

# АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Илюшин И. Э., Кожевников М. М.

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств, Могилевский государственный университет продовольствия  
Могилев, Республика Беларусь  
E-mail: iliue@yandex.by, kmmk@mail.ru

*Предложены новые эффективные метод и алгоритм автоматического управления роботами-манипуляторами в процессе дуговой сварки при наличии технологических ограничений. Предложенный подход, в отличие от известных, позволяет эффективно учесть форму сварного шва, а также ограничения, накладываемые на его ориентацию. Эффективность разработанного метода и алгоритма подтверждена результатами экспериментов с моделями промышленных роботов-манипуляторов.*

## ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемой работе рассматриваются задачи управления роботами-манипуляторами (РМ) и роботизированными технологическими комплексами (РТК) в технологическом процессе дуговой сварки (ДС). Стандартный комплекс для ДС (рис.1.) включает манипулятор 1 с шестью степенями свободы ( $q_1$ - $q_6$ ) и сварочную горелку 2. Сварная конструкция 3 смонтирована на позиционере 4 с тремя степенями свободы ( $g_1$ - $g_3$ ), причем первое от базы сочленение позиционера ( $g_1$ ) используется для перемещения сварной конструкции в зону выполнения сварочных операций, а оставшиеся два сочленения ( $g_2$ ,  $g_3$ ) – для ориентирования сварных швов [1-3]. Тогда общее число степеней свободы роботизированной сварочной системы – девять.

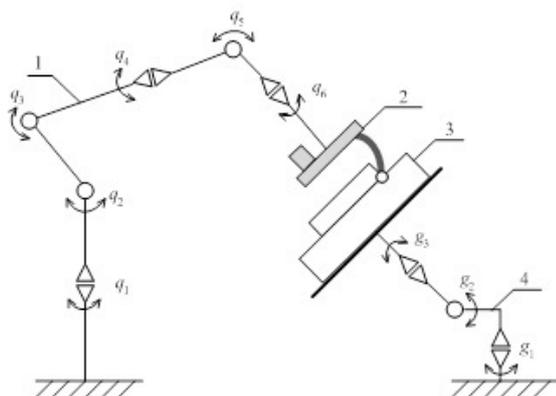


Рис. 1 – Схема РТК для ДС

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ввиду конструктивных особенностей РМ зададим следующие ограничения:

$$\mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max}, \quad (1)$$

$$\mathbf{g}_{\min} \leq \mathbf{g} \leq \mathbf{g}_{\max}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{q} = [q_i]^T$  – конфигурация робота,  $\mathbf{g} = [g_i]^T$  – конфигурация позиционера,  $\mathbf{q}_{\max}$ ,  $\mathbf{q}_{\min}$  – максимальное и минимальное ограничения на диапазоны углов в сочленениях РМ,  $\mathbf{g}_{\max}$ ,  $\mathbf{g}_{\min}$  – максимальное и минимальное ограничения на диапазоны углов в сочленениях позиционера.

Ориентация сварного шва определяется углами  $\theta$  и  $\varepsilon$  (рис. 2).

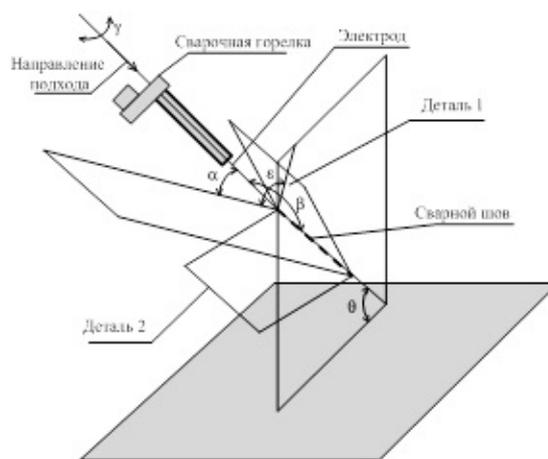


Рис. 2 – Ориентация горелки дуговой сварки и сварного шва

Угол  $\theta$  – угол между линией сварного шва и горизонтальной плоскостью. Угол  $\varepsilon$  определяет отклонение биссектрисы угла между свариваемыми деталями от вертикальной плоскости и для значений этих углов определяются допустимые диапазоны изменения. Ориентация горелки дуговой сварки относительно сварного шва задается двумя углами  $\alpha$  и  $\beta$ . Угол  $\alpha$  характеризует наклон плоскости перемещения сварочной горелки относительно биссектрисы угла образованного свариваемыми деталями,  $\beta$  – угол наклона сварочной горелки к линии сварного шва. Угол  $\gamma$  определяет совместно с  $\alpha$  и  $\beta$  ориентацию сварочной горелки.

С учетом технологических ограничений дуговой сварки зададим диапазоны изменения уг-

лов ориентации сварочной горелки и сварного шва:

$$\begin{aligned} \alpha_{min} &\leq \alpha \leq \alpha_{max}, \\ \beta_{min} &\leq \beta \leq \beta_{max}, \\ \gamma_{min} &\leq \gamma \leq \gamma_{max}, \\ \theta_{min} &\leq \theta \leq \theta_{max}, \\ \varepsilon_{min} &\leq \varepsilon \leq \varepsilon_{max}. \end{aligned} \quad (3)$$

Разобьём указанные допустимые диапазоны изменения углов ориентации с параметром дискретизации  $n$ . В случае сварки швов сложной формы необходимо изменять ориентацию сварного шва по мере перемещения вдоль него сварочной горелки. Следовательно шов сложной формы разделяется на ряд «простых» сегментов (ограничены точками  $p_j$ ), ориентирование которых осуществляется индивидуально за счет одновременного перемещения позиционера и робота.

## II. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Представим модель конфигурационного пространства манипулятора применив неориентированный граф  $DCf=(V,E)$ . Вершины графа  $V$  описывают конфигурации манипулятора, в которых нет столкновений и которым соответствуют определенные конфигурации позиционера. Ребра графа  $E$  определяются как фрагменты траектории горелки между конфигурациями манипулятора из  $V$ . Используя данный подход, а также с учетом рассмотренных механических и технологических ограничений разработан алгоритм управления РМ для ДС. Он включает следующие этапы.

1. Используя обратное кинематическое преобразование позиционера, вычисляются углы в его сочленениях, соответствующие дискретным значениям допустимых углов ориентации  $\theta$  и  $\varepsilon$ .

2. Используя прямое кинематическое преобразование позиционера, вычисляются множества, определяющие координаты точек сварного шва  $p_j$  при конфигурировании позиционера.

3. Используя обратное кинематическое преобразование манипулятора, вычисляются углы в его сочленениях, соответствующие дискретным значениям допустимых углов ориентации сварочной горелки  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .

4. Каждый элемент множеств  $q$  проверяется на принадлежность свободному от столкновений пространству при конфигурировании модели соответствующими углами из множества  $g$ . Если элемент принадлежит свободному пространству, то он и соответствующий ему элемент, описывающий углы в сочленениях позиционера, добавляются в множество вершин  $V$ , в противном случае элемент отбрасывается.

5. Производится поиск траектории манипулятора между элементами множеств  $q$ , включенных в множество  $V$  и соответствующим соседним точкам  $p_j$ . При существовании таких фрагментов траектории ребро включается в  $E$ .

6. Пункты 1-5 выполняются циклически для каждой из точек шва. В результате этого формируется граф, включающий конфигурации манипулятора и позиционера, которые обеспечивают сварку точек шва, и «простые» участки траекторий между этими конфигурациями, движение сварочной горелки вдоль которых не приводит к столкновениям и выходу за технологические и конструктивные ограничения.

7. Ищутся множества возможных маршрутов на графе  $DCf$ , образующих траектории манипулятора, согласованные с ориентационными движениями позиционера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность предлагаемого подхода исследована на примере сварочного РТК (рис.3). Роботизированный комплекс обеспечивает сварку металлических пластин и реализован на базе манипулятора IR761, пятиосного позиционера и контроллера RCM3. Результаты тестирования разработанных метода и алгоритма управления показывают, что они позволяют найти траектории движения РМ вдоль сварных швов с эффективным обходом технологических ограничений.

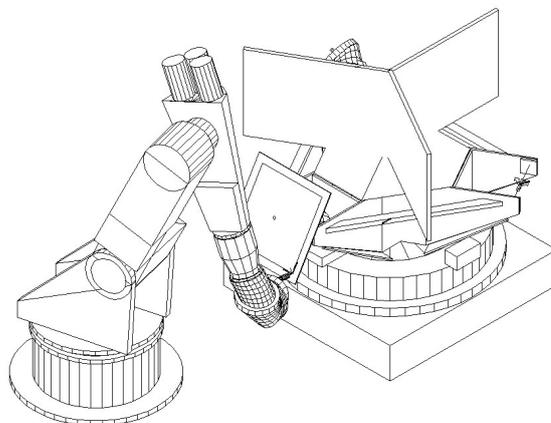


Рис. 3 – Тестовая роботизированная ячейка

1. Pires, J. N. Welding robots: technology, systems issues and applications / J. N. Pires, A. Loureiro, G. Bolmisjo. – Springer-Verlag London Limited, 2006. – 192 p.
2. Климов, А. С. Роботизированные технологические комплексы и технологические линии в сварке: учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. / А. С. Климов, Н. Е. Машнин. – СПб.: «Лань», 2011. – 240 с.
3. Springer Handbook of Robotics / ed. B. Siciliano and O. Khatib. Springer-Verlag, 2016. – 2227 p.