

УДК 681.5.015

ГЕНЕРАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ ТОЧЕЧНОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ В СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

М.М. КОЖЕВНИКОВ¹, О.А. ЧУМАКОВ², И.Э. ИЛЮШИН¹, А.В. ГОСПОД¹

¹Могилевский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 9 сентября 2017

Аннотация. Предложены новые эффективные алгоритмы генерации программных траекторий роботоманипуляторов для точечной контактной сварки на основе статистической модели конфигурационного пространства. Предложенные алгоритмы, в отличие от известных, позволяют эффективно учесть геометрические характеристики роботизированных комплексов, кинематические и пространственные ограничения, а также ограничения сварочной технологии. Эффективность разработанных алгоритмов подтверждается результатами тестирования в экспериментальной среде моделирования роботов.

Ключевые слова: робот-манипулятор, алгоритмы управления, сварка, конфигурационное пространство.

Abstract. New effective algorithms for generating paths of robotic manipulators for point-contact welding were proposed. They are based on the statistical model of the configuration space. Proposed algorithms, in contrast to the known ones, allow to take into account effectively geometric characteristics of the robotic complexes, kinematic and spatial limits, as well as the limits of the welding technology. The effectiveness of the developed algorithms confirmed by the results of testing in the experimental simulation tools.

Keywords: robotic-manipulator, algorithms for control, welding, configuration space.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 109, No. 7, pp. 32-39

**Generation of program trajectories for robotic manipulators
of point contact welding in the workspace with obstacles**

M.M. Kozhevnikov, O.A. Chumakov, I.E. Ilushin, A.V. Hospad

Введение

Предлагаемая работа посвящена проблемам генерации программных траекторий промышленных роботов-манипуляторов и роботизированных технологических комплексов (РТК) в технологическом процессе точечной контактной сварки (ТКС). Необходимость роботизации возникает при проектировании современного промышленного производства, поскольку применение промышленных роботов (ПР) приводит к повышению производительности, повышению качества продукции, а также снижению вредного влияния производства на здоровье персонала [1–3]. ТКС – наиболее обширная область применения роботов в промышленности [4], их доля в данной сфере составляет примерно 30 % от общего парка ПР [1] (рис. 1).

Необходимость применения роботов для ТКС обусловлена переходом мирового производителя на использование оцинкованного листового материала, расширением модельного ряда кузовов автомобилей, повышением точности сборки и сварки деталей кузова и снижением доли ручного труда на производстве [1].

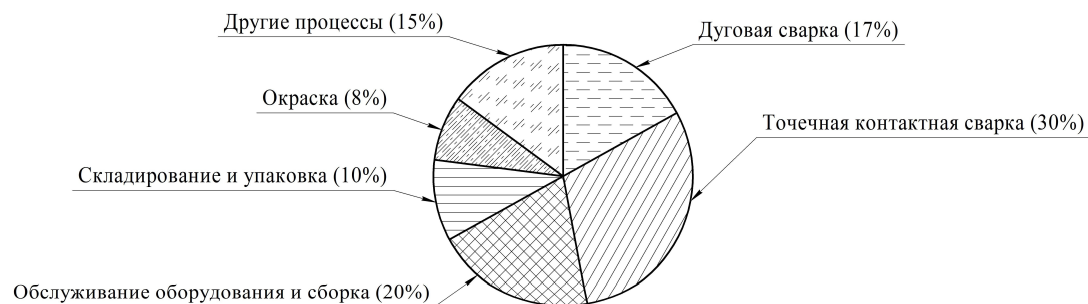


Рис. 1. Применение роботов на операциях современного производства

Стоит отметить, что для генерации траекторий роботов-манипуляторов (РМ) на данный момент на большинстве предприятий применяется так называемый метод ручного обучения [5]: в этом случае процесс записи необходимой траектории в память становится довольно длительным. Кроме того, качество данного процесса зависит непосредственно от навыков оператора, что повышает риск совершения ошибок, которые выявляются лишь на этапе наладки. На устранение ошибок и повторное перепрограммирование РТК уходит большое количество времени, что существенно увеличивает сроки освоения новых изделий. В связи с этим целесообразно производить моделирование РТК с последующей разработкой алгоритмов управления. Это призвано сократить время программирования траекторий промышленных роботов-манипуляторов, а также увеличить надежность их работы.

В известных работах предложен ряд методов и алгоритмов генерации программных траекторий для роботов-манипуляторов. Так, в работе [6] предлагается подход, обеспечивающий одновременный учет ограничений на ускорения, скорости и положения с использованием линейной оптимизации. В [7] предлагается метод генерации траекторий с использованием линейной временной логики (LTL – Linear Temporal Logic), что позволяет решать сложные и комплексные манипуляционные задачи. В исследовании [8] представлено решение, в соответствии с которым генерация траекторий выполняется в два этапа: на первом осуществляется поиск глобальной траектории для управления технологическим инструментом с использованием потенциальных полей и сеток с различными разрешениями, на втором локальная траектория определяется для всей структуры робота с учетом кинематики манипулятора и «силы отталкивания» соседних препятствий.

Следует отметить, что известные алгоритмы управления сварочными роботами-манипуляторами часто не учитывают сложную форму препятствий и форму звеньев манипулятора, а также ограничения сварочной технологии, что приводит к низкому качеству управления с большим объемом движений. При этом траектория движения робота может быть установлена за конечное время лишь с определенной вероятностью.

В данной работе предложены новые эффективные алгоритмы генерации программных траекторий роботов-манипуляторов в процессе ТКС, которые, в отличие от известных, учитывают геометрические характеристики РТК, кинематические и пространственные ограничения, кроме того, при синтезе траектории предъявляется требование на минимизацию деформации вторичного токоподводящего кабеля. Такой подход позволяет успешно осуществлять управление ПР, при этом увеличить долговечность силовых кабелей.

Постановка задачи

Технологический процесс ТКС заключается в сжатии соединяемых деталей между двумя электродами, формирующими «точечный» шов. Основные требования, предъявляемые к роботам для ТКС, – это точность позиционирования, скорость перемещения инструмента между точками сварки и способность манипулировать массивными технологическими инструментами [9–11]. Такой инструмент состоит из сварочных клещей, трансформатора и кабелей вторичной цепи. На практике размещают трансформатор на одном из звеньев робота либо используют сварочные инструменты с подвесным трансформатором (рис. 2). Во втором случае в процессе работы кабель подвергается изгибу и скручиванию, что резко снижает его долговечность. Поэтому в процессе управления роботом необходимо предъявлять

требования к минимизации деформации вторичного токоподводящего кабеля.

Величину изгиба кабеля можно косвенно оценить по длине кривой, соединяющей точки крепления и имеющей кривизну, не превышающую предельное значение:

$$L = 2 \cdot r \cdot \arcsin \left(\frac{d}{2 \cdot r \cdot \sin \varphi_{tran}} \right), \quad (1)$$

где d – расстояние между точками крепления, r – допустимый радиус изгиба, φ_{tran} – угол между отрезком, соединяющим точку крепления и осью z соответствующего трансформатору фрейма. В качестве критерия определим максимально допустимую длину кривой L_{max} .

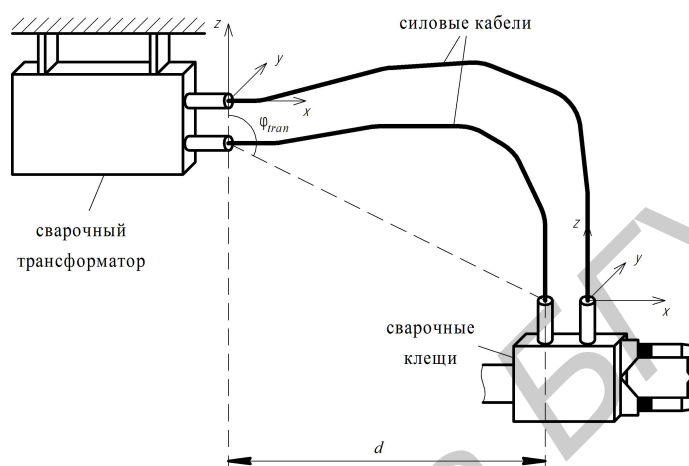


Рис. 2. Расположение токоподводящих кабелей в пространстве в процессе ТКС с подвесным трансформатором

Величину скручивания оценим величиной φ и ψ углов поворота сварочных клещей вокруг осей x и y , соответствующего клещам фрейма. Этим углом зададим ограничения в виде максимально допустимых углов поворота φ_{max} и ψ_{max} . Тогда ограничения на деформацию кабеля имеют вид:

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

Рассмотрим сварочный РМ, который описывается как кинематическая цепь из n поворотных сочленений, в его рабочей зоне расположено некоторое множество препятствий $\mathbf{B} = \{\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_m\}$. Конфигурацию этого робота зададим в виде вектора $\mathbf{q} = [q_i]^T$, ($i = 1:n$), каждой конфигурации в соответствие ставим вектор скоростей $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_i]^T$, где q_i – величины углов в сочленениях, \dot{q}_i – величины угловых скоростей движения звеньев. Ввиду конструктивных особенностей РМ зададим следующие ограничения:

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

$$\|\dot{\mathbf{q}}\| \leq \dot{\mathbf{q}}_{max}, \quad (4)$$

где \mathbf{q}_{min} , \mathbf{q}_{max} – векторы, определяющие нижнее и верхнее конструктивные ограничения на значения углов в сочленениях робота-манипулятора; $\dot{\mathbf{q}}_{max}$ – вектор, определяющий ограничения на значения угловых скоростей движения звеньев манипулятора. Геометрическую модель робота-манипулятора, установленного в конфигурацию \mathbf{q} , зададим в виде множества $\mathbf{M}(\mathbf{q})$. Полное конфигурационное пространство робота определяется как множество всех возможных конфигураций робота, включая те, при которых имеют место столкновения с препятствиями $C = \{\mathbf{q}\}$. Тогда свободное от столкновений конфигурационное пространство

определим как $C_f = \{\mathbf{q} \in C \mid \mathbf{M}(\mathbf{q}) \cap \mathbf{V} = \emptyset\}$. Задача определения пересечения множеств $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ и \mathbf{V} решается путем проведения теста столкновения между роботом и препятствиями по соотношению

$$\min \|\mathbf{M}(\mathbf{q}) - \mathbf{V}\| \leq \delta, \quad (5)$$

где δ – точность позиционирования робота-манипулятора.

Управление РМ в рассматриваемом процессе ТКС осуществляется следующим образом: определяются текущие векторы углов в сочленениях \mathbf{q}_i и угловых скоростей $\dot{\mathbf{q}}_i$, после чего сравниваются с заданными значениями. Таким образом происходит формирование сигналов рассогласования по положению $\Delta \mathbf{q}_i$ и по угловой скорости $\Delta \dot{\mathbf{q}}_i$, и в зависимости от их значения контроллером вырабатываются соответствующие управляющие воздействия на приводы сочленений робота. Стоит отметить, что наиболее сложной и трудоемкой проблемой при этом является поиск оптимальной траектории, следовательно, основная задача заключается в нахождении последовательности дискретных конфигураций с учетом пространственных (3) и кинематических (4) ограничений, свободных от столкновений по (5) и удовлетворяющих требованиям на минимизацию деформации кабеля (2). В связи с этим в данной работе предлагаются алгоритмы генерации программных траекторий РМ в процессе ТКС, позволяющие решить данную задачу.

Алгоритмы генерации программных траекторий РМ в процессе ТКС

В предыдущих работах авторов данной статьи [12, 13] предложен комбинированный подход к управлению сварочными РМ, основанный на генерации траекторий с использованием статистической модели и решетчатой дискретизации «насыщенных» препятствиями зон конфигурационного пространства. Данный метод модифицирован в соответствии с предложенным выше подходом, и на его основе разработан алгоритм генерации программных траекторий в рабочей среде с препятствиями (табл.1). Исходной информацией для алгоритмов управления сварочными роботами-манипуляторами является геометрическая модель РТК – $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, \mathbf{V} , а также координаты стартовой и целевой конфигураций. Используя эти данные, осуществляется поиск заданной траектории робота-манипулятора. Предлагаемая статистическая модель представляется в виде неориентированного графа $\mathbf{R} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$. Вершины \mathbf{V} этого графа представляют собой множество свободных от столкновений конфигураций робота \mathbf{q}_i , а также векторов допустимых угловых скоростей движения звеньев $\dot{\mathbf{q}}_i$, соответствующих этим конфигурациям. Множества \mathbf{V} формируется за счет случайной генерации конфигураций РМ \mathbf{q}_i и проверки их на столкновение робота с препятствиями в соответствии с (5), а также на допустимую степень деформации силового кабеля в соответствии с (2). Если условия выполнены, то генерируется соответствующий конфигурации \mathbf{q}_i вектор допустимых скоростей $\dot{\mathbf{q}}_i$, координаты которого также случайные величины, после чего конфигурация \mathbf{q}_i и вектор $\dot{\mathbf{q}}_i$ добавляются в множество \mathbf{V} . Ребрам \mathbf{E} графа ставятся в соответствие прямолинейные участки траекторий между соседними свободными от столкновений конфигурациями. Конфигурации робота \mathbf{q}_a и \mathbf{q}_b являются соседними, если между ними существует свободный от столкновений прямолинейный участок траектории и $D(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_b) \leq d$, где $D(\bullet)$ – симметричная функция, характеризующая расстояние между двумя локациями робота-манипулятора, d – константа. Кроме того, осуществляется проверка прямолинейного участка на возможность перемещения робота из конфигурации \mathbf{q}_a в конфигурацию \mathbf{q}_b с заданной скоростью $\dot{\mathbf{q}}_a$. Таким образом, искомая траектория РМ, соединяющая стартовую \mathbf{q}_{s1} и целевую \mathbf{q}_{sg} конфигурации робота, представляет собой последовательность, состоящую из соседних конфигураций $\mathbf{q}_{s1}, \mathbf{q}_{s2}, \dots, \mathbf{q}_{sg} \in C_f$, каждой из которых поставлен в соответствие вектор допустимых скоростей $\dot{\mathbf{q}}_{s1}, \dot{\mathbf{q}}_{s2}, \dots, \dot{\mathbf{q}}_{sg}$, и прямолинейных участков, соединяющих эти конфигурации.

Таблица 1. Алгоритм генерации программных траекторий РМ в процессе ТКС

| Исходные данные: Геометрическая модель РТК – $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, \mathbf{V} , начальная и целевая конфигурации робота – $\mathbf{q}_s, \mathbf{q}_g$. | |
|---|--|
| 1: | $i \leftarrow 1; \mathbf{V} \leftarrow \mathbf{q}_s, \mathbf{q}_g;$ |
| 2: | повторять |
| 3: | $\mathbf{q}_i \leftarrow \text{Rand}q;$ |
| 4: | если $(\mathbf{q}_i \in C_f)$ и $(\text{def}(\mathbf{q}_i) = 0)$ |
| 5: | то $\dot{\mathbf{q}}_i \leftarrow \text{Rand}q\dot{q};$ |
| 6: | $\mathbf{V} \leftarrow (\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$ |
| 7: | $i \leftarrow i + 1;$ |
| 8: | до тех пор пока $i \leq N_{max};$ |
| 9: | $k \leftarrow 1;$ |
| 10: | повторять |
| 11: | $(i, j) \leftarrow \text{Rand}(1, N_{max});$ |
| 12: | если $((D(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j) \leq d)$ и $((EPath(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j) \neq \emptyset)$ и $(STest(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j, \dot{\mathbf{q}}_i) = 1))$ |
| 13: | то $\mathbf{E} \leftarrow EPath(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)$ |
| 14: | иначе |
| 15: | если $(D(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j) \leq d)$ и $(TTest(\mathbf{q}_i) = 1)$ или $(TTest(\mathbf{q}_j) = 1)$ |
| 16: | то $(\mathbf{q}_i^s, \mathbf{q}_j^g) \leftarrow \text{Connect}(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j, \mathbf{G});$ |
| 17: | $\mathbf{R} \leftarrow \text{SearchGridPath}(\mathbf{q}_i^s, \mathbf{q}_j^g);$ |
| 18: | $\mathbf{V} \leftarrow (EPath(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_i^s), EPath(\mathbf{q}_j, \mathbf{q}_j^g));$ |
| 19: | $k \leftarrow k + 1;$ |
| 20: | до тех пор пока $k \leq K_{max};$ |
| 21: | $path \leftarrow \text{GraphSearch}(\mathbf{R}, \mathbf{q}_s, \mathbf{q}_g).$ |

Алгоритм использует следующие обозначения. $\text{Rand}q$ – функция генерации вектора конфигурации в допустимом диапазоне (3). $\text{Rand}q\dot{q}$ – функция генерации вектора скорости с координатами с учетом ограничения (4). def (табл. 2) – функция проверки на допустимую степень деформации кабеля в соответствии с (2). Rand – функция генерации случайных целых чисел $i \neq j$ в диапазоне от 1 до N_{max} . $EPath$ – функция расчета прямолинейного участка траектории между двумя конфигурациями \mathbf{q}_i и \mathbf{q}_j . $STest$ – функция, выполняющая проверку ребра на возможность перемещения из конфигурации \mathbf{q}_i в конфигурацию \mathbf{q}_j со скоростью $\dot{\mathbf{q}}_i$ (если перемещение возможно – возвращается 1, в противном случае 0). $TTest$ (табл. 3) – функция оценки «насыщенности» окрестности конфигурации \mathbf{q}_i препятствиями за счет генерации K случайных конфигураций \mathbf{c} в ее окрестности (функция $\text{Rand}c$) таких, что $D(\mathbf{q}, \mathbf{c}) \leq d$, и тестирования их на столкновения в соответствии с соотношением (5). В случае превышения допустимого предела столкновений K_{min} функция $TTest$ возвращает 1 («насыщенность» окрестности конфигурации \mathbf{q}_i препятствиями). Процедура SearchGridPath используется для поиска криволинейной траектории между двумя конфигурациями $(\mathbf{q}_i^s, \mathbf{q}_j^g)$ путем дискретизации окрестности данных конфигураций решеткой. В результате выполнения процедуры в граф \mathbf{R} добавляются вершины и ребра, принадлежавшие криволинейному участку траектории между $(\mathbf{q}_i^s, \mathbf{q}_j^g)$. Connect – функция, выполняющая поиск конфигураций $(\mathbf{q}_i^s, \mathbf{q}_j^g)$ на решетке дискретизации \mathbf{G} , являющихся соседними с конфигурациями $(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)$. GraphSearch – функция нахождения кратчайшего пути на графе \mathbf{R} .

Таблица 2. Функция проверки на допустимую степень деформации кабеля def

| Исходные данные: Геометрическая модель РТК – $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, \mathbf{V} , предельные значения $L_{max}, \varphi_{max}, \psi_{max}$ | |
|---|--|
| 1: | если $L \geq L_{max}$ |
| 2: | то $\text{def} \leftarrow 1$ |
| 3: | иначе если $\varphi \geq \varphi_{max}$ |
| 4: | то $\text{def} \leftarrow 1$ |
| 5: | иначе если $\psi \geq \psi_{max}$ |
| 6: | то $\text{def} \leftarrow 1$ |
| 7: | иначе $\text{def} \leftarrow 0.$ |

Таблица 3. Функция проверки окрестности конфигурации на «насыщенность» $TTest$

| | |
|---|-------------------------------------|
| Исходные данные: Геометрическая модель РТК – $M(q)$, V , количество генерируемых конфигураций K и минимально допустимое число свободных конфигураций K_{min} | |
| 1: | $p \leftarrow 1$; |
| 2: | повторять |
| 3: | $c_p \leftarrow Randc$; |
| 4: | если не ($c_p \in C_f$) |
| 5: | то $p \leftarrow p + 1$; |
| 6: | до тех пор пока $p \leq K$; |
| 7: | если $счетчик \geq K_{min}$ |
| 8: | то $TTest \leftarrow 1$ |
| 9: | иначе $TTest \leftarrow 0$. |

Исследование эффективности предложенных алгоритмов

Исследование эффективности проводилось в экспериментальной среде моделирования РТК с применением эмулятора систем управления типа *RCM (Robot Control Multiprocessor)*. Предложенные алгоритмы генерации программных траекторий реализованы на языке программирования C++ и интегрированы в систему моделирования РТК. В качестве объекта исследования использовалась роботизированная ячейка для ТКС металлической конструкции (рис. 3, а). Ячейка включает робот-манипулятор KR125 со сварочными клещами (рис. 3, б). На трехмерную модель металлоконструкции нанесено 4 сварных шва.

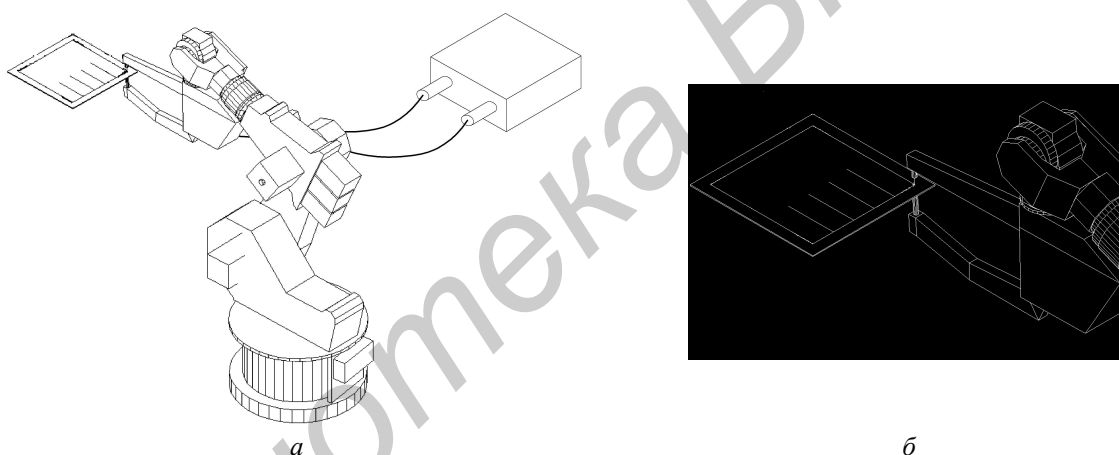


Рис. 3. Роботизированная ячейка (а) и технологический инструмент (б)

Предложенные алгоритмы позволили обеспечить генерацию программных траекторий свободного от столкновений движения сварочных клещей вдоль каждого из 4 швов. Заданные траектории реализованы на основе технологического языка программирования роботов SRCL (Siemens Robot Control Language) и отлажены с использованием эмулятора *RCM*. Анализ результатов данных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый подход эффективен при управлении сварочными роботами-манипуляторами в рабочей среде с препятствиями.

Заключение

В данной работе предложен новый подход генерации программных траекторий РМ для ТКС на основе статистической модели конфигурационного пространства. На основе предложенного подхода разработаны алгоритмы, которые, в отличие от известных, позволяют эффективно учесть геометрические характеристики роботизированных комплексов, кинематические и пространственные ограничения, а также ограничения сварочной технологии, в частности, минимизировать износ силового кабеля для сварочного РМ с подвесным трансформатором. Эффективность разработанных алгоритмов подтверждается результатами тестирования в экспериментальной среде моделирования РТК.

Список литературы

1. Климов А.С., Машнин Н.Е. Роботизированные технологические комплексы и технологические линии в сварке. СПб.: Лань, 2011. 240 с.
2. Сварочные технологии в экстремальных условиях. Ч. 1. Анализ многофакторного потенциального риска / Б.Е. Патон [и др.] // Автомат. сварка. 2002. № 11. С. 3–7.
3. Вернадский В.Н. Промышленные роботы в современном производстве // Автомат. сварка. 2001. № 11. С. 37–42.
4. Pires J.N., Loureiro A., Bolmisjo G. Welding robots: technology, systems issues and applications / Springer-Verlag London Limited, 2006. 192 p.
5. Цыбульский Г.А. Автоматизация процедур обучения роботов семейства «PUMA» // Автомат. сварка. 2007. № 6. С. 49–50.
6. Kingston Z., Dantam N., Kavraki L.E. Kinematically constrained workspace control via linear optimization // IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). 2015. P. 758–764.
7. He K., Lahijanian M., Kavraki L.E., Vardi M.Y. Towards Manipulation Planning with Temporal Logic Specifications // IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation (ICRA), Seattle, WA. 2015. P. 346–352.
8. Robot Manipulator Path Planning Based on Intelligent Multiresolution Potential Field / B. Ranjbar [et al.] // International Journal of u- and e- Service, Science and Technology. 2015. № 1 (8). P. 11–26.
9. Пашкевич А.П. Автоматизированное проектирование промышленных роботов и робототехнологических комплексов для сборочно-сварочных производств. Минск.: БГУИР, 1996. 107 с.
10. Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции: Технология изготовления, механизация, автоматизация и контроль качества в сварочном производстве. М.: Высш. школа, 1991. 397 с.
11. Сварочные роботы / В. Геттерт [и др.]. М.: Машиностроение, 1988. 288 с.
12. Комбинированный метод синтеза траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями / М.М. Кожевников [и др.] // Докл. БГУИР. 2016. № 1 (95). С. 12–18.
13. Илюшин И.Э., Кожевников М.М. Алгоритмы управления сварочными роботами-манипуляторами на основе статистической модели конфигурационного пространства // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. 2016. № 1 (12). С. 22–29.

References

1. Klimov A.S., Mashnin N.E. Robotizirovannye tehnologicheskie kompleksi i tehnologicheskie linii v svarke. Spb.: Lan, 2011. 240 s. (in Russ)
2. Svarochnie tehnologii v ekstremalnih usloviyah. Ch.1. Analiz mnogofaktornogo potentsialnogo riska / B.E. Paton [i dr.] // Avtomat. svarka. 2002. № 11. S. 3–7. (in Russ)
3. Vernadskiy V.N. Promishlennye roboti v sovremennom proizvodstve // Avtomat. svarka. 2001. № 11. S. 37–42.
4. Pires J.N., Loureiro A., Bolmisjo G. Welding robots: technology, systems issues and applications / Springer-Verlag London Limited, 2006. 192 p.
5. Tsibulkin G.A. Avtomatizatsiya protsedur obuchenija robotov semejstva «PUMA» // Avtomat. svarka. 2007. № 6. S. 49–50. (in Russ)
6. Kingston Z., Dantam N., Kavraki L.E. Kinematically constrained workspace control via linear optimization // IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). 2015. P. 758–764.
7. He K., Lahijanian M., Kavraki L.E., Vardi M.Y. Towards Manipulation Planning with Temporal Logic Specifications // IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation (ICRA), Seattle, WA. 2015. P. 346–352.
8. Robot Manipulator Path Planning Based on Intelligent Multiresolution Potential Field / B. Ranjbar [et al.] // International Journal of u- and e- Service, Science and Technology. 2015. № 1 (8). P. 11–26.
9. Pashkevich A.P. Avtomatizirovannoe proektirovanie promishlennih robotov i robototehnologicheskikh kompleksov dlya sborochno-svarochnih proizvodstv. Minsk: BGUIR, 1996. 107 s. (in Russ)
10. Kurkin S.A., Nikolaev G.A. Svarnie konstruksii: Tehnologija izgotovlenija, mehanizatsia, avtomatizatsija i kontrol kachestva v svarochnom proizvodstve. M.: Vish. shkola, 1991. 397 s. (in Russ)
11. Svarochnie roboti / V. Gettert [i dr.]. M.: Mashinostroenie, 1988. 288 s. (in Russ)
12. Kombinirovannij metod sinteza trajektorij sborochno-svarochnih robotov-manipulyatorov v rabochej srede s prepyatstvijami / M.M. Kozhevnikov [i dr.] // Dokl. BGUIR. 2016. № 1 (95). S. 12–18. (in Russ)
13. Ilushin I.E., Kozhevnikov M.M. Algoritmi upravlenija svarochnimi robotami-manipuljatorami na osnove statisticheskoj modeli konfiguratsionnogo prostranstva // Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. C. Fundamental'nye nauki. 2016. № 1 (12). S. 22–29. (in Russ)

Сведения об авторах

Кожевников М.М., к.т.н., доцент, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Чумаков О.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Илюшин И.Э., ассистент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Госпад А.В., ассистент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Адрес для корреспонденции

212027, Республика Беларусь,
г. Могилев, пр. Шмидта, д. 3,
Могилевский государственный
университет продовольствия
тел. +375-29-543-76-15;
e-mail: crush-wciiitft@yandex.ru;
Илюшин Игорь Эдуардович

Information about the authors

Kozhevnikov M.M., PhD., associate professor, chief of department of automation of technological processes and production procedures of Mogilev state university of food technologies.

Chumakov O.A., PhD, associate professor, associate professor of department of control systems of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Ilushin I.E., assistant of department of automation of technological processes and production procedures of Mogilev state university of food technologies.

Hospad A.V., assistant of department of automation of technological processes and production procedures of Mogilev state university of food technologies.

Address for correspondence

212027, Republic of Belarus,
Mogilev, Shmidta ave., 3,
Mogilev state university
of food technologies
tel. +375-29-543-76-15;
e-mail: crush-wciiitft@yandex.ru;
Ilushin Igor Eduardovich