

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ

С. В. АКИМОВ<sup>1</sup>, М. Я. АФАНАСЬЕВ<sup>2</sup>, Ю. В. ФЕДОСОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 193232, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: amax@niuitmo.ru

Рассматриваются подходы к оптимизации траектории движения исполнительного устройства технологического оборудования с числовым программным управлением, осуществляющего обработку лазерным излучением поверхностей сложной формы. В качестве основного критерия оптимизации используется время обработки. Представлены два основных способа минимизации времени: повышение скорости обработки поверхности объекта за счет плавного совмещения кривых разгона-торможения и сокращение продолжительности вспомогательных ходов. Для сокращения вспомогательных ходов предлагается использовать генетический алгоритм с кроссинговером, аналогичным используемому в задаче коммивояжера.

**Ключевые слова:** оборудование с ЧПУ, оптимизация траектории, обработка излучением, генетические алгоритмы, задача коммивояжера, высокоскоростная обработка

**Введение.** В современном приборостроительном производстве широко используется технологическое оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ). В последнее время актуальность приобретают новые типы установок, такие как трехмерные принтеры, трехмерные сканеры, системы роботизированной сборки и монтажа, лазерные гравировщики, маркировщики, а также гибридные и адаптивные технологические системы [1].

Проектирование и разработка алгоритмов функционирования контроллеров с ЧПУ включает в себя комплекс задач, основная из которых — минимизация времени обработки поверхности объекта с учетом возможностей программного и аппаратного обеспечения установки, а также механических характеристик используемых электроприводов [2, 3].

Отметим, что любое технологическое оборудование с ЧПУ имеет в своем составе исполнительный механизм, осуществляющий движение определенного инструмента по заданной траектории. Очевидно, что производительность оборудования (время обработки) зависит от правильности выбора траектории и скорости движения исполнительного механизма.

**Экспериментальная установка для лазерной обработки.** Рассмотрим основные способы минимизации времени обработки поверхности объекта на примере работы установки, предназначенной для селективного отверждения фотополимера.

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой устройство для обработки лазерным излучением поверхностей произвольной формы. В состав установки входят неподвижный

рабочий стол для размещения обрабатываемого объекта, лазерная головка (каретка), размещенная над рабочим столом с возможностью перемещения в горизонтальной плоскости по двум координатам, а также источник лазерного излучения, оптически связанный с лазерной головкой [4—6].

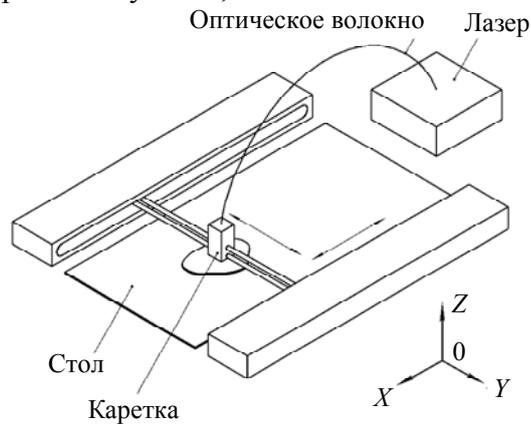


Рис. 1

Был проведен ряд экспериментов, для которых в качестве заготовки использовался листовый материал с нанесенным слоем фотополимера. Согласно результатам экспериментов, даже при использовании источника излучения небольшой мощности (в частности, твердотельного лазера с длиной волны 405 нм и оптической мощностью 500 мВт) скорость перемещения лазерной головки оказывает лишь незначительное влияние на качество отверждения фотополимера.

На рис. 2 представлен один из образцов. В данном эксперименте использовался лист из фольгированного стеклотекстолита марки СТФ с нанесенным на него жидким позитивным фоторезистом POSITIV20. После засветки фоторезиста заготовка была проявлена в растворе каустической соды с концентрацией 1 %, после чего помещена в раствор хлорного железа для удаления меди с незасвеченных участков.

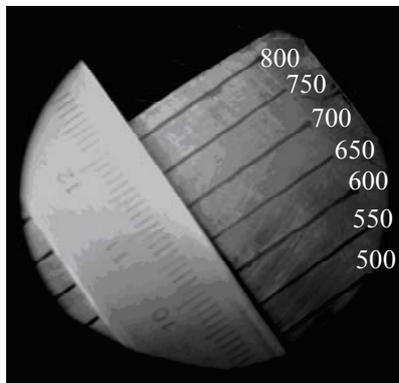


Рис. 2

При скорости перемещения каретки в диапазоне от 500 до 800 мм/мин наблюдается практически идентичная ширина линий, являющихся следом, оставляемым сфокусированным лазерным лучом (см. рис. 2). Это дает возможность предположить, что дальнейшее повышение скорости каретки позволит, при сохранении необходимой для нормального отверждения фоторезиста плотности излучения, значительно повысить скорость обработки поверхности. Таким образом, селективное отверждение фотополимера может быть отнесено к технологиям высокопроизводительной обработки, из чего следует необходимость оптимизации траектории движения исполнительного механизма для получения максимальной скорости обработки.

**Оптимизация траектории в режиме реального времени.** Траектория движения исполнительного устройства представляет собой последовательность узловых точек, расположенных по контуру обработки. Перемещение от точки к точке происходит дискретно, контроллер с ЧПУ самостоятельно определяет траекторию между ними посредством интерполяции.

Первая задача оптимизации — достижение максимальной контурной скорости. Как известно, любая программа для оборудования с ЧПУ задается в виде последовательности команд, большая часть которых относится к определению местоположения инструмента. Таким образом, можно сказать, что траектория движения инструмента представляет собой последовательность сегментов. Как правило, в оборудовании с ЧПУ реализована линейная и круговая интерполяция, следовательно, сегментами являются отрезки прямых и дуги. Для каждой команды (кадра) задается минутная подача, причем стандартом (ГОСТ 20999-83) не предписано, что установка с ЧПУ должна разогнаться до заданной скорости на указанном в кадре отрезке траектории.

Зачастую в силу особенностей конструкции двигателя не может достичь контурной скорости, требуемой параметром минутной подачи. Это связано с тем, что ни один двигатель не может стартовать с достаточно большой скоростью, обеспечивая при этом приемлемый момент. Для любого типа электродвигателей, применяемых при проектировании оборудования с ЧПУ, существует определенная зависимость изменения скорости от времени, иначе называемая кривой разгона-торможения. Как правило, эта зависимость имеет вид трапеции, т.е. в начале движения происходит линейный разгон до требуемой скорости, затем исполнительный механизм движется с постоянной скоростью, после чего происходит линейное торможение.

Проблема заключается в том, что параметр подачи никак не связан с длиной отрезка траектории, заданной в кадре, поэтому на коротких сегментах траектории трапециевидная кривая разгона вырождается в треугольную, когда после разгона сразу начинается торможение. Заданная скорость при этом может быть еще не достигнута. Очевидно, что при покадровой обработке траектории, состоящей из множества коротких сегментов, исполнительный механизм движется рывками, что вызывает вибрацию и повышенный износ двигателей и других движущихся частей устройства [7].

Предлагается следующий подход к оптимизации траектории исполнительного механизма на этапе предварительного анализа управляющей программы контроллером с ЧПУ.

1. Отказ от трапециевидной кривой разгона-торможения в пользу S-образной. По результатам проведенных исследований сделан вывод, что подобная траектория позволяет оптимизировать не только вторую производную координаты по времени (ускорение), но и третью — рывок. Благодаря наличию контролируемого рывка можно более гибко управлять параметрами разгона и торможения на коротких отрезках, а также снизить нагрузку на механические части оборудования [8, 9].

2. Реализация алгоритма двухэтапного анализа управляющей программы. На первом этапе оцениваются общие характеристики траектории, такие как длина сегментов и минутная подача на каждом из них, после чего вся траектория разбивается на равные фрагменты. На втором этапе создается буфер команд, куда записываются фрагменты, для которых необходимо рассчитать параметры кривых разгона-торможения с учетом их сопряжения. Размер буфера переменный и зависит от максимальной скорости исполнительного механизма, заданной в управляющей программе. Таким образом, в буфер будет помещено такое количество фрагментов, что после обработки всех необходимых параметров движения исполнительный механизм сможет остановиться в штатном режиме (т.е. без превышения максимальных для установки значений ускорения и рывка). Подобный подход позволит исполнительному механизму плавно разгоняться или тормозить на протяжении нескольких участков траектории для достижения заданной контурной скорости.

**Оптимизация траектории на этапе подготовки управляющей программы.** Помимо оптимизации траектории движения в реальном масштабе времени, важной задачей является ее уточнение на этапе разработки управляющей программы. Здесь можно выделить три подхода, которые могут быть применены для сокращения времени обработки:

— поиск наиболее продолжительного непрерывного участка траектории без острых углов, на котором каретка стола успеет разогнаться до максимально возможной скорости с учетом ограничений максимальных ускорения и рывка;

— минимизация длины вспомогательных ходов, когда каретка движется при выключенном источнике излучения;

— комбинация первых двух подходов с учетом того, что время включения и выключения источника лазерного излучения рассматриваемой установки крайне мало [4].

Предлагается следующая реализация изложенных подходов. Вначале на область обработки, ограниченную некоторой площадью, накладывается координатная сетка с определенным шагом разбиения. Траектория, заданная координатами узлов и множеством ребер, разбивается на сегменты. Составляется список пронумерованных сегментов, каждый из которых содержит информацию о направлении движения. Последовательность сегментов в списке определяет траекторию их обхода. Общее время, затрачиваемое на прохождение траектории движения, определяется временем, затрачиваемым на прохождение всех сегментов (когда лазер включен) и временем вспомогательных ходов, которые по определению выполняются на максимально допустимой скорости (рис. 3).

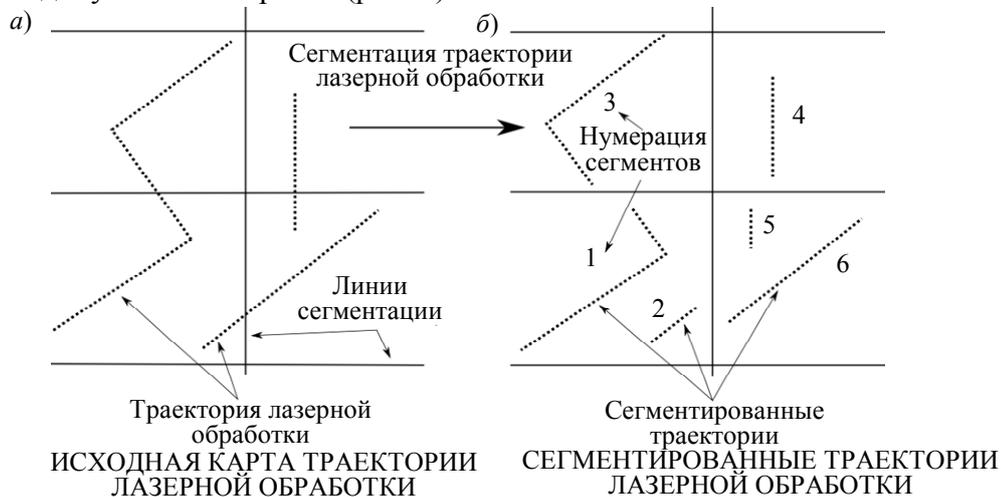


Рис. 3

Каждый сегмент может быть представлен следующим образом (см. рис. 3, а):

$$S_{(j)} \stackrel{\text{def}}{=} \langle x_a, y_a, x_b, y_b, d, i, l, v, t \rangle, j = \overline{1, n},$$

где  $n$  — число сегментов;  $x_a, y_a, x_b, y_b$  — координаты начала и конца сегмента (точки  $a$  и  $b$ ) соответственно;  $d$  — направление прохождения сегмента кареткой;  $i$  — номер сегмента в очереди обработки;  $l$  — длина сегмента;  $v$  — скорость прохождения сегмента;  $t$  — время, затрачиваемое на прохождение сегмента.

Список сегментов полностью определяет траекторию обработки (см. рис. 3, б):

$$\text{List} \stackrel{\text{def}}{=} S_{(r,p)}, r, p \in \overline{1, m},$$

где  $m$  — число сегментов,  $r$  — номер (идентификатор) сегмента,  $p$  — номер сегмента в списке, задающий очередь обработки; тогда время, затрачиваемое на обработку,

$$T = T_p + T_{\text{общ}},$$

где  $T_p$  — время, затрачиваемое на обработку (рабочие ходы);  $T_{\text{общ}}$  — общее время, затрачиваемое на прохождение каретки от одного сегмента к другому, плюс время, необходимое для подхода к первому сегменту и от него к базе (вспомогательные ходы).

Учитывая, что двигатели перемещения каретки по осям  $X$  и  $Y$  могут работать независимо, время вспомогательного хода между двумя рабочими ходами пропорционально максимальному приращению по осям:

$$T_{\text{общ}(r)} = k \max(|x_a - x_b|, |y_a - y_b|).$$

Общее время вспомогательных ходов в процессе обработки

$$T_{\text{общ}} = \sum_r T_{\text{общ}(r)}, r \in \overline{1, m}.$$

*Генетический алгоритм.* Задача минимизации времени обработки может быть решена с использованием генетических алгоритмов [10]. Хромосома будет состоять из генов, описывающих последовательность прохождения сегментов и их ориентацию (рис. 4).

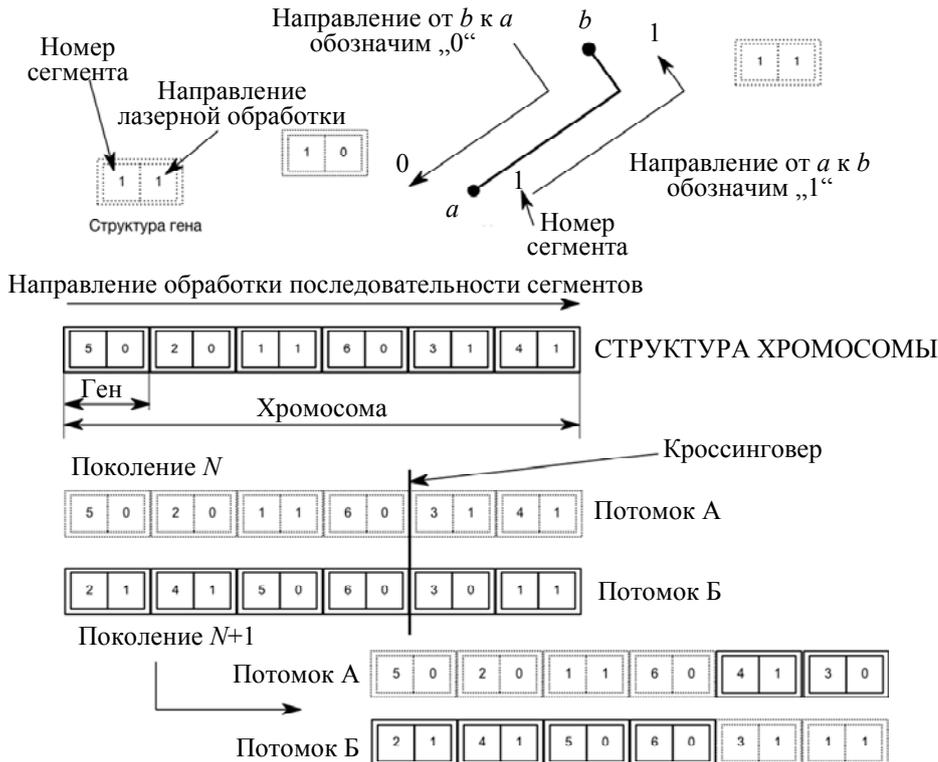


Рис. 4

Кроссинговер во многом похож на кроссинговер, используемый в генетическом алгоритме, применяемом для решения задачи коммивояжера. Такая аналогия позволяет предположить эффективность применения данного способа для решения задачи оптимизации траектории движения при обработке поверхностей объектов лазерным излучением. Для повышения эффективности алгоритма можно применить эвристику, заключающуюся в изменении ориентации соседнего сегмента таким образом, что расстояние между концами сегмента, а следовательно, и длина вспомогательного хода будут минимальными.

Также возможно применение эвристического метода последовательного улучшения прототипа, объединенного с методом глобального адаптивного случайного поиска, предложенного проф. Ю. А. Сушковым (СПбГУ) [11]. Сначала случайным образом генерируется множество решений, из которых выбираются  $n$  наилучших. Далее эти решения модифицируются путем перестановок. Из полученных решений вновь выбираются  $n$  наилучших, причем от итерации к итерации диапазон (расстояние Хэмминга) сокращается. После заданного числа итераций для каждого из решений запускается процесс совершенствования прототипа.

**Заключение.** Исследованы подходы к оптимизации траектории движения исполнительного механизма технологического оборудования с ЧПУ, осуществляющего обработку поверхности объекта лазерным излучением. В качестве основного критерия оптимизации выбрано время обра-

ботки. Предложены два основных подхода к минимизации времени: увеличение скорости обработки за счет плавного совмещения кривых разгона-торможения исполнительного механизма и сокращение протяженности вспомогательных технологических ходов. Согласно результатам экспериментов, значительное сокращение времени обработки возможно, если контроллер с ЧПУ будет осуществлять предварительную выборку отрезков траектории в буфер команд и будет разгоняться или тормозить на протяжении нескольких последовательных участков (отрезков). Для сокращения протяженности вспомогательных ходов был разработан генетический алгоритм, аналогичный используемому в решении задачи коммивояжера с измененной эвристикой.

Предложенные методы оптимизации траектории движения исполнительного механизма позволят уменьшить время обработки и повысить производительность технологического оборудования.

В настоящее время осуществляется отладка параметров оптимизации на экспериментальной установке, а также реализация предложенных алгоритмов в виде универсальной программной библиотеки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев М. Я., Грибовский А. А.* Концепция адаптивной платформы технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 268—272. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-268-272.
2. *Zhang Qiang, Li Shu-Rong.* Efficient computation of smooth minimum time trajectory for CNC machining // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 68, N 1. P. 683—692. DOI: 10.1007/s00170-013-4790-7.
3. *Zhang L., Sun R., Gao Xi., Li H.* High speed interpolation for micro-line trajectory and adaptive real-time look-ahead scheme in CNC machining // Sci. China Technol. Sci. 2011. Vol. 54, N 6. P. 1481—1495. DOI: 10.1007/s11431-011-4329-9.
4. *Afanasyev M. Y., Fedosov Y. V., Nemkova A. A.* Designing features of power optical units for technological equipment // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2015. Vol. 16, N 2 (102). P. 244—250. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-244-250.
5. Пат. 161667 РФ. Устройство для обработки лазерным излучением поверхности произвольной формы / *М. Я. Афанасьев, Ю. В. Федосов* // Оpubл. 27.04.2016. Бюл. № 12.
6. Пат. 2583163 РФ. Оптико-механическая система / *М. Я. Афанасьев, Ю. В. Федосов* // Оpubл. 10.05.2016. Бюл. № 13.
7. *Lin Wang, Jianfu Cao.* A look-ahead and adaptive speed control algorithm for high-speed CNC equipment // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 63, N 5. P. 705—717. DOI: 10.1007/s00170-012-3924-7.
8. *Lin Wang, Jianfu F. Cao, Yuqiang Q. Li.* Speed optimization control method of smooth motion for high-speed CNC machine tools // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. Vol. 49, N 1. P. 313—325. DOI: 10.1007/s00170-009-2383-2.
9. *Shujie Sun, Hu Lin, Liaomo Zheng, Jingang Yu, Yi Hu.* A real-time and look-ahead interpolation methodology with dynamic B-spline // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 84, N 5. P. 1359—1370. DOI: 10.1007/s00170-015-7776-9.
10. *Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М.* Генетические алгоритмы: Учеб. пособие. М.: Физматлит, 2006. С. 320.
11. *Сушков Ю. А.* Метод, алгоритм и программа случайного поиска. Л.: ВНИИТрансМаш. 1969. 43 с.

#### Сведения об авторах

- Сергей Викторович Акимов** — канд. техн. наук, доцент; СПбГУТ; кафедра автоматизации предприятий связи; E-mail: akimov-sv@yandex.ru
- Максим Яковлевич Афанасьев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: amax@niuitmo.ru
- Юрий Валерьевич Федосов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: yf01@yandex.ru

**Ссылка для цитирования:** Акимов С. В., Афанасьев М. Я., Федосов Ю. В. Оптимизация траектории движения исполнительного устройства оборудования с ЧПУ при лазерной обработке поверхности объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 1. С. 68—74.

## OPTIMIZATION OF ACTUATOR TRAJECTORY FOR CNC EQUIPMENT IN LASER SURFACE TREATMENT OF OBJECTS

S. V. Akimov<sup>1</sup>, M. Ya. Afanasyev<sup>2</sup>, Yu. V. Fedosov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications,  
193232, St. Petersburg, Russia*

<sup>2</sup> *ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: amax@niuitmo.ru*

Approaches to the problem of optimization of executive tool trajectory in CNC equipment used for laser treatment of complex-shaped surfaces are considered. Time of processing is used as the main optimization criteria. Two principal time shortening methods are proposed — by increasing in processing speed using smooth aliasing of acceleration/deceleration curves, and by minimizing the quantity of auxiliary passes. A genetic algorithm with crossover (similar to the one used to solve the traveling salesman problem) is proposed to reduce the number of auxiliary paths.

**Keywords:** CNC tool, trajectory optimization, laser processing, genetic algorithms, traveling salesman problem, hi-speed processing

### Data on authors

- |                            |   |  |
|----------------------------|---|--|
| <b>Sergey V. Akimov</b>    | — | PhD, Associate Professor; Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, Department of Automation of Communication Enterprises; E-mail: akimov-sv@yandex.ru |
| <b>Maxim Ya. Afanasyev</b> | — | PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: amax@niuitmo.ru   |
| <b>Yuriy V. Fedosov</b>    | — | PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: yf01@yandex.ru  |

**For citation:** Akimov S. V., Afanasyev M. Ya., Fedosov Yu. V. Optimization of actuator trajectory for CNC equipment in laser surface treatment of objects // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2017. Vol. 60, N 1. P. 68—74 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-68-74