

УДК 681.5.015

## ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ТОЧЕЧНОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

**М. М. КОЖЕВНИКОВ, И. Э. ИЛЮШИН, А. В. СТАРОВОЙТОВ,  
В. Н. КОСЫРЕВ**

*Учреждение образования «Могилевский государственный  
университет продовольствия», Республика Беларусь*

### **Введение**

Задача планирования траектории промышленных роботов-манипуляторов с учетом сложной геометрии рабочего пространства и технологических ограничений возникает при создании современных роботизированных технологических комплексов (РТК) точечной контактной сварки (ТКС). Решение такой задачи позволит повысить эффективность эксплуатации действующих РТК точечной контактной сварки, а также сократить сроки технического переоснащения и переналадки оборудования на предприятиях машиностроительной отрасли.

В известных работах предложен ряд алгоритмов планирования траекторий антропоморфных роботов-манипуляторов, позволяющих эффективно обойти как проблему размерности конфигурационного пространства, так и учесть сложную геометрию препятствий в рабочем пространстве. Подробный обзор и анализ таких алгоритмов представлен в фундаментальных работах [1], [2]. Эти алгоритмы основаны на дискретной модели конфигурационного пространства робота, формируемой путем поиска свободных от столкновения положений робота и локальных участков траекторий между локальными положениями. Далее эта модель используется для глобального поиска траектории между заданным начальным и конечным положением робота. В частности, в работе [3] предложен вероятностный алгоритм планирования траектории, который ведет поиск нескольких решений, что увеличивает вероятность получения результата за фиксированное время. В работах [4], [5] представлены алгоритмы планирования, которые для решения задачи планирования используют концепцию мультиграфа задачи движения (*taskmotion multigraph*, ТММ).

Необходимо отметить, что использование таких алгоритмов при планировании траектории сварочных роботов-манипуляторов существенно осложняется тем, что они используют нерегулярную структуру соседних элементов мультиграфа для описания конфигурационного пространства робота [6]–[12], соответственно, траектория робота может быть найдена за конечное время лишь с определенной вероятностью, также практически невозможно учесть технологические ограничения на положение и ориентацию сварочных клещей.

Целью данной работы является разработка нового метода планирования траекторий роботов-манипуляторов, основанного на детерминистической дискретизации пространства углов ориентации клещей ТКС относительно шва. В отличие от известных этот метод эффективно учитывает технологические ограничения на ориентацию сварочных клещей и сложную форму препятствий, характерную для РТК точечной контактной сварки.

### Метод планирования траектории сварочного робота-манипулятора

Рассмотрим типичную компоновку РТК точечной контактной сварки (рис. 1, а), включающую в себя робот-манипулятор, оснащенный клещами, и свариваемую конструкцию, закрепленную на кондукторной плите с помощью прижимов. На поверхности конструкции определена модель сварного шва в виде множества точек  $\{p_i\}_{i=1}^N$ , декартовы координаты которых определяются множеством векторов  $\{x_i\}_{i=1}^N$ . Ориентация электродов сварочных клещей в каждой точке шва  $p_i$  определяется двумя углами  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 1, б). Первый задает угол наклона плоскости движения электрода, второй – угол наклона электрода к линии шва. Величина углов  $\alpha$  и  $\beta$  в технологическом процессе точечной контактной сварки может изменяться в допустимом диапазоне  $\pm 10^\circ$ . Угол  $\gamma$  определяет совместно с  $\alpha$  и  $\beta$  ориентацию сварочных клещей и может принимать произвольные значения в диапазоне  $\pm 180^\circ$  [13].

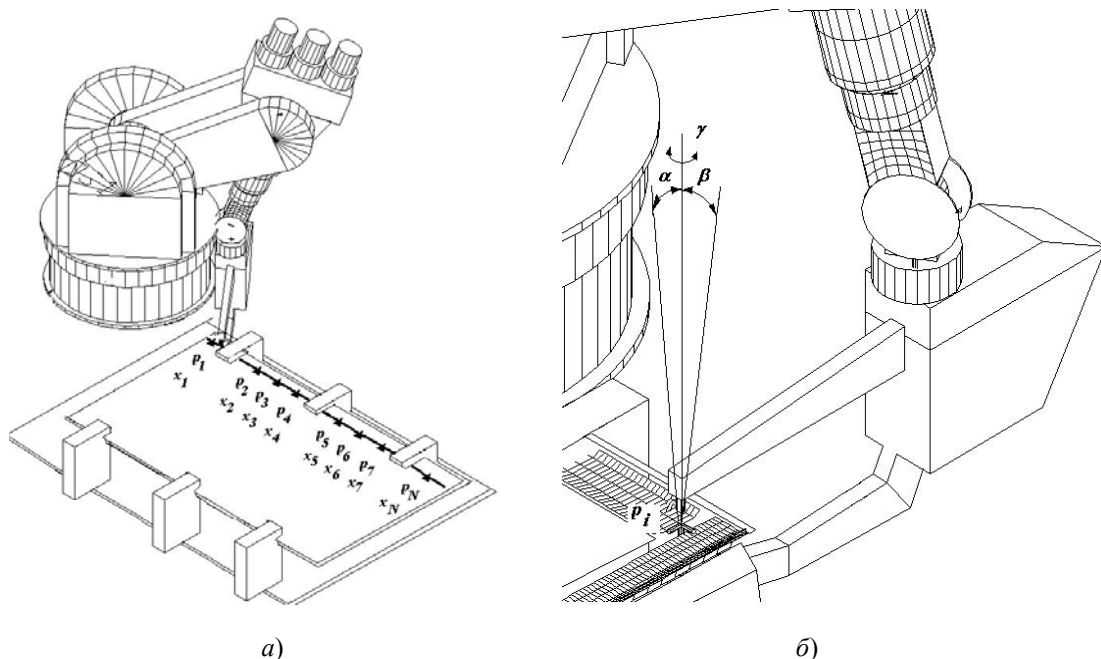


Рис. 1. Роботизированный технологический комплекс точечной контактной сварки и ориентация сварочных клещей:

а – позиционирование технологического инструмента в точке  $p_i$ ;

б – углы ориентации технологического инструмента в точке  $p_i$

С учетом этого зададим допустимые диапазоны изменения углов ориентации сварочных клещей в виде:

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}; \quad \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}; \quad \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}. \quad (1)$$

Разобьем допустимые диапазоны изменения углов ориентации с параметром дискретизации  $n$  и сформируем таким образом следующие множества значений:

$$\{\alpha_j\}_{j=1}^n; \quad \{\beta_j\}_{j=1}^n; \quad \{\gamma_j\}_{j=1}^n, \quad (2)$$

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

Тогда дискретное пространство углов ориентации сварочных клещей, помещенных в точку шва  $p_i$ , будет содержать  $N_0 = n^3$  точек с координатами, определяемыми

множеством векторов  $[\alpha_j^i, \beta_j^i, \gamma_j^i]^T$ ,  $j = 1, \dots, N_0$ . Применение такого подхода к представлению углов ориентации основано на результатах, полученных в работах [2], [3], и используется в предлагаемом методе планирования траектории роботов с целью учета ограничений на ориентацию сварочных клещей. Наглядно такой подход к дискретизации пространства углов ориентации показан на рис. 2.

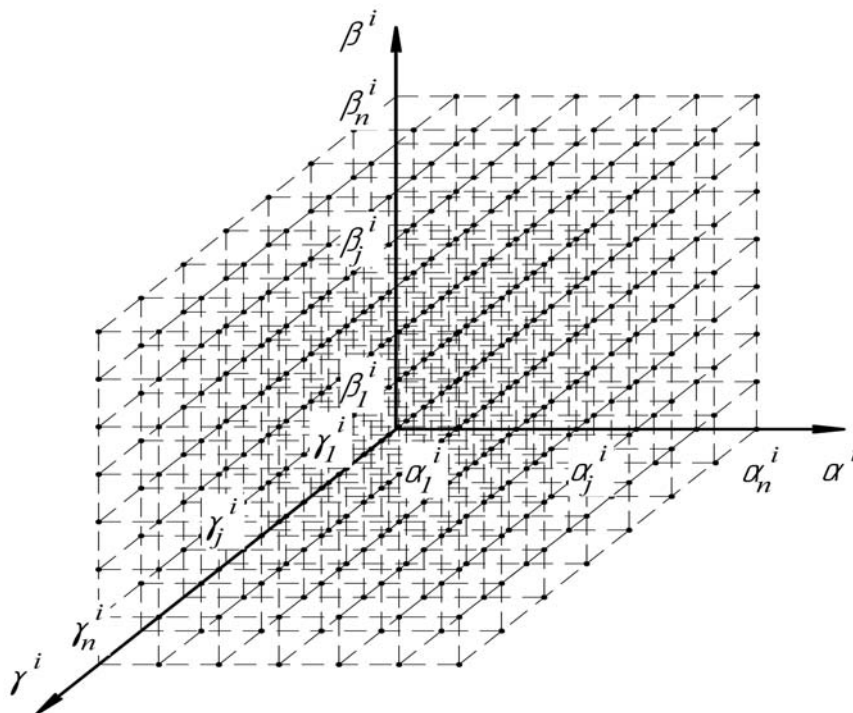


Рис. 2. Дискретное пространство углов ориентации сварочных клещей

Вектор, описывающий углы в сочленениях робота-манипулятора, обеспечивающие позиционирование сварочных клещей в точку шва  $p_i$  с координатами  $x_i$  и ориентацией клещей  $[\alpha_j^i, \beta_j^i, \gamma_j^i]^T$ , может быть определен следующим образом:

$$q_j^i = \text{ikin}([\alpha_j^i, \beta_j^i, \gamma_j^i]^T, x_i, \text{conf}), \quad (3)$$

где  $\text{ikin}(\bullet)$  – функция вычисления обратного кинематического преобразования;  $\text{conf}$  – индикатор конфигурации робота-манипулятора.

Необходимо отметить, что в данной работе рассматривается класс промышленных роботов-манипуляторов, без кинематической избыточности, для которых при заданном значении индикатора конфигурации  $\text{conf}$  решение (3) единственно. Методы решения (3) подробно исследованы в работах [6], [13]. Определим в конфигурационном пространстве робота-манипулятора множество конфигураций, соответствующих точке шва  $p_i$  и множеству допустимых в этой точке дискретных значений углов ориентации  $[\alpha_j^i, \beta_j^i, \gamma_j^i]^T$ ,  $j = 1, \dots, N_0$  следующим образом:

$$q^i = \left\{ \text{ikin}([\alpha_j^i, \beta_j^i, \gamma_j^i]^T, x_i, \text{conf}) \right\}_{j=1}^{N_0} \cap \mathbf{Cf}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{Cf}$  – множество векторов, определяющее свободное от столкновений с препятствиями конфигурационное пространство робота-манипулятора:

$$Cf = \{q | M(q) \cap B = \emptyset\}, \quad (5)$$

где  $M(q)$  – геометрическая модель робота-манипулятора в конфигурации;  $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$ ,  $q_{\min}$ ,  $q_{\max}$  – векторы, определяющие нижнее и верхнее конструктивные ограничения на изменение углов в сочленениях робота-манипулятора;  $B$  – множество препятствий.

Решение задачи моделирования свободного от столкновений конфигурационного пространства  $Cf$  (5) выполнено с использованием алгоритмов, предложенных в предыдущих авторских работах [14], [15]. Программные реализации этих алгоритмов уже успешно интегрированы в САПР Robomax [15], в которой проводилось тестирование предложенного метода.

Необходимо отметить, что в качестве препятствий в РТК точечной контактной рассматриваются все его элементы, находящиеся в рабочей зоне робота и препятствующие его движению по перемещению клещей, а именно: свариваемая конструкция, прижимные приспособления, кондукторная плита, ограждение РТК и т. д. В качестве критерия качества траектории движения робота манипулятора при сварке шва предлагается использовать суммарное время перемещения сварочных клещей по точкам шва:

$$\tau = N\Delta t + \rho / v, \quad (6)$$

где  $\Delta t$  – время сварки одной точки;  $\rho$  – длина пути сварочных клещей при их движении в направлении от начальной к конечной точке сварки;  $v$  – скорость движения сварочных клещей.

Тогда задача планирования траектории движения робота-манипулятора по перемещению сварочных клещей по точкам шва  $p_i$  может быть сформулирована следующим образом: *среди всех траекторий, последовательно соединяющих конфигурации робота-манипулятора, входящие в множества  $q_1, q_2, \dots, q_N$  и определяемые выражением (4), найти траекторию с минимальным суммарным временем перемещения сварочных клещей по точкам шва (6).*

Для ее решения поставленной задачи разработана процедура, включающая следующие этапы.

1. Формируется модель свободного конфигурационного пространства робота (5) в виде неориентированного графа:

$$DCf = (V, E). \quad (7)$$

Вершины  $V \subset Cf$  этого графа представляют собой множество свободных от столкновений конфигураций робота. Формирование множества  $V$  осуществляется следующим образом: генерируется конфигурация робота-манипулятора и выполняется тест столкновения робота с препятствиями. Если столкновений нет, то конфигурация добавляется в множество  $V$ , в противном случае она отбрасывается. Ребрам  $E$  графа ставятся в соответствие «простые» (прямолинейные) участки траекторий сварочных клещей между свободными от столкновений конфигурациями робота из множества  $V$ .

2. Выполняется поиск «простых» траекторий между элементами множеств  $q^i$  и  $q^{i+1}$ , вычисляемых по (4). Если таковых не существует (не существует прямолинейной траектории сварочных клещей между точками сварного шва  $p_i$  и  $p_{i+1}$ ), то выполняется поиск «простых» траекторий между конфигурациями из множеств  $q^i$  и  $q^{i+1}$  и конфигурациями из множества  $E$ , лежащих в окрестности  $q^i$  и  $q^{i+1}$ . Если таковые существуют, то соответствующее ребро добавляется в множество  $V$ , а конфигурации  $q^i$

и  $q^{i+1}$  добавляются в множество  $E$ . Весовой коэффициент каждого ребра вычисляется следующим образом:  $\tau_r = \rho_r / v$ , где  $\rho_r$  – длина «простого» пути сварочных клещей между элементами множества  $E$ .

3. Шаги 1–2 повторяются для всех точек свариваемого шва  $\{p_i\}_{i=1}^n$ . Повторение этих шагов позволяет сформировать неориентированный граф  $DCf$ , который включает как конфигурации робота, соответствующие точкам свариваемого шва, так и дополнительные (промежуточные) конфигурации, необходимые для обхода препятствий, а также «простые» участки траекторий между этими конфигурациями.

4. Выполняется поиск множества кратчайших путей на графе  $DCf$  от элементов множества  $q^1$  до элементов множества  $q^N$ . Из полученного таким образом множества путей выбирается такой путь, при перемещении робота-манипулятора по «простым» участкам траектории которого суммарное время передвижения сварочных клещей (6) будет минимальным.

Таблица 1

Алгоритм планирования траектории для РТК ТКС

Исходные данные: Геометрическая модель РТК ТКС – $M(q), B$ ; Геометрическая модель шва – $\{x_i\}_{i=1}^N, \{f_i\}_{i=1}^N$ .	
1:	$i \leftarrow 1; V \leftarrow \emptyset; E \leftarrow \emptyset;$
2:	<b>повторять</b>
3:	$Gen(q^i);$
4:	<b>если</b> $M(q) \cap B = \emptyset$
5:	<b>то</b> $V \leftarrow q^i;$
6:	$E \leftarrow Lin(q^i, E);$
7:	$i \leftarrow i + 1;$
8:	<b>до тех пор пока</b> $i \leq N_d;$
9:	$i \leftarrow 1;$
10:	<b>повторять</b>
11:	$q^i \leftarrow search(\alpha^i, \beta^i, \gamma^i, x^i, conf);$
12:	$q^{i+1} \leftarrow search(\alpha^{i+1}, \beta^{i+1}, \gamma^{i+1}, x^{i+1}, conf);$
13:	<b>Если</b> $Lin(q^i, q^{i+1}) \neq \emptyset$
14:	<b>то</b> $V \leftarrow (q^i, q^{i+1}), E \leftarrow (Lin(q^i, E), Lin(q^{i+1}, E)), \tau \leftarrow (weight(Lin(q^i, E), Lin(q^{i+1}, E)));$
15:	$i \leftarrow i + 1;$
16:	<b>до тех пор пока</b> $i \leq N;$
17:	$Trag \leftarrow Graph Search(V, E, \tau, q^1, q^N);$
18:	$path \leftarrow OptTrag(Trag).$

Алгоритм планирования траектории для РТК ТКС

С учетом специфики и возможностей геометрического моделирования роботов-манипуляторов в современных CAD-системах на основе предложенного метода разработан алгоритм планирования траектории, ориентированный на интеграцию в модуль автономного программирования РТК точечной контактной сварки, приведенный в табл. 1. Алгоритм использует следующие обозначения:  $\{f_i\}_{i=1}^N$  – множество векторов, определяющих направление подхода сварочных клещей к точкам свариваемого шва  $p_i$ ;  $Gen(q^i)$  – функция генерации некоторой конфигурации робота-манипулятора  $q^i$ ;  $Lin(q^i, E)$  – функция генерации линейного («простого») участка траектории между конфигурацией  $q^i$  и конфигурациями, входящими в множество  $E$ ;  $N_d$  – количество вершин графа  $DCf$ ;  $search(\alpha^i, \beta^i, \gamma^i, x^i, conf)$  – функция поиска сво-

бодных от столкновений конфигураций робота в точке свариваемого шва  $p_i$ ;  $weight(e_1, e_2)$  – функция вычисления весовой функции  $\tau_r$  для ребер графа  $e_1$  и  $e_2$ ;  $GraphSearch(V, E, \tau, q^1, q^N)$  – функция поиска кратчайших путей на графе  $DCf$  – элементов множества  $q^1$  до элементов множества  $q^N$ ;  $OptTrag(Trag)$  – функция поиска оптимального в смысле критерия (3) пути  $path$  из множества путей  $Trag$ .

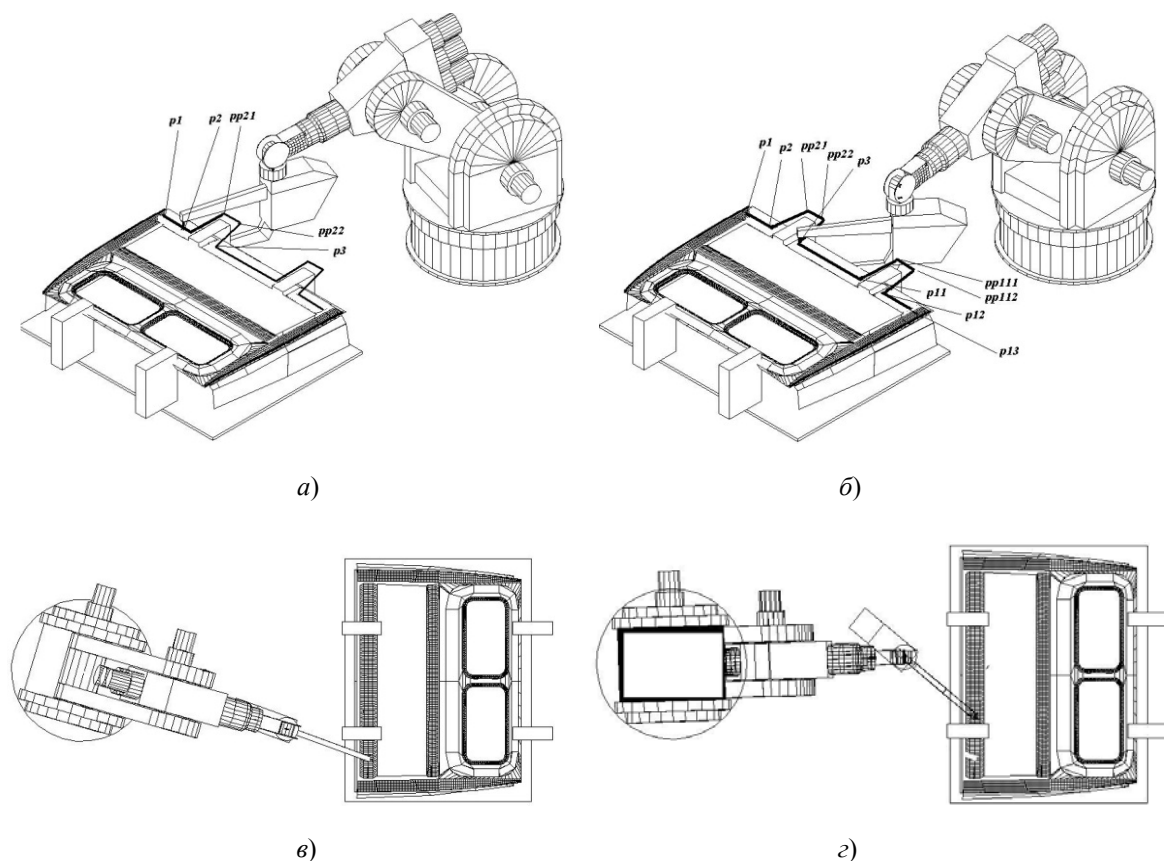


Рис. 3. Моделирование траектории движения робота IR161 в процессе ТКС:

а – позиционирование технологического инструмента в точке  $p_2$ ; б – позиционирование технологического инструмента в точке  $p_3$ ; в – вид сверху на РТК с позиционированием технологического инструмента в точке  $p_2$ ; г – вид сверху на РТК с позиционированием технологического инструмента в точке  $p_3$

### Исследование эффективности метода

Исследование эффективности предложенного метода выполнялось в среде САПР ROBOMAX. Разработанный алгоритм планирования траектории реализован на языке программирования C++ в виде автономного модуля и интегрирован в данную САПР. В качестве объекта использовалась роботизированная ячейка, включающая робот-манипулятор IR161, оснащенный клещами для точечной контактной сварки, свариваемую деталь (деталь кабины автомобиля ГАЗель), кондукторную плиту и технологическую оснастку (рис. 3). Свариваемый шов, а также фрагменты траекторий движения сварочных клещей при обходе прижимов показаны на рисунках утолщенной линией. В качестве препятствий в данном случае рассматриваются сварная конструкция, технологическая оснастка (прижимы), а также кондукторная плита. На рис. 3, а и б показана полученная на основе разработанного алгоритма последовательность движений робота – манипулятора и сварочных клещей. Электрод клещей движется от точки  $p_1$  к точке  $p_2$  по прямолинейной траектории, далее посредством двух промежуточных точек  $pp21$ ,  $pp22$  выполняется обход прижима и выход на точку сварного шва  $p_3$  (рис. 3, а, в, г). Аналогич-

ным образом сварочные клещи перемещаются по остальным 13 точкам сварного шва с автоматическим обходом второго прижима через промежуточные точки  $pp111$ ,  $pp112$  (рис. 3, б). Во всех 13 точках сварного шва ориентация сварочных клещей остается в допустимых пределах:  $\alpha = \pm 10^\circ$  и  $\beta = \pm 10^\circ$ .

Важно отметить, что в приведенном примере реализации каждому частному положению сварочных клещей соответствует по 8 возможных решений обратной задачи кинематики робота-манипулятора IR161 для каждой тройки дискретных углов ориентации (2) из области их допустимых значений (1). Таким образом, одна и та же траектория движения рабочей точки сварочных клещей может быть реализована путем движения робота-манипулятора IR161 через различные конфигурации из допустимого множества (4). Соответственно, реализованный алгоритм планирования траектории выполняет как поиск траекторий робота, проходящих через различные конфигурации из допустимого множества (4), так и выбор оптимальной траектории, обеспечивающей минимальное суммарное время перемещения сварочных клещей.

Таблица 2

Время генерации траектории обхода прижима при различных значениях параметра дискретизации  $N_d$

Параметр дискретизации $N_d$	Количество тестов столкновения	Время поиска траектории по обходу прижима, с
20	8000	0,3
50	25000	22,3
100	1000000	122,2

Для различных значений параметра дискретизации конфигурационного пространства  $N_d$  экспериментально было определено количество тестов столкновений и приблизительное время вычислений (табл. 2) по формированию участка траектории для автоматического обхода прижима. Эксперименты проводились на ЭВМ с тактовой частотой процессора 3 ГГц. Из табл. 2 видно, что алгоритм сходится за приемлемое для практики время.

На основе полученной траектории сформирована технологическая программа на языке программирования робота SRCL (*Siemens Robot Control Language*). Тестирование этой программы в подсистеме *off-line* программирования САПР ROBOMAX показало, что она обеспечивает свободное от столкновения движение манипулятора и требуемую ориентацию сварочных клещей. Таким образом, анализ результатов данных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый подход эффективен при планировании траекторий в РТК точечной контактной сварки.

### Заключение

В данной работе предложен новый метод планирования траектории промышленных роботов-манипуляторов для процесса точечной контактной сварки, который в отличие от известных позволяет эффективно учесть технологические ограничения на ориентацию сварочных клещей, а также сложную форму элементов роботизированного комплекса. Предложенный подход основан на детерминистической дискретизации пространства углов ориентации клещей ТКС относительно шва и их отображении в конфигурационное пространство робота.

Эффективность предложенного метода планирования подтверждается результатами тестирования в среде САПР ROBOMAX.

**Литература**

1. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations / H. Choset [et al.]. – Boston : MIT Press, 2005. – 680 p.
2. LaValle, S. M. Planning Algorithms / S. M. LaValle. – Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2006. – 1023 p.
3. Lahijanian, M. A. Sampling-Based Strategy Planner for Nondeterministic Hybrid Systems / M. A. Lahijanian, L. E. Kavraki, M. Y. Vardi // International Conference on Robotics and Automation, Hong Kong, China, 2014. – P. 3005–3012.
4. Iterative Temporal Motion Planning for Hybrid Systems in Partially Unknown Environments / M. R. Maly [et al.] // ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC), Philadelphia, PA, USA, ACM, 2013. – P. 353–362.
5. Sucan, I. A. Accounting for Uncertainty in Simultaneous Task and Motion Planning Using Task Motion Multigraphs / I. A. Sucan, L. E. Kavraki // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – St. Paul. – 2012. – P. 4822–4828.
6. Kavraki, L. E. Motion planning / L. E. Kavraki, S. M. LaValle. // Springer Handbook of Robotics ; editors: B. Siciliano and O. Khatib. – Springer-Verlag, 2008. – 1628 p.
7. Geraerts, R. J. A comparative study of probabilistic roadmap planners / R. J. Geraerts, M. H. Overmars // Algorithmic Foundations of Robotics V. – Berlin : Springer-Verlag, 2003. – P. 43–58.
8. Geraerts, G. J. Reachability-based Analysis for Probabilistic Roadmap Planners / G. J. Geraerts, M. H. Overmars // Journal of Robotics and Autonomous Systems. – 2007. – № 55. – P. 824–836.
9. Geraerts, R. J. Sampling and Node Adding in Probabilistic Roadmap Planners / R. J. Geraerts, M. H. Overmars // Journal of Robotics and Autonomous Systems. – 2006. – № 54. – P. 165–173.
10. LaValle, S. M. On the relationship between classical grid search and probabilistic roadmaps / S. M. LaValle, M. Branicky, S. R. Lindemann // International Journal of Robotic Research. – 2004. – № 23 (7/8). – P. 673–692.
11. Quasi-randomized path planning / M. Branicky [et al.] // International Conference on Robotic and Automation, Seoul, Korea, 2001. – P. 1481–1487.
12. Yershova, A. Improving motion planning algorithms by efficient nearest-neighbor searching / A. Yershova, S. M. LaValle // IEEE Transactions on Robotics. – 2007. – № 23 (1). – P. 151–157.
13. Пашкевич, А. П. Автоматизированное проектирование промышленных роботов и робототехнологических комплексов для сборочно-сварочных производств / А. П. Пашкевич. – Минск : БГУИР, 1996. – 107 с.
14. Пашкевич, А. П. Синтез конфигурационного пространства роботов-манипуляторов на основе нейронных сетей / А. П. Пашкевич, М. М. Кожевников // Докл. БГУИР. – Минск, 2003. – Т. 1, № 2. – С. 121–128.
15. Пашкевич, А. П. Нейросетевая модель для синтеза конфигурационного пространства манипуляторов / А. П. Пашкевич, М. М. Кожевников // Нейрокомпьютеры: Разработка и применение. – 2004. – № 1. – С. 40–50.

*Получено 02.11.2015 г.*