

УДК 621.865.8

DOI 10.52928/2070-1624-2023-40-1-8-16

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

канд. техн. наук **И. Э. ИЛЮШИН**, канд. техн. наук, доц. **М. М. КОЖЕВНИКОВ**, **А. В. ГОСПОД**
(Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Могилев)

Предложен алгоритм оптимизации роботизированного технологического комплекса для лазерной резки, при этом накладываются ограничения на углы в сочленениях робота и ограничения, учитывающие ориентацию режущего технологического инструмента. Разработанный алгоритм позволяет также минимизировать объем движений робота при формировании траектории движения лазера. Об эффективности предложенного подхода свидетельствуют результаты тестирования в среде компьютерного моделирования роботизированных комплексов на примере робота-манипулятора FANUC M-710iC/50 с 6 степенями свободы.

Ключевые слова: роботы-манипуляторы, конфигурационное пространство, лазерная резка.

Введение. Автоматизация и роботизация промышленного производства – это актуальная задача при проектировании новых или техническом перевооружении старых предприятий. Данный процесс позволяет не только повысить производительность, но и улучшить качество производимых изделий, а также значительно снизить отрицательное влияние производственных факторов на здоровье работников [1–3]. Одно из важных направлений при этом – внедрение роботов-манипуляторов (РМ) при автоматизации процесса лазерной резки. На данный момент такая задача в основном решается за счет применения порталных роботов, работа которых описывается в декартовой системе координат, однако при выполнении режущих технологических операций в трехмерном пространстве применение таких роботов недостаточно эффективно [4]. РМ с 6 степенями свободы позволяют эффективно ориентировать в пространстве режущий технологический инструмент, но при этом использование таких роботов при автоматизации процесса лазерной резки не всегда возможно, поскольку для этого необходимы эффективные подходы к оптимизации роботизированных технологических комплексов (РТК) [5; 6].

Стоит также заметить, что при планировании траектории движения режущего технологического инструмента чаще всего используется подход, предполагающий ручное обучение оператором [7]. При таком подходе осуществляется предварительное нанесение на поверхность обрабатываемого изделия контура резки, после чего осуществляющий обучение робота оператор использует пульт для перемещения лазера вдоль линий данного контура и записывает промежуточные положения робота в память контроллера. Однако сформированная траектория должна учитывать заданную для рассматриваемого процесса точность позиционирования, а также ряд различных технологических ограничений, для чего необходимо неоднократное выполнение и корректировка управляющей программы, что значительно увеличивает сроки перепрограммирования РМ. Альтернативный ручному обучению подход предполагает формирование траектории с использованием трехмерных моделей РТК [6; 8]. Но в таком случае появляется необходимость решения задач оптимизации роботизированных технологических комплексов лазерной резки.

1. Постановка задачи. При оптимизации роботизированных технологических комплексов для лазерной резки необходимо определить положение базы манипулятора относительно обрабатываемой детали [9]. Для этого предлагается разбить рабочее пространство РМ для получения дискретного множества возможных положений базы робота-манипулятора (рисунок 1).

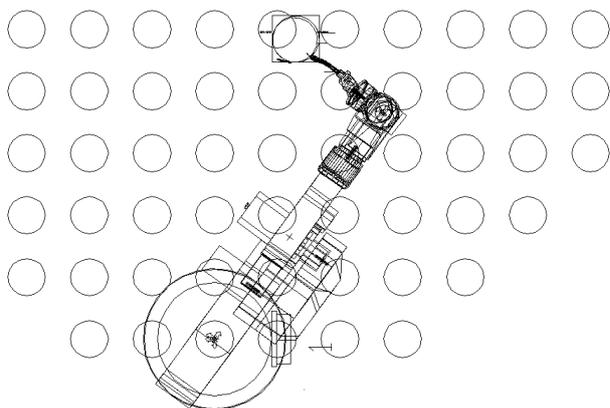


Рисунок 1. – Дискретное множество возможных положений базы робота-манипулятора

После дискретизации рабочего пространства робота для каждого положения базы определяется оптимальная траектория. Далее из этих траекторий выбирается та, при которой минимизируется объем движения РМ, т. е. данной траектории соответствует оптимальное положение базы. Поиск траектории осуществляется в конфигурационном пространстве робота-манипулятора, в качестве конфигурации выступает вектор

$$\mathbf{q} = [q_i]^T, \tag{1}$$

где q_i – угол в i -м сочленении РМ (рад);
 $i = 1 \dots n$;
 n – число степеней свободы робота-манипулятора.

Поскольку для каждого сочленения манипулятора углы ограничены максимальным и минимальным значением, на конфигурации накладываются ограничения следующего вида:

$$\mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max}, \tag{2}$$

где $\mathbf{q}_{\min}, \mathbf{q}_{\max}$ – векторы, ограничивающие величины углов в сочленениях робота-манипулятора q_i снизу и сверху соответственно.

При перемещении лазера вдоль контура резки робот может упереться в препятствие (например, обрабатываемое изделие, оснастку роботизированной ячейки и т. д.). Все возможные конфигурации РМ, включая и те, в которых определено столкновение, образуют полное конфигурационное пространство $\mathbf{C} = \{\mathbf{q}\}$. При этом траектория робота должна состоять только из положений манипулятора, в которых отсутствует столкновение, т. е. входящих в свободное от столкновений пространство \mathbf{C}_f , формируемое за счет проведения теста на столкновение

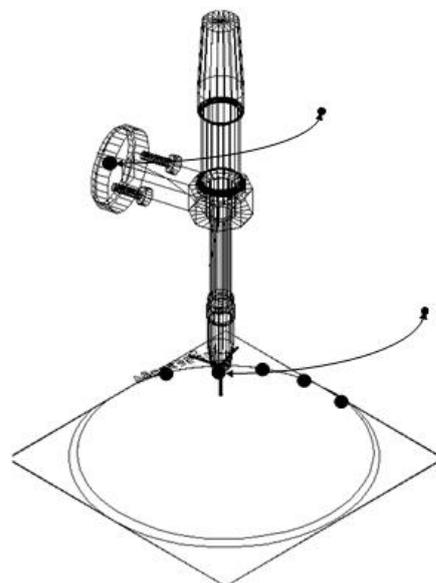
$$\|\mathbf{M}(\mathbf{q}) - \mathbf{V}\| \leq \delta, \tag{3}$$

где $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ – векторная модель РМ в рассматриваемой конфигурации \mathbf{q} ;
 \mathbf{V} – множество векторных моделей препятствий;
 δ – точность позиционирования режущего технологического инструмента.

При движении режущего технологического инструмента (лазера) необходимо учесть ограничения на его ориентацию, обусловленные технологией лазерной резки. Ориентация определяется углом между прямой, сонаправленной с осью режущего инструмента, и плоскостью обрабатываемой поверхности α : при обходе контура резки инструмент необходимо ориентировать строго перпендикулярно (рисунок 2). Кроме того, инструмент осуществляет вращение вокруг своей оси на произвольный угол γ . Таким образом, технологические ограничения на ориентацию режущего инструмента имеют вид

$$\alpha = \pi / 2, \gamma \in (-\pi, \pi]. \tag{4}$$

Рисунок 2. – Ориентация режущего технологического инструмента



В качестве модели пространства C_f удобно использовать граф вида

$$\mathbf{R} = (\mathbf{V}, \mathbf{E}), \quad (5)$$

где \mathbf{V} – множество вершин графа, которые являются конфигурациями робота \mathbf{q} , прошедшими тест на столкновение (3);

\mathbf{E} – множество ребер графа, соединяющих соседние вершины из множества \mathbf{V} .

Для формирования множества \mathbf{V} проводится рандомизированная генерация конфигураций робота, которые удовлетворяют условиям (2) и (4). Далее устанавливается, проходят ли конфигурации проверку на столкновение (3): при отсутствии столкновений рассматриваемая конфигурация включается в множество \mathbf{V} . Множество ребер \mathbf{E} формируется за счет проверки соседних конфигураций на наличие между ними прямолинейных участков траектории без столкновений. Если таковые имеются, они включаются в множество \mathbf{E} . При этом в зонах конфигурационного пространства с большим количеством препятствий поиск траектории предложенным рандомизированным методом значительно усложняется. Соответственно, в случае выявления подобных зон, они дискретизируются решеткой с упорядоченной структурой \mathbf{G} , которая включается в граф (5).

Таким образом, задача оптимизации формулируется следующим образом: на дискретном графе (4) необходимо найти последовательность конфигураций $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_{g-1}, \mathbf{q}_g$, образующих траекторию робота-манипулятора с минимальным объемом движений:

$$\sum_{m=1}^{g-1} (\mathbf{q}_{m+1} - \mathbf{q}_m) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где \mathbf{q}_1 и \mathbf{q}_g – стартовая и целевая конфигурации робота.

2. Алгоритм оптимизации роботизированного технологического комплекса лазерной резки.

Для решения поставленной задачи предложен алгоритм оптимизации (рисунок 3), исходными данными для которого являются геометрическая модель РТК (робота-манипулятора и препятствий), а также исходная и целевая конфигурации РМ. Алгоритм предполагает выполнение следующих шагов:

1. Формируется множество вершин \mathbf{V} графа (5) с учетом выражений (2)–(4) в количестве, равном N_{\max} .
2. Осуществляется формирование множества \mathbf{E} графа (5) посредством определения простейших фрагментов траектории между соседними вершинами из множества \mathbf{V} .
3. В случае когда между соседними вершинами не определен простейший прямолинейный фрагмент траектории, осуществляется проверка рассматриваемых вершин на наличие в их окрестности большого количества препятствий. При выявлении такой области, она дискретизируется решеткой с упорядоченной структурой \mathbf{G} , которая включается в граф (5).
4. Шаги 2–3 повторяются в количестве K_{\max} раз.
5. На сформированном графе (5) осуществляется поиск кратчайшей траектории (с минимальным объемом движений в соответствии с выражением (6)).

Предложенный алгоритм использует ряд обозначений: процедура *Randq* позволяет проводить рандомизированную генерацию конфигурации \mathbf{q} , которая удовлетворяет условиям (2) и (4); процедура *Rand* необходима для получения двух различных случайных целых чисел (от 1 до N_{\max}); D – это функция, позволяющая проверить, являются ли конфигурации соседними, результатом ее выполнения является расстояние между двумя положениями робота. Функция D определяется следующим образом:

$$D(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_b) = \max_{\mathbf{x} \in \mathbf{M}} \|\mathbf{x}(\mathbf{q}_b) - \mathbf{x}(\mathbf{q}_a)\|, \quad (7)$$

где $\mathbf{x}(\mathbf{q}_a)$, $\mathbf{x}(\mathbf{q}_b)$ – векторы, задающие координаты точек, принадлежащих геометрической модели робота-манипулятора $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ в конфигурациях \mathbf{q}_a и \mathbf{q}_b соответственно;

$\|\mathbf{x}(\mathbf{q}_b) - \mathbf{x}(\mathbf{q}_a)\|$ – Евклидово расстояние между векторами $\mathbf{x}(\mathbf{q}_a)$ и $\mathbf{x}(\mathbf{q}_b)$.

Функция *EPath* позволяет найти простейший прямолинейный фрагмент траектории между двумя соседними конфигурациями робота-манипулятора за счет проверки промежуточных положений с заданным шагом на столкновение с препятствиями в соответствии с выражением (3). Процедура *Connect* дает возможность определить на решетке с упорядоченной структурой \mathbf{G} конфигурации, ближайшие к рассматриваемым конфигурациям из множества \mathbf{V} , в окрестности которых выявлена зона с большим количеством препятствий. Функция *GraphSearch* возвращает кратчайший путь на графе \mathbf{R} от стартовой конфигурации \mathbf{q}_1 до целевой \mathbf{q}_g с учетом критерия (6).

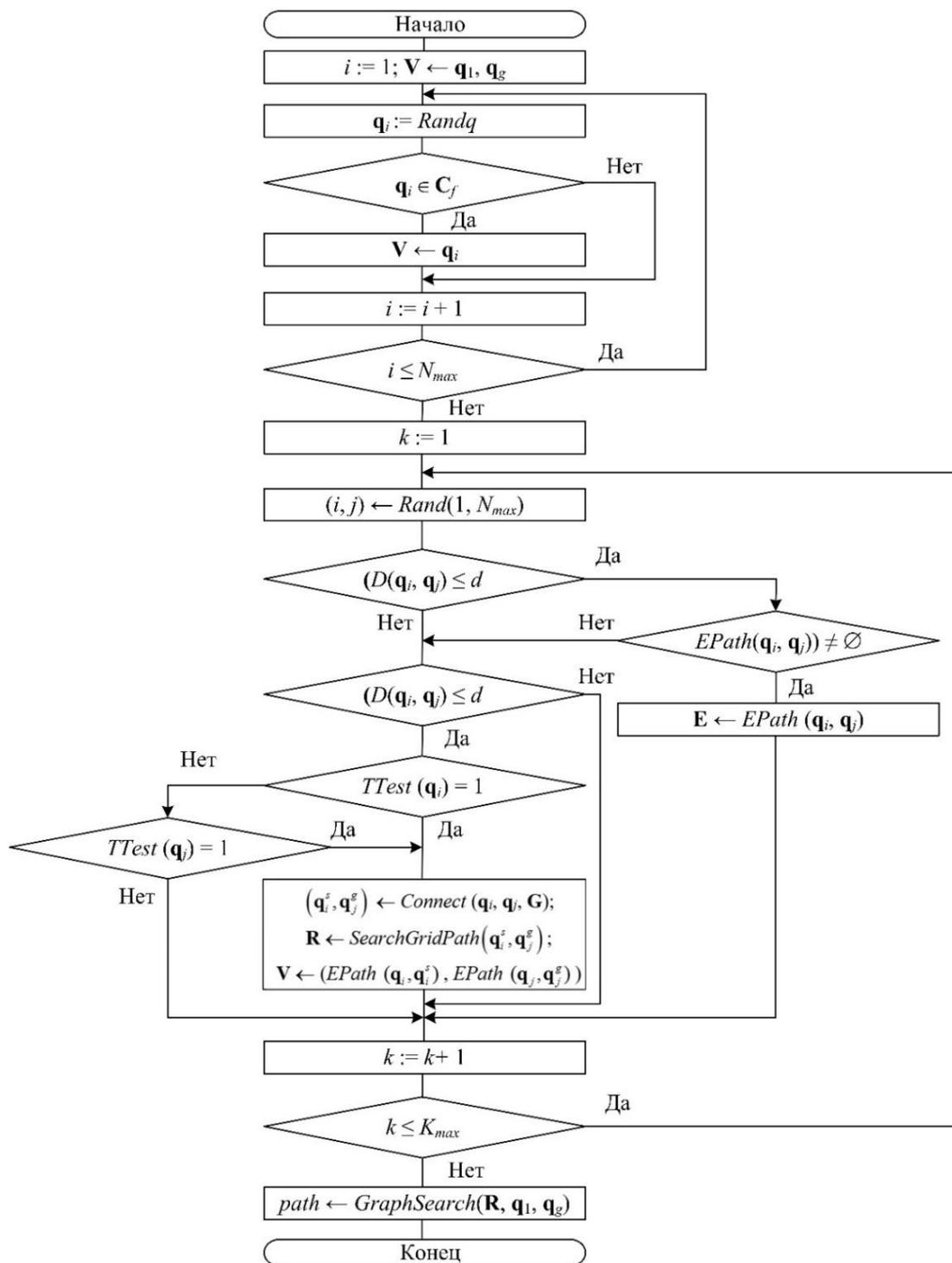


Рисунок 3. – Алгоритм оптимизации РТК лазерной резки

Процедура *SearchGridPath* (рисунок 4) осуществляет поиск криволинейного пути между двумя конфигурациями РМ за счет дискретизации области рассматриваемых конфигураций решеткой с упорядоченной структурой [10–13]. Реализация процедуры включает следующие обозначения: N_0 – изначальное значение на первой итерации параметра, характеризующего частоту дискретизации пространства конфигураций РМ при помощи решетки с упорядоченной структурой; N_{max} – максимально допустимое значение параметра дискретизации пространства конфигураций при помощи решетки с упорядоченной структурой; N_s – шаг, на который повышается параметр дискретизации при последующей итерации; \mathbf{P} – фрагмент траектории манипулятора (криволинейный). При выполнении процедуры *SearchGridPath* реализуется ряд

функций: $\max f(\phi_{b_k})$ – это функция для выбора наибольшего значения весовой функции ϕ из множества значений ϕ_{b_k} ; $\max b(\phi_{b_k})$ – функция для определения индекса b , соответствующего максимальному значению весовой функции; $\mathbf{q}(\phi)$ – функция для определения конфигурации РМ с соответствующим ей значением весовой функции ϕ ; $\text{explore}(\mathbf{q}(\phi_a), \mathbf{q}(\phi_b))$ – функция, позволяющая определить наличие простейшего прямолинейного фрагмента траектории между двумя конфигурациями $\mathbf{q}(\phi_a)$ и $\mathbf{q}(\phi_b)$: если фрагмент траектории определен, то значение функции равно 1, если не определен, то значение функции равно 0.

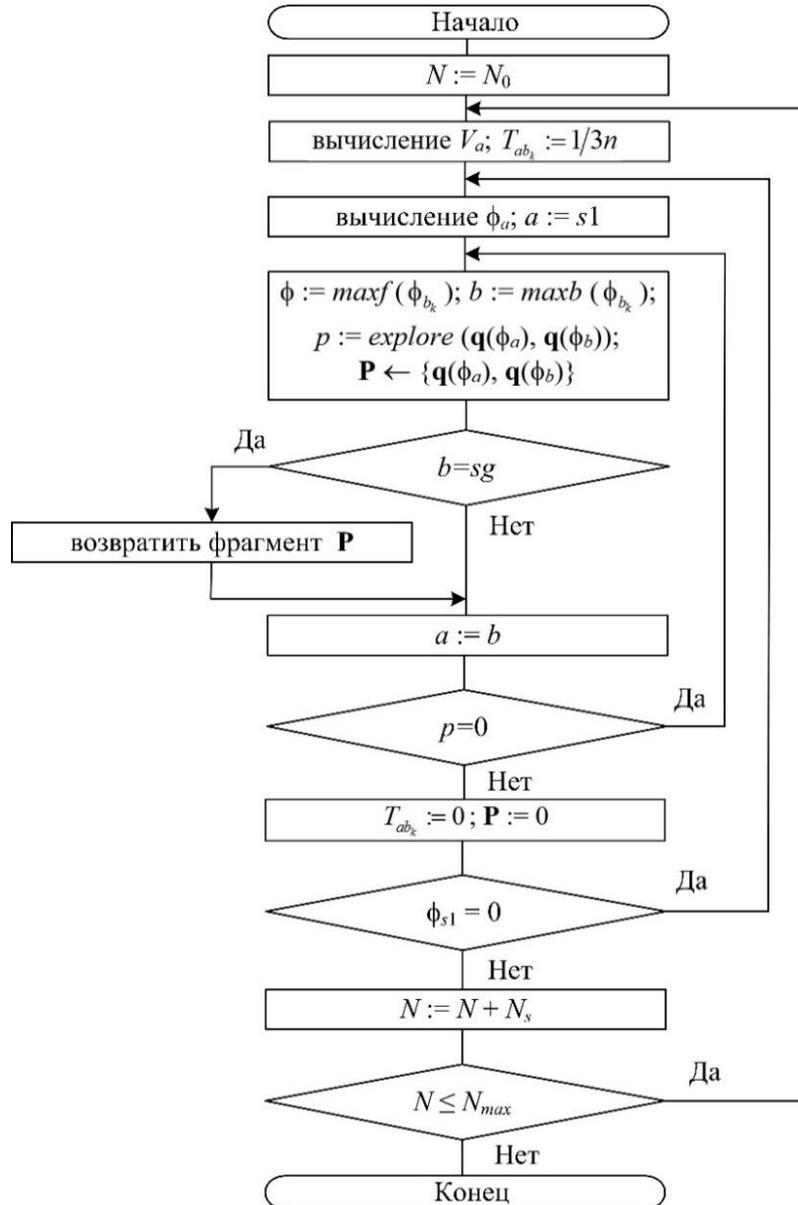


Рисунок 4. – Алгоритм процедуры *SearchGreedPath*

Процедура *SearchGreedPath* реализована в следующей очередности. Задается малый параметр дискретизации конфигурационного пространства N_0 и предполагается наличие элементарных участков траектории (ребер), которые соединяют соседние вершины решетки (узлы) с упорядоченной структурой – каждому ребру ставится в соответствие весовой коэффициент, равный $1/3n$. Далее рассчитывается весовая функция для каждого из узлов решетки ϕ_a ($a=1:N^n$), после чего определяется траектория от начального положения робота (конфигурация \mathbf{q}_{s1}) к конечному (конфигурация \mathbf{q}_{sg}) посредством движения в градиентном направлении весовой функции. При этом осуществляется проверка ребер решетки, соединяющих соседние узлы

\mathbf{q}_a и \mathbf{q}_{b_k} , на наличие столкновений. Если столкновения не определены, то происходит переход к двум последующим узлам решетки текущего разрешения в направлении градиента. Если определено столкновение, то соответствующему ребру решетки T_{ab_k} ставится в соответствие весовой коэффициент, равный 0.

Для описания состояния предложенной модели в виде решетки с упорядоченной структурой использована система дифференциальных уравнений, результатом решения которой является итерационное выражение вида

$$\phi_a^{(l+1)} = f_a \left(\sum_{k=1}^d T_{ab_k} \phi_{b_k}^l + V_a \right), \tag{8}$$

где l – номер итерации;

V_a – параметр, который принимает значения: $V_a = -1$, если $\mathbf{q}_a \notin \mathbf{C}_f$; $V_a = 1$, $\mathbf{q}_a = \mathbf{q}_{sg}$; $V_a = 0$ во всех остальных случаях.

Нелинейная функция f_a имеет вид

$$f_a(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < 0; \\ \tanh(x), & \text{если } x \geq 0. \end{cases} \tag{9}$$

Функция $TTest$ (рисунок 5) позволяет осуществить проверку окрестности рассматриваемой конфигурации на «насыщенность» препятствиями. Для этого генерируются случайные конфигурации \mathbf{c} в области рассматриваемой в количестве K штук (при помощи функции $Randc$). Если количество столкновений превышает установленное предельное значение K_{min} , то функция $TTest$ будет возвращать значение 1 (т. е. область конфигурации «насыщена» препятствиями), в противном случае – значение 0.

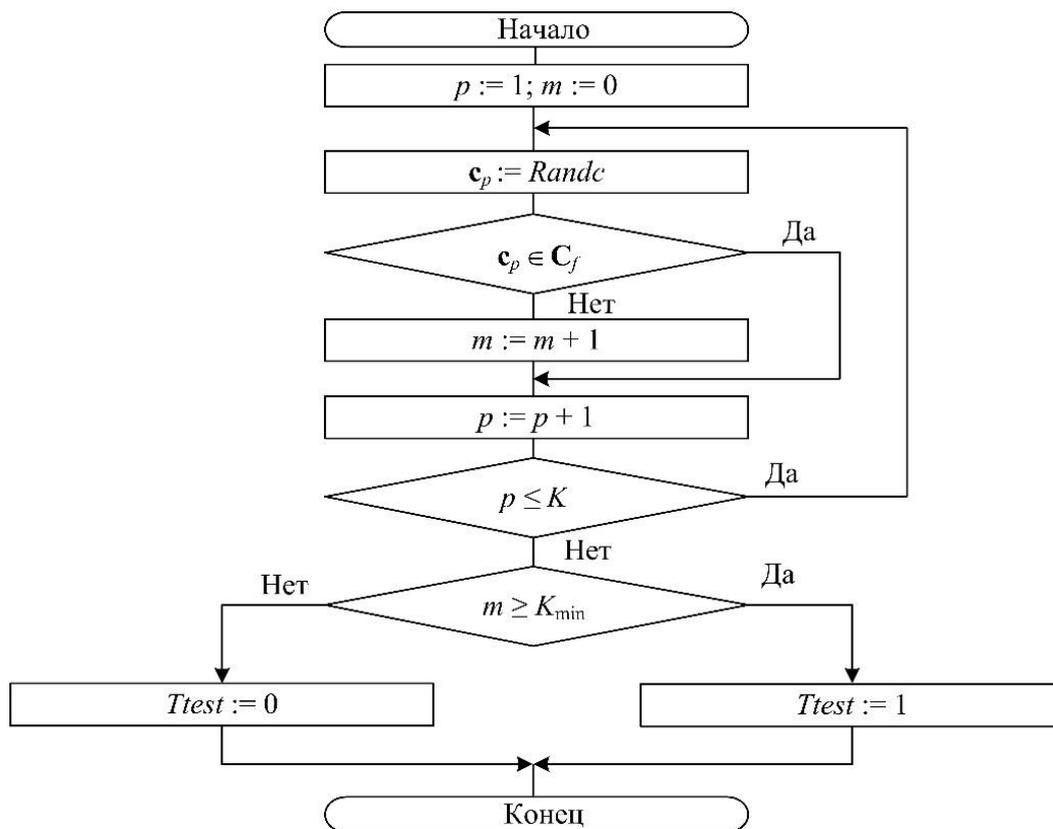


Рисунок 5. – Алгоритм функции $TTest$

3. Тестирование алгоритма. Для тестирования алгоритма использовался роботизированный технологический комплекс на базе робота-манипулятора FANUC M-710iC/50 с 6 степенями свободы, управление которым осуществляется через контроллер FANUC R-30iB. Режущий технологический инструмент

перемещается вдоль условного контура резки квадратной формы. Программная реализация предложенного алгоритма использована совместно с системой моделирования ROBOGUIDE фирмы FANUC, в результате чего была получена последовательность конфигураций РМ, обеспечивающая движение без столкновений с препятствиями в соответствии с условием (3), а также с учетом ограничений (2), (4). Результаты тестирования позволяют сделать вывод об эффективности предложенного алгоритма оптимизации роботизированного технологического комплекса лазерной резки.

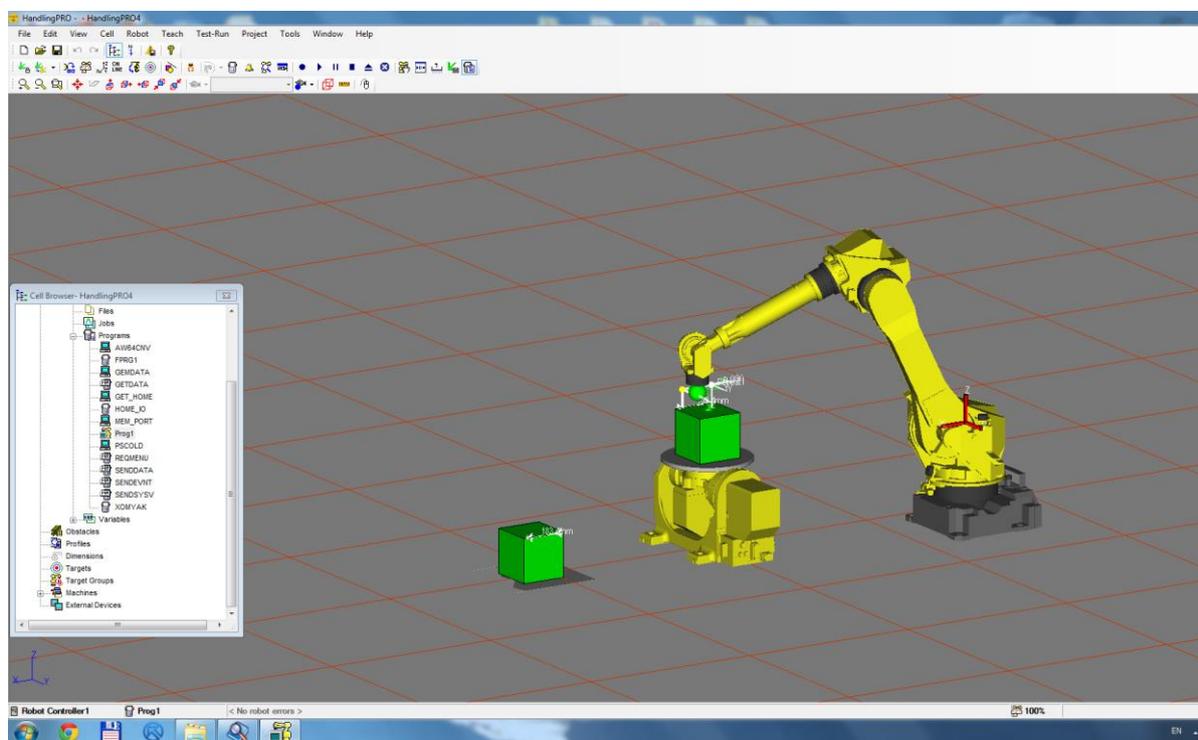


Рисунок 6. – Моделирование движения режущего инструмента в системе ROBOGUIDE

Заключение. В статье предложен алгоритм оптимизации роботизированного технологического комплекса для лазерной резки. Алгоритм основан на случайной дискретизации конфигурационного пространства робота-манипулятора в зонах с малым количеством препятствий и дискретизации решеткой с упорядоченной структурой в зонах, в которых определено большое количество препятствий. Кроме того, разработанный алгоритм предполагает учет ограничений на углы в сочленениях робота и ограничений, учитывающих ориентацию режущего технологического инструмента. Предложенный подход позволяет также минимизировать объем движений робота при формировании траектории движения режущего инструмента. Эффективность алгоритма оптимизации подтверждается результатами тестирования в среде компьютерного моделирования роботов-манипуляторов и роботизированных технологических комплексов ROBOGUIDE.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ершова И. В., Подоляк О. О., Данилов А. В. Факторы эффективности внедрения робототехнических комплексов на российских предприятиях // Известия УГТУ. – 2018. – № 2 (50). – С. 130–134. – DOI: [10.21440/2307-2091-2018-2-130-134](https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-2-130-134).
2. Крутько П. Д., Науменко М. Г. Алгоритмы адаптивного управления движением голономных механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 6. – С. 76–86. – URL: <https://naukarus.com/algoritmy-adaptivnogo-upravleniya-dvizheniem-golonomnyh-mehnicheskikh-sistem> (дата обращения 09.11.2022).
3. Крутько П. Д., Кузьмин Д. В. Управление движением манипулятора при выполнении погрузочных операций // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 3. – С. 91–97. – URL: https://www.studmed.ru/statya-krutko-pd-kuzmin-dv-upravlenie-dvizheniem-manipulyatora-pri-vypolnenii-pogruzochnyh-operaciy_41cc6b60cf3.html (дата обращения 09.11.2022).
4. Pashkevich A., Dolgui A., Chumakov O. Multiobjective optimisation of robot motion for laser cutting application // International J. Of Computer Integrated Manufacturing. – Taylor and Francis, London, 2004. – Vol. 17, № 2. – P. 171–183. – DOI: [10.1080/0951192031000078202](https://doi.org/10.1080/0951192031000078202).
5. Dolgui A., Pashkevich A. Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting // International J. of Production Research. – Taylor and Francis, London, 2009. – Vol. 47, № 20. – P. 5691–5715. – DOI: [10.1080/00207540802070967](https://doi.org/10.1080/00207540802070967).

6. Moharana B., Gupta R., Kushawaha B. K. Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot // *International J. of Engineering Trends and Technology*. – 2014. – Vol. 10, № 4. – P. 176–179. – DOI: [10.14445/22315381/IJETT-V10P233](https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V10P233).
7. Цыбулькин Г. А. Автоматизация процедур обучения роботов семейства «PUMA» // *Автомат. сварка*. – 2007. – № 6. – С. 49–50. – URL: <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/99420> (дата обращения 09.11.22).
8. Dolgui A., Pashkevich A. Manufacturing process planning for laser cutting robotic systems // *Proc. of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6–11, 2008*. – Vol. 41, iss. 2. – P. 14822–14827. – DOI: [10.3182/20080706-5-KR-1001.02509](https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02509).
9. Кожевников М. М., Чумаков О. А., Илюшин И. Э. и др. Методика оптимизации положения робота-манипулятора в технологическом процессе лазерной резки // *Доклады БГУИР*. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 49–57. – URL: https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/3077?locale=ru_RU (дата обращения 09.11.2022).
10. Pashkevich A., Kazheunikau M., Ruano A. E. Neural network approach to collision free path planning for robotic manipulators // *International J. of Systems Science*. – 2006. – № 37 (8). – P. 555–564. – DOI: [10.1080/00207720600783884](https://doi.org/10.1080/00207720600783884).
11. Кожевников М. М., Пашкевич А. П., Чумаков О. А. Планирование траекторий промышленных роботов на основе нейронных сетей // *Доклады БГУИР*. – № 4 (50). – 2010. – С. 55–62. – URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/34989> (дата обращения 09.11.2022).
12. Кожевников М. М., Господ А. В. Планирование траекторий промышленных роботов на основе нейронных сетей // *Исследования наукограда*. – 2012. – № 1 (1). – С. 37–41. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-traektoriy-promyshlennyh-robotov-na-osnove-neyronnyh-setey> (дата обращения 09.11.2022).
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, Фундам. науки*. – 2016. – № 12. – С. 22–29. – URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/18980?locale=ru> (дата обращения 09.11.2022).

REFERENCES

1. Ershova I. V., Podolyak O. O., Danilov A. V. (2018). Faktory effektivnosti vnedreniya robototekhnicheskikh kompleksov na rossiiskikh predpriyatiyakh [The factors of the effectiveness of introducing robotic complex at Russian enterprises]. *Izvestiya UGGU*, 2(50), 130–134. DOI: [10.21440/2307-2091-2018-2-130-134](https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-2-130-134). (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Krut'ko P. D., Naumenko M. G. (2004). Algoritmy adaptivnogo upravleniya dvizheniem golonomnykh mekhanicheskikh sistem. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, (6), 76–86. <https://naukarus.com/algoritmy-adaptivnogo-upravleniya-dvizheniem-golonomnyh-mekhanicheskikh-sistem>. (In Russ.).
3. Krut'ko, P. D., Kuz'min, D. V. (2004). Upravlenie dvizheniem manipulyatora pri vypolnenii pogruzochnykh operatsii. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, (3), 91–97. https://www.studmed.ru/statya-krutko-pd-kuzmin-dv-upravlenie-dvizheniem-manipulyatora-pri-vypolnenii-pogruzochnykh-operatsiy_41cc6b60cf3.html. (In Russ.).
4. Pashkevich, A. P., Dolgui, A. B., Chumakov, O. A. (2004). Multiobjective optimization of robot motion for laser cutting applications. *International J. of Computer Integrated Manufacturing*, 17(2), 171–183. DOI: [10.1080/0951192031000078202](https://doi.org/10.1080/0951192031000078202).
5. Dolgui, A., Pashkevich, A. (2009). Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting. *International J. of Production Research*, 47(20), 5691–5715. DOI: [10.1080/00207540802070967](https://doi.org/10.1080/00207540802070967).
6. Moharana B., Gupta R., Kushawaha B. (2014). Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot. *International J. of Engineering Trends and Technology*, 10(4), 176–179. DOI: [10.14445/22315381/IJETT-V10P233](https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V10P233).
7. Tsybul'kin, G. A. (2007). Avtomatizatsiya protsedur obucheniya robotov semeistva «PUMA». *Avtomat. svarka*, (6), 49–50. <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/99420>. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Dolgui, A., Pashkevich, A. (2008). Manufacturing process planning for laser cutting robotic systems. *Proc. of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Vol. 41, Iss. 2 (14822–14827)*. DOI: [10.3182/20080706-5-KR-1001.02509](https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02509).
9. Kozhevnikov, M. M., Chumakov, O. A., Ilyushin, I. E., Yurkina, A. A. (2021). Metodika optimizatsii polozheniya robota-manipulyatora v tekhnologicheskom protsesse lazernoi rezki [Method of optimization of the robot-manipulator position in the technological process of laser cutting]. *Doklady BGUIR*, 19(3), 49–57. https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/3077?locale=ru_RU. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Pashkevich, A., Kazheunikau, M., Ruano, A. E. (2006). Neural network approach to collision free path planning for robotic manipulators. *International J. of Systems Science*, 37(8), 555–564. DOI: [10.1080/00207720600783884](https://doi.org/10.1080/00207720600783884).
11. Kozhevnikov, M. M., Pashkevich, A. P., Chumakov, O. A. (2010). Planirovanie traektorii promyshlennykh robotov na osnove neironnykh setei [Trajectory planning for industrial robotic manipulators using neural network]. *Doklady BGUIR*, 4(50), 55–62. <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/34989>. (In Russ.).
12. Kozhevnikov, M. M., Gospod, A. V. (2012). Planirovanie traektorii promyshlennykh robotov na osnove neironnykh setei [Trajectory planning of industrial robots using neural network]. *Issledovaniya naukoграда*, 1(1), 37–41. <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-traektoriy-promyshlennyh-robotov-na-osnove-neyronnyh-setey>. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Pyushin, I. E., Kozhevnikov, M. M. (2016). Algoritmy upravleniya svarochnymi robotami-manipulyatorami na osnove statisticheskoi modeli konfiguratsionnogo prostranstva [Algorithms for control of welding robotic-manipulators based on a statistical model of a configuration space]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (12), 22–29. <https://elib.psu.by/handle/123456789/18980?locale=ru>. (In Russ., abstr. in Engl.).

**OPTIMIZATION ALGORITHM FOR A ROBOTIZED TECHNOLOGICAL COMPLEX
FOR LASER CUTTING*****I. ILIUSHYN, M. KOZHEVNIKOV, A. GOSPOD******(Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Mogilev)***

An optimization algorithm for a robotic technological complex for laser cutting is proposed, while restrictions are imposed on the angles in the joints of the robot and restrictions that take into account the orientation of the cutting technological tool. The developed algorithm also makes it possible to minimize the scope of the robot's movements when forming the laser's trajectory. The effectiveness of the proposed approach is evidenced by the results of testing in the environment of computer simulation of robotic technological complexes on the example of a robotic manipulator FANUC M-710iC/50 with 6 degrees of freedom.

Keywords: *robotic-manipulators, configuration space, laser cutting.*