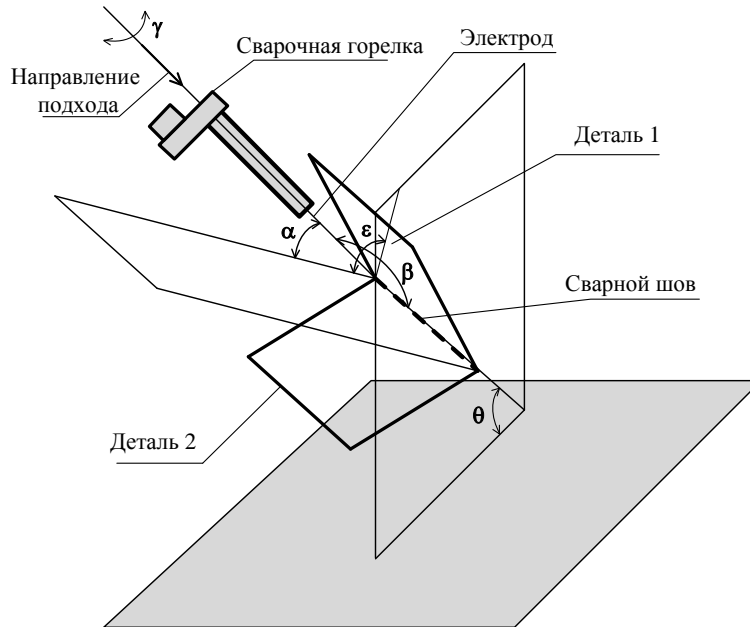
$$\|\dot{\mathbf{q}}\| \leq \dot{\mathbf{q}}_{\max}, \quad (3)$$

где  $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_i]^T$ ,  $\dot{q}_i$  – значения угловых скоростей звеньев робота, рад/с;  $\dot{\mathbf{q}}_{\max}$  – вектор, определяющий предельные значения угловых скоростей.

Модель конфигурационного пространства сварочного робота-манипулятора для ТКС представляется в виде графа  $\mathbf{R} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$ , при этом его вершины  $\mathbf{V}$  – это множество свободных от столкновений конфигураций  $\mathbf{q}_i$  и множество векторов допустимых угловых скоростей  $\dot{\mathbf{q}}_i$ , соответствующих данным конфигурациям. Процесс генерации вершин графа  $\mathbf{V}$  происходит аналогично методу моделирования из главы 2, однако помимо тестирования столкновений осуществляется проверка ограничений на деформацию кабеля (2). При выполнении данных условий осуществляется генерация вектора угловой скорости  $\dot{\mathbf{q}}_i$ , который соответствует конфигурации  $\mathbf{q}_i$ , и координаты которого удовлетворяют ограничениям (3), после этого конфигурация робота  $\mathbf{q}_i$  и вектор угловой скорости  $\dot{\mathbf{q}}_i$  включаются в множество  $\mathbf{V}$ . Ребра  $\mathbf{E}$  графа  $\mathbf{R}$  формируются в соответствии с описанным в главе 2 методом, но при этом дополнительно проводится проверка на возможность перемещения сварочного робота-манипулятора из конфигурации  $\mathbf{q}_i$  в конфигурацию  $\mathbf{q}_j$  со скоростью  $\dot{\mathbf{q}}_i$ . При дискретизации узкой зоны конфигурационного пространства упорядоченной решеткой каждой конфигурации в этой зоне ставится в соответствие постоянный вектор угловых скоростей  $\dot{\mathbf{q}}_{greed}$ . Далее на графе ищется траектория, соединяющая начальную  $\mathbf{q}_{s1}$  и целевую  $\mathbf{q}_{sg}$  конфигурации манипулятора, в виде последовательности из соседних конфигураций  $\mathbf{q}_{s1}, \mathbf{q}_{s2}, \dots, \mathbf{q}_{sg} \in \mathbf{C}_f$ , каждой из которых поставлен в соответствие вектор скоростей  $\dot{\mathbf{q}}_{s1}, \dot{\mathbf{q}}_{s2}, \dots, \dot{\mathbf{q}}_{sg}$ .

Тестирование предлагаемого метода проводилось в среде моделирования РТК с использованием эмулятора системы управления сварочным роботом-манипулятором. Объектом исследования выступал роботизированный комплекс для ТКС металлической детали, который состоит из манипулятора KR125 и сварочных клещей; на трехмерную модель свариваемой детали наложено 4 шва. Анализ результатов проведенных экспериментов позволяет заключить, что предложенный метод позволяет формировать траектории робота-манипулятора при наличии кинематических и пространственных ограничений.

Разработана модификация алгоритма управления роботом-манипулятором для процесса ДС, учитывающая технологические ограничения на ориентацию сварочной горелки и сварного шва (рисунок 2), которые определяются пятью углами:  $\theta$ ,  $\varepsilon$  (определяют ориентацию шва),  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  (определяют ориентацию горелки).



**Рисунок 2. – Ориентация горелки дуговой сварки и сварного шва**

Ограничения на ориентацию задаются в виде диапазонов изменения углов:

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}, \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}, \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}, \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}, \varepsilon_{\min} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}. \quad (4)$$

Допустимые диапазоны изменения углов ориентации разбиты с параметром дискретизации  $n$ , в результате сформированы следующие множества значений:

$$\{\alpha_i\}_{i=1}^n, \{\beta_i\}_{i=1}^n, \{\gamma_i\}_{i=1}^n, \{\theta_i\}_{i=1}^n, \{\varepsilon_i\}_{i=1}^n, \quad (5)$$

где  $\alpha_1 = \alpha_{\min}$ ,  $\alpha_n = \alpha_{\max}$ ,  $\beta_1 = \beta_{\min}$ ,  $\beta_n = \beta_{\max}$ ,  $\gamma_1 = \gamma_{\min}$ ,  $\gamma_n = \gamma_{\max}$ ,  $\theta_1 = \theta_{\min}$ ,  $\theta_n = \theta_{\max}$ ,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\min}$ ,  $\varepsilon_n = \varepsilon_{\max}$ .

Модель сварного шва определяется в виде множества точек  $\{p_j\}_j^N$ , соединенных прямолинейными либо дугowymi сегментами. Координаты этих точек в мировой системе координат заданы множеством векторов  $\{\mathbf{x}_j\}_j^N$ . Нижние и верхние конструктивные ограничения на изменения углов в сочленениях сварочного робота-манипулятора и позиционера, ориентирующего деталь в пространстве, определены в виде

$$\mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max}, \mathbf{g}_{\min} \leq \mathbf{g} \leq \mathbf{g}_{\max}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{q}_{\min}$ ,  $\mathbf{q}_{\max}$  – векторы, определяющие минимальное и максимальное конструктивные ограничения, накладываемые на значения углов  $q_i$ ;  $\mathbf{g} = [g_i]^T$  – конфигурация позиционера;  $g_i$  – значения углов в его сочленениях;  $\mathbf{g}_{\min}$ ,  $\mathbf{g}_{\max}$  – векторы, которые задают минимальное и максимальное конструктивные ограничения, обусловленные конструкцией позиционера.

Модель свободного конфигурационного пространства робота-манипулятора  $C_f = \{\mathbf{q} | \mathbf{M}(\mathbf{q}) \cap \mathbf{P}(\mathbf{g}) = \emptyset\}$  представлена в виде неориентированного графа  $DC_f = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$ , где  $\mathbf{P}(\mathbf{g})$  – геометрическая модель позиционера с размещенной на ней сварной конструкцией в конфигурации  $\mathbf{g}$ . Вершины  $\mathbf{V} \subset C_f$  данного графа – это свободные от столкновений конфигурации манипулятора, которым соответствуют некоторые конфигурации позиционера. Формирование множества вершин  $\mathbf{V}$  происходит следующим образом: осуществляется генерация конфигурации робота-манипулятора и проводится тест на столкновение. При отсутствии столкновений рассматриваемая конфигурация добавляется в множество  $\mathbf{V}$ , при наличии столкновений она исключается. Ребрам  $\mathbf{E}$  графа ставятся в соответствие участки траекторий сварочной горелки между конфигурациями робота из множества  $\mathbf{V}$ . Далее ищутся траектории, позволяющие реализовать движение сварочной горелки вдоль сварного шва за счет скоординированного перемещения робота-манипулятора и позиционера по свободным от столкновений конфигурациям с учетом технологических и механических ограничений (4) и (6) соответственно.

Разработанный алгоритм управления роботом-манипулятором в процессе ДС протестирован на примере компьютерной модели РТК. Тестируемый РТК для сварки металлических пластин построен на базе робота-манипулятора IR761 и пятиосного позиционера. Результаты тестирования разработанного алгоритма управления роботом-манипулятором в процессе ДС с учетом технологических ограничений показывают, что предложенный подход к управлению позволяет найти траектории движения манипулятора вдоль сварных швов с обходом технологических ограничений, а также снизить объемы движений робота при выполнении ориентирующих операций позиционером.

Разработана модификация алгоритма управления роботом-манипулятором, учитывающая ограничения процесса ТКС. Она учитывает технологические ограничения, накладываемые на ориентацию сварочных клещей. Эта ориентация в каждой точке шва  $p_i$  определяется двумя углами  $\alpha$  и  $\beta$  (угол наклона плоскости движения электрода и угол наклона электрода к линии сварного шва соответственно), а также углом  $\gamma$ . Ограничения на углы ориентации задаются в виде следующих диапазонов:

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}, \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}, \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}. \quad (7)$$

Проведена дискретизация этих диапазонов с параметром  $n$  и сформированы следующие множества значений:

$$\{\alpha_i\}_{i=1}^n, \{\beta_i\}_{i=1}^n, \{\gamma_i\}_{i=1}^n, \quad (8)$$

где  $\alpha_1 = \alpha_{\min}$ ,  $\alpha_n = \alpha_{\max}$ ,  $\beta_1 = \beta_{\min}$ ,  $\beta_n = \beta_{\max}$ ,  $\gamma_1 = \gamma_{\min}$ ,  $\gamma_n = \gamma_{\max}$ .

В конфигурационном пространстве сварочного робота-манипулятора определено множество конфигураций, соответствующих точке шва  $p_i$  и множеству допустимых в этой точке дискретных значений углов ориентации  $[\alpha_j^i, \beta_j^i, \gamma_j^i]^T$ ,  $j = 1, \dots, N_0$ :

$$\mathbf{q}^i = \left\{ \text{ikin} \left( [\alpha_j^i, \beta_j^i, \gamma_j^i]^T, \mathbf{x}_i, \text{conf} \right) \right\}_{j=1}^{N_0} \cap \mathbf{C}_f, \quad (9)$$

где  $\mathbf{C}_f = \{ \mathbf{q} \in \mathbf{C} \mid \mathbf{M}(\mathbf{q}) \cap \mathbf{V} = \emptyset \}$ ,  $N_0 = n^3$ ;  $\text{ikin}(\dots)$  – функция вычисления обратного кинематического преобразования;  $\text{conf}$  – индикатор конфигурации сварочного робота-манипулятора.

Задача управления роботом-манипулятором при перемещении сварочных клещей по точкам шва  $p_i$  сформулирована следующим образом: *среди всех траекторий, последовательно соединяющих конфигурации сварочного робота-манипулятора, которые входят в множества  $\mathbf{q}^1, \mathbf{q}^2, \dots, \mathbf{q}^N$  и определяются выражением (9), найти траекторию с минимальным объемом движений*  $\sum_{m=1}^{N-1} (\mathbf{q}^{m+1} - \mathbf{q}^m) \rightarrow \min$ . Для решения данной задачи предложен алгоритм

управления (рисунок 3).

В данном алгоритме применяются следующие обозначения:  $\text{Gen}(\mathbf{q}^i)$  – функция, осуществляющая генерацию некоторой конфигурации сварочного робота-манипулятора  $\mathbf{q}^i$ ;  $\text{Lin}(\mathbf{q}^i, \mathbf{V})$  – функция для формирования линейного фрагмента траектории, соединяющего конфигурацию  $\mathbf{q}^i$  с конфигурациями, входящими в множество вершин  $\mathbf{V}$  дискретного графа  $\mathbf{DC}_f$ ;  $N_d$  – число вершин дискретного графа  $\mathbf{DC}_f$ ;  $\text{search}(\alpha^i, \beta^i, \gamma^i, \mathbf{x}^i, \text{conf})$  – функция, реализующая поиск свободных от столкновений конфигураций сварочного робота-манипулятора в данной точке шва  $p_i$ ;  $\text{wt}(e_1, e_2)$  – функция определения весовых коэффициентов  $\tau_r$  для ребер графа;  $\text{GraphSearch}(\mathbf{V}, \mathbf{E}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{q}^1, \mathbf{q}^N)$  – функция нахождения наименьших путей на дискретном графе  $\mathbf{DC}_f$  от элементов из множества  $\mathbf{q}^1$  до элементов из множества  $\mathbf{q}^N$ ;  $\text{MinTrag}(\text{Trag})$  – функция нахождения кратчайшего пути  $\text{path}$  из некоторого количества путей  $\text{Trag}$ .

Тестирование предложенного алгоритма управления роботом-манипулятором в процессе ТКС выполнялось в среде автономного программирования РТК. В качестве объекта использовалась роботизированная ячейка, включающая манипулятор IR161, оснащенный сварочными клещами, сварную конструкцию, кондукторную плиту и технологическую оснастку.

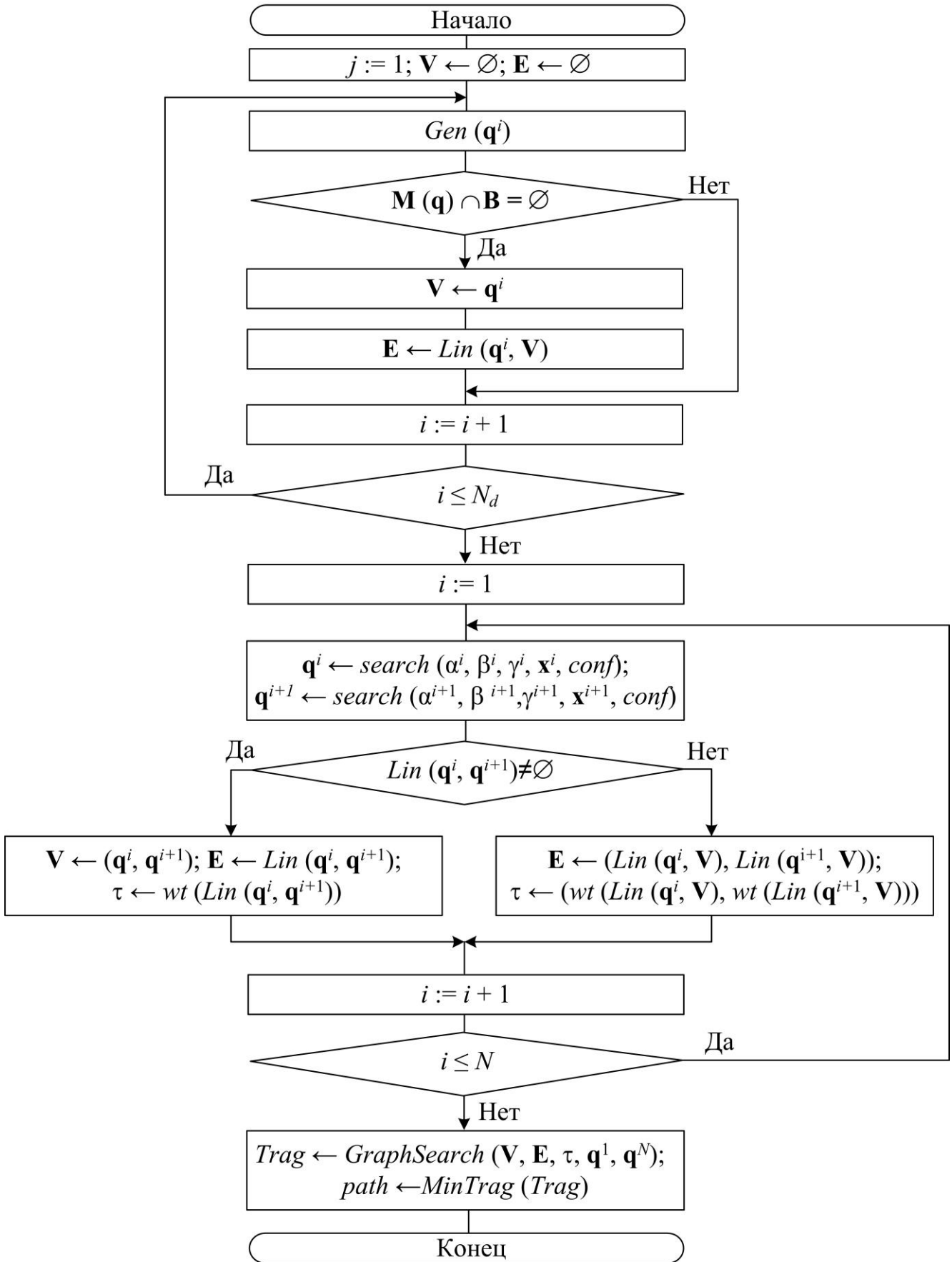


Рисунок 3. – Алгоритм управления роботом-манипулятором в процессе ТКС

Результаты тестирования предложенного алгоритма позволили заключить, что он позволяет обеспечить ориентацию сварочных клещей в допустимых пределах (7) во всех точках сварного шва и обеспечивает выбор траектории с минимальным объемом движений манипулятора.

**Приложения** содержат исходные тексты программных модулей и технологические программы, реализующие траектории движения робота, а также акты внедрения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основной результат диссертационной работы заключается в разработке методов и алгоритмов моделирования и автоматического управления сварочными роботами-манипуляторами с учетом технологических ограничений, что обеспечивает решение важных прикладных задач в области автоматизации технологических процессов и создания систем автоматического управления РТК.

### **Основные научные результаты диссертации**

1) Проведен анализ области применения роботов-манипуляторов и РТК в промышленности: выявлены основные особенности и технологические требования, предъявляемые к роботизированным сварочным операциям; выделены основные группы существующих подходов, применяемых для моделирования траекторий и управления сварочным роботом-манипулятором при наличии ограничений. Установлено, что существующие подходы к моделированию траекторий и управлению сварочными манипуляторами не учитывают сложные геометрические характеристики элементов роботизированных комплексов, а также ряд технологических требований, предъявляемых к роботизированным сварочным операциям. Поэтому возникает необходимость разработки методов и алгоритмов моделирования траекторий и управления сварочными роботами-манипуляторами, позволяющих учесть сложную форму препятствий и звеньев робота, а также технологические особенности роботизированных сварочных операций [3–5, 12, 20, 21, 27, 29, 30].

2) Разработан метод моделирования траекторий сварочного робота-манипулятора при наличии технологических ограничений, основанный, в отличие от известных, на использовании кинематической модели траектории и решетчатой дискретизации «насыщенных» препятствиями зон. Предлагаемый метод позволяет учесть сложную форму препятствий и звеньев манипуляторов, а также технологические особенности роботизированных операций. Проведенное исследование на базе манипулятора Fanuc M-710iC с 6 степенями свободы и на базе системы автономного программирования показывает, что предлагаемый подход реализует адекватную модель, позволяющую в среднем на 30 % снизить



количество тестов столкновений по сравнению с известными методами [1, 6, 7–11, 31–33, 37].

3) Разработан метод управления сварочным роботом-манипулятором с учетом кинематических и пространственных ограничений. Предлагаемый метод, в отличие от известных, основан на задании модели траекторий робота в виде графа, вершинам которого соответствует множество допустимых конфигураций и скоростей. Предложенный метод обеспечивает возможность учета сложных геометрических характеристик РТК ТКС, ограничений, накладываемых на углы в сочленениях робота-манипулятора и угловые скорости, а также учитывает ограничения на деформацию силового кабеля для случая сварочного манипулятора с подвесным трансформатором. Экспериментальное исследование с использованием эмулятора системы управления сварочными роботами-манипуляторами типоразмера KR125 показало, что предлагаемый подход учитывает кинематические и пространственные ограничения и позволяет формировать свободные от столкновений траектории движения [3, 12–19, 34–36].

4) Разработан алгоритм управления роботом-манипулятором в процессах ДС и ТКС при наличии технологических ограничений. Предложенный подход, в отличие от известных, основан на представлении множества допустимых траекторий в виде графа, вершинам которого соответствуют конфигурации всех подвижных элементов РТК. Предложенный алгоритм учитывает геометрические характеристики роботизированных комплексов (сложную форму звеньев и препятствий), а также технологические ограничения, связанные с особенностями процесса дуговой сварки, в частности ограничения, накладываемые на углы ориентации технологического инструмента и ориентацию сварного шва. Тестирование разработанного алгоритма показало, что он позволяет сгенерировать траектории движения робота-манипулятора вдоль сварных швов с обходом технологических ограничений на углы сварки:  $\alpha = \pm 10^\circ$ ,  $\beta = \pm 10^\circ$ , точечная контактная сварка,  $\alpha = \pm 15^\circ$ ,  $\beta = 60..120^\circ$ , дуговая сварка. Проведенный расчет эффективности в условиях технологической линии ООО «Протос» показал, что внедрение РТК с системой управления на базе разработанного алгоритма позволит увеличить производительность линии сварки в среднем на 15 % со сроком окупаемости 1,45 года [4, 5, 22, 24, 26].

5) Эффективность полученных результатов подтверждается практическим применением разработанных методов и алгоритмов для решения задач автоматического управления роботами-манипуляторами Fanuc, KUKA в условиях технологических процессов дуговой сварки тороидальных баллонов и обечаек на предприятиях ЧНПУП «Дакор-инжиниринг» и ООО «Протос», для которых удалось сократить сроки перепрограммирования РТК в среднем на 38 % [2, 26, 28].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанные методы, алгоритмы и программные средства могут быть использованы при выполнении проектов по созданию новых высокоэффективных систем автоматического управления РТК, применяемыми при автоматизации сборочно-сварочных производств. Также полученные результаты могут быть использованы при разработке специализированных систем автоматизированного проектирования промышленных роботов и РТК в конструкторских бюро предприятий автомобильной промышленности (ОАО «МТЗ», ОАО «БелАЗ», ОАО «МАЗ», НПП «Белкотломаш») и других производствах. Так, в условиях производства ООО «Протос» (Могилевский район, акт внедрения от 27.09.2019) предложены перспективные методы и алгоритмы управления РТК дуговой сварки обечаек в технологическом процессе изготовления двутавровых стальных балок. Кроме того, для сварочного производства на ЧНПУП «Дакор-инжиниринг» (г. Минск, акт внедрения от 12.12.2019) предложены модели, методы и алгоритмы автоматического управления в технологическом процессе дуговой сварки тороидальных баллонов. Разработанные модели, методы и алгоритмы применены в действующем производстве для повышения производительности и гибкости оборудования за счет повышения скорости выполнения сварочных операций и сокращения сроков перепрограммирования роботов, а также повышения качества продукции.

Результаты диссертационной работы также могут быть использованы в учебном процессе университетов по дисциплинам, связанным с мехатроникой, робототехникой и автоматизацией технологических процессов. В частности, они внедрены в образовательный процесс МГУП и используются на кафедре АТПП по дисциплине «Мехатроника и автоматизация средств механизации в химической (пищевой) промышленности» (специальность 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств», акт внедрения № 03-2018 от 05.06.2018), а также по дисциплине «Программное обеспечение систем автоматики» (специальность 1-40 05 01 «Информационные системы и технологии», акт внедрения № 01-2019 от 05.03.2019).

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных журналах по перечню ВАК

1. Кожевников, М. М. Комбинированный метод синтеза траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, И. Э. Илюшин, А. В. Старовойтов // Доклады БГУИР. – 2016. – № 1 (95). – С. 12–18.

2. Илюшин, И. Э. Алгоритмы управления сварочными роботами-манипуляторами на основе статистической модели конфигурационного пространства / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 1 (12). – С. 22–29.

3. Кожевников, М. М. Генерация программных траекторий для роботов-манипуляторов точечной контактной сварки в среде с препятствиями / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, И. Э. Илюшин, А. В. Господ // Доклады БГУИР. – 2017. – №7 (109). – С. 32–39.

4. Кожевников, М. М. Методы и алгоритмы генерации программных траекторий роботов-манипуляторов в процессе дуговой сварки / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, И. Э. Илюшин, Л. А. Лоборева // Доклады БГУИР. – 2019. – №1 (119). – С. 19–25.

### Статьи в других научных журналах

5. Кожевников, М. М. Планирование траекторий роботов-манипуляторов в технологическом процессе точечной контактной сварки / М. М. Кожевников, И. Э. Илюшин, А. В. Старовойтов, В. Н. Косырев // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2016. – № 2 (65). – С. 3–10.

### Материалы конференций

6. Кожевников, М. М. Планирование оптимальных траекторий промышленных роботов-манипуляторов на основе статистических моделей конфигурационного пространства / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, И. Э. Илюшин // Информационные технологии и системы 2013 (ИТС 2013): материалы международной научной конференции, БГУИР, Минск, Беларусь, 23 октября 2013 г. / редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2013. – С. 58–59.

7. Илюшин, И. Э. Оптимизация траекторий роботов-манипуляторов в конфигурационном пространстве / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 24–25 апреля 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Белорус.-

Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 25–26.

8. Илюшин, И. Э. Планирование оптимальных траекторий для роботизированных технологических комплексов / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Интеллект и наука: труды XIV Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием, Железногорск, 16–18 апреля 2014 г. / редкол.: А. В. Хныкин (отв. ред.) [и др.]. – Железногорск: Железногорский филиал СФУ, 2014. – С. 71–73.

9. Илюшин, И. Э. Разработка метода и алгоритма синтеза статистической модели конфигурационного пространства роботов-манипуляторов в среде с препятствиями / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Информационные технологии и системы 2014 (ИТС 2014): материалы Международной научной конференции, БГУИР, Минск, Беларусь, 29 октября 2014 г. / редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2014. – С. 48–49.

10. Илюшин, И. Э. Разработка комбинированного алгоритма планирования траекторий роботов-манипуляторов / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников, А. В. Старовойтов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 16–17 апреля 2015 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 29–30.

11. Илюшин, И. Э. Комбинированный подход к синтезу траекторий промышленных роботов-манипуляторов / И. Э. Илюшин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, Могилев, 22–23 октября 2015 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 20.

12. Илюшин, И. Э. Разработка оптимального алгоритма автоматического управления роботом-манипулятором в рабочей среде с препятствиями / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Информационные технологии и системы 2015 (ИТС 2015): материалы международной научной конференции (БГУИР, Минск, Беларусь, 28 октября 2015 г.) / редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2015. – С. 52–53.

13. Илюшин, И. Э. Комбинированный метод автоматического управления роботом-манипулятором в среде с препятствиями / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Новые горизонты 2015: сборник материалов Белорусско-китайского молодежного инновационного форума, БНТУ, Минск, 26–27 ноября 2015 г. / Минск: БНТУ, 2015. – С. 197–198.

14. Господ, А. В. Методика тестирования алгоритмов автоматического управления роботами-манипуляторами / А. В. Господ, И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников, Л. А. Лоборева, Д. А. Чайкин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14–15 апреля 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 27–28.

15. Илюшин, И. Э. Разработка алгоритма синтеза траектории сварочного робота-манипулятора / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы докладов XIX Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, 21–23 марта 2016 г.) / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: О. М. Демиденко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – Часть 1. – С. 226–227.

16. Господ, А. В. Разработка алгоритма управления сборочно-сварочными манипуляторами и его тестирование с помощью робота на базе Arduino / А. В. Господ, И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана: материалы научно-практической конференции (БНТУ, Минск, Беларусь, 13 октября 2016 г.) / Минск: БНТУ, 2016. – С. 275–277.

17. Илюшин, И. Э. Система управления сварочным роботом-манипулятором на основе статистической модели конфигурационного пространства / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Информационные технологии и системы 2016 (ИТС 2016): материалы международной научной конференции (БГУИР, Минск, Беларусь, 26 октября 2016 г.) / редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2016. – С. 40–41.

18. Илюшин, И. Э. Автоматическое управление промышленным роботом-манипулятором для точечной контактной сварки в среде с препятствиями / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Информационные технологии и системы 2017 (ИТС 2017): материалы междунар. науч. конф. (Республика Беларусь, Минск, 25 октября 2017 г.) / редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2017. – С. 24–25.

19. Илюшин, И. Э. Автоматическое управление роботом-манипулятором для точечной контактной сварки при наличии кинематических и пространственных ограничений / И. Э. Илюшин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых (Могилев, 26–27 октября 2017 г.) / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 27.

20. Кожевников, М. М. Мониторинг состояния средств механизации на основе нейронных сетей / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, И. Э. Илюшин // *Авиация: история, современность, перспективы развития: сборник материалов II Международной заочной научно-практической конференции БГАА*. Минск, 9–10 ноября 2017 г. / сост. М. А. Бабицкая [и др.]; под научн. ред. Г. Ф. Ловшенко. – Минск: БГАА, 2017. – С. 186–187.

21. Господ, А. В. Алгоритмы управления роботами в условиях неопределенности внешней среды / А. В. Господ, И. Э. Илюшин // *Молодежь в науке – 2017: сб. материалов междунар. конф. молодых ученых (Минск, 30 окт. – 2 нояб. 2017 г.)*. В 2 ч. Ч. 2. Гуманитарные, медицинские, физико-математические, физико-технические, химические науки / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2018. – С. 126–132.

22. Илюшин, И. Э. Реализация программных траекторий промышленного робота-манипулятора для точечной контактной сварки с учетом технологических ограничений / И. Э. Илюшин // *Техника и технология пищевых производств : матер. XII Междунар. науч.-техн. конф. (Могилев, 19–20 апреля 2018 г.)* / В 2 т. / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия» ; редкол. : А. В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев : МГУП, 2018. – Т. 2. – С. 193–194.

23. Илюшин, И. Э. Формирование статистических моделей конфигурационного пространства сборочно-сварочных роботов-манипуляторов / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников, А. В. Господ // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Могилев, 26–27 апр. 2018 г.)* / редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорусско-Российский университет, 2018. – С. 31–32.

24. Илюшин, И. Э. Автоматическое управление промышленными роботами-манипуляторами при наличии технологических ограничений / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // *Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 3–6 октября 2018 г.* – М. : БГТУ, 2018. – С. 71–74.

25. Илюшин, И. Э. Управление промышленными роботами-манипуляторами в процессе дуговой сварки при наличии технологических ограничений / И. Э. Илюшин // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых (Могилев, 25–26 октября 2018 г.)* / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 21.

26. Илюшин, И. Э. Автоматическое управление роботами-манипуляторами для дуговой сварки с учетом технологических ограничений / И. Э. Илюшин,

М. М. Кожевников // Информационные технологии и системы 2018 (ИТС 2018): материалы междунар. науч. конф. (Республика Беларусь, Минск, 25 октября 2018 г.) / редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2018. – С. 40–41.

27. Кожевников, М. М. Методы технической диагностики и мониторинга состояния средств механизации / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, И. Э. Илюшин, А. А. Юркина // Авиация: история, современность, перспективы развития: сборник материалов III Международной заочной научно-практической конференции БГАА. Минск, 8–9 ноября 2018 г. / ред. М. В. Кудин [и др.]; под научн. ред. А. А. Шегидевича. – Минск: БГАА, 2018. – С. 206–209.

28. Кожевников, М. М. Программная система управления промышленными манипуляторами с учетом ограничений / М. М. Кожевников, В. М. Шеменков, И. Э. Илюшин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 48–49.

29. Кожевников, М. М. Планирование траекторий промышленного роботоманипулятора Fanuc710iC с использованием нейронных сетей / М. М. Кожевников, И. Э. Илюшин, А. А. Юркина, Е. Ю. Демиденко // Информационные технологии и системы 2019 (ИТС 2019) : материалы международной научной конференции, БГУИР, Минск, Беларусь, 30 октября 2019 г. – Information Technologies and Systems 2019 (ITS 2019) : Proceeding of The International Conference, BSUIR, Minsk, 30th October 2019 / редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 44–45.

### **Тезисы докладов**

30. Илюшин, И. Э. Планирование траекторий роботов-манипуляторов на основе нейронных сетей / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: тезисы докладов XVII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов, Гомель, 24–26 марта 2014 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: О. М. Демиденко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – С. 206.

31. Илюшин, И. Э. Разработка алгоритма планирования оптимальных траекторий промышленных роботов-манипуляторов / И. Э. Илюшин // Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов IX Международной научной конференции студентов и аспирантов в двух частях, Могилев, 24–25 апреля 2014 г. / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: МГУП, 2014. – Часть 2. – С. 115.

32. Илюшин, И. Э. Разработка модифицированного алгоритма планирования траекторий роботов-манипуляторов на основе карты вероятных траекторий / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: тезисы докладов XVIII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов, Гомель, 23–25 марта 2015 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: О. М. Демиденко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – Часть 1. – С. 149–150.

33. Илюшин, И. Э. Разработка алгоритма поиска траекторий роботов-манипуляторов в конфигурационном пространстве на основе карты вероятных траекторий и решетчатой карты траекторий / И. Э. Илюшин // Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов X Международной науч.-техн. конференции, 23–24 апреля 2015 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А. В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: МГУП, 2015. – С. 281.

34. Илюшин, И. Э. Алгоритм поиска оптимальной траектории промышленного робота-манипулятора / И. Э. Илюшин // Техника и технология пищевых производств : тез. докл. X Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов, 28–29 апреля 2016 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А. В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: МГУП, 2016. – С. 321.

35. Илюшин, И. Э. Система управления промышленным роботом-манипулятором в условиях кинематических и пространственных ограничений / И. Э. Илюшин // Техника и технология пищевых производств : тезисы докладов XI Международной науч.-техн. конференции, 20–21 апреля 2017 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А. В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: МГУП, 2017. – С. 335.

36. Господ, А. В. Алгоритмы управления роботами в условиях неопределенности внешней среды / А.В. Господ, И.Э. Илюшин // Тезисы XIV Международной научной конференции «Молодежь в науке 2017» (Республика Беларусь, Минск, 30 октября – 2 ноября 2017 г.). – Минск: НАНБ, 2017. – С. 204.

37. Илюшин, И. Э. Моделирование траекторий движения сварочных роботов-манипуляторов / И. Э. Илюшин, Е. Ю. Демиденко, В. Ю. Шаратов // Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов XI Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов, 18–19 апреля 2019 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А. В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: МГУП, 2019. – С. 274.



**РЭЗЮМЭ**  
**ІЛЮШЫН ІГАР ЭДУАРДАВІЧ**  
**МАДЭЛЯВАННЕ І АЎТАМАТЫЧНАЕ КІРАВАННЕ ЗВАРАЧНЫМІ**  
**РОБАТАМІ-МАНІПУЛЯТАРАМІ ПРЫ НАЯЎНАСЦІ ТЭХНАЛАГІЧНЫХ**  
**АБМЕЖАВАННЯЎ**

**Ключавыя словы:** робат-маніпулятар, мадэляванне, сінтэз траекторый, аўтаматычнае кіраванне, тэхналагічныя абмежаванні.

**Мэтай даследвання** з'яўляецца распрацоўка метадаў і алгарытмаў мадэлявання і аўтаматычнага кіравання зварачнымі робатамі-маніпулятарамі пры наяўнасці тэхналагічных абмежаванняў.

**Метады даследавання** заснаваны на рэалізацыі кінематычнай мадэлі траекторыі робата у канфігурацыйнай прасторы, якая злучае стартавую і мэтавую канфігурацыі ў гэтай прасторы, на аснове дакладных трохмерных мадэляў прамысловага робата-маніпулятара і перашкод.

**Навуковая навізна** складаецца ў тым, што прапанаваны метады мадэлявання траекторый заснаваны на выкарыстанні кінематычнай мадэлі траекторый для апісання дапушчальных канфігурацый робата і выкарыстанні ўпарадкаванай рашоткі для знаходжання траекторыі ў выпадках, калі выкарыстанне нерэгулярнай структуры дазваляе зрабіць гэта толькі з пэўнай верагоднасцю. Прапанаваны метады кіравання зварачнымі робатамі ва ўмовах кінематычных і прасторавых абмежаванняў заснаваны на заданні мадэлі траекторыі робата ў выглядзе графа, вяршыням якога адпавядае мноства дапушчальных канфігурацый і хуткасцяў маніпулятара, прычым пошук траекторыі на гэтым графе выконваецца з улікам абмежаванняў на дэфармацыю падводзячага электрычнага току кабеля. Распрацаваны алгарытм кіравання робатамі-маніпулятарамі ў працэсах дугавой і кропкавай кантактнай зваркі пры наяўнасці тэхналагічных абмежаванняў заснаваны на паданні мноства дапушчальных траекторый у выглядзе графа, вяршыням якога адпавядаюць канфігурацыі ўсіх рухомых элементаў РТК, прычым пошук траекторыі на гэтым графе выконваецца з улікам абмежаванняў на арыентацыю тэхналагічных інструментаў кропкавай кантактнай і дугавой зваркі.

**Ступень выкарыстання:** вынікі дысертацыі ўкаранёны ў вытворчасць на прадпрыемствах ТАА «Протас» і ПНВУП «Дакор-інжынірынг», а таксама ў адукацыйны працэс установы адукацыі «Магілёўскі дзяржаўны ўніверсітэт харчавання».

**Вобласць выкарыстання:** распрацаваныя метады, алгарытмы і праграмныя сродкі могуць быць выкарыстаны пры выкананні праектаў па стварэнню новых высокаэфектыўных сістэм аўтаматычнага кіравання РТК, што прымяняюцца пры аўтаматызацыі зборачна-зварачнай вытворчасці.

**РЕЗЮМЕ****ИЛЮШИН ИГОРЬ ЭДУАРДОВИЧ****МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СВАРОЧНЫМИ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

**Ключевые слова:** робот-манипулятор, моделирование, синтез траекторий, автоматическое управление, технологические ограничения.

**Целью** диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов моделирования и автоматического управления сварочными роботами-манипуляторами при наличии технологических ограничений.

**Методы исследования** основаны на реализации кинематической модели траектории робота в конфигурационном пространстве, соединяющей стартовую и целевую конфигурации в этом пространстве, на основе точных трехмерных моделей промышленного робота-манипулятора и препятствий.

**Научная новизна** состоит в том, что предлагаемый метод моделирования траекторий основан на использовании кинематической модели траекторий для описания допустимых конфигураций робота и использовании упорядоченной решетки для нахождения траектории в случаях, когда использование нерегулярной структуры позволяет сделать это лишь с определенной вероятностью. Предложенный метод управления сварочным роботом в условиях кинематических и пространственных ограничений основан на задании модели траекторий робота в виде графа, вершинам которого соответствует множество допустимых конфигураций и скоростей манипулятора, причем поиск траектории на этом графе выполняется с учетом ограничений на деформацию токоподводящего кабеля. Разработанный алгоритм управления роботом-манипулятором в процессах дуговой и точечной контактной сварки при наличии технологических ограничений основан на представлении множества допустимых траекторий в виде графа, вершинам которого соответствуют конфигурации всех подвижных элементов РТК, причем поиск траектории на этом графе выполняется с учетом ограничений на ориентацию технологических инструментов точечной контактной и дуговой сварки.

**Степень использования:** результаты диссертации внедрены в производство на предприятиях ООО «Протос» и ЧНПУП «Дакор-инжиниринг», а также в образовательный процесс учреждения образования «Могилевский государственный университет продовольствия».

**Область применения:** разработанные методы, алгоритмы и программные средства могут быть использованы при выполнении проектов по созданию новых высокоэффективных систем автоматического управления РТК, применяемыми при автоматизации сборочно-сварочного производства.

## SUMMARY

**ILYUSHIN IGOR EDUARDOVICH**

### MODELING AND AUTOMATIC CONTROL OF WELDING ROBOTIC MANIPULATORS WITH ACCOUNT OF TECHNOLOGICAL LIMITS

**Keywords:** robotic manipulator, modeling, synthesis of trajectories, automatic control, technological limits.

**The purpose of the research:** development of methods and algorithms for modeling and automatic control of welding robotic manipulators with account of technological limits.

**Methods of the research** are based on the implementation of the kinematic model of trajectory of robot in the configuration space connecting the starting and target configurations in this space based on the accurate three-dimensional models of an industrial robotic manipulator and obstacles.

**Scientific novelty** is based on the fact that the proposed method for modeling trajectories is based on the use of kinematic models of trajectories for describing the permissible configurations of the robot and the use of an ordered grid for the transition of the trajectory in cases where the use of an irregular structure allows this to be done only with probability. The proposed method for controlling a welding robot under conditions of kinematic and spatial constraints is based on specifying a model of the robot's trajectories in the form of a graph, the vertices of which correspond to a set of permissible configurations and speeds of the manipulator, and the search for the trajectory on this graph is performed taking into account the constraints on the deformation of the current supply cable. The developed algorithm for controlling a robot manipulator in the processes of arc and spot resistance welding in the presence of technological restrictions is based on the representation of the set of admissible trajectories in the form of a graph, the vertices of which correspond to the configurations of all moving elements of the robotic complex, and the search for the trajectory on this graph is performed taking into account the restrictions on the orientation of technological tools for spot welding and arc welding.

**Reliance:** the results of the research are introduced into the production at industrial enterprises Protos LLC and ChNPUP Dakor-engineering, as well as into the educational process of educational institution Mogilev state university of food technologies.

**Scope:** The developed methods, algorithms and software can be used in the implementation of projects to create new high-performance automated control systems for robotic technological complexes used in the automation of assembly and welding production.

Научное издание

Илюшин  
Игорь Эдуардович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
СВАРОЧНЫМИ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ ПРИ НАЛИЧИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Редактор \_\_\_\_\_

Подписано в печать \_\_. \_\_. 2021.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура «Таймс».

Усл. печ. л. \_\_. Уч.-изд. л. \_\_. Тираж \_\_. Заказ \_\_\_\_\_.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014, № 2/113 от  
07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск