

УДК 535.214.6

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ КООРДИНАТНЫХ ОСЕЙ МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ СКОРОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Белый Вячеслав Сергеевич,

кандидат технических наук,

доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева», г. Москва, el.belaya2015@yandex.ru

Аннотация

В настоящей научной статье предлагаются результаты исследования теоретической возможности технической и программной реализации процесса доработки существующих образцов многокоординатных машин, предназначенных для скоростной лазерной резки, путём модернизации входящих в их состав координатных столов за счёт установки дополнительных кинематических осей. В работе представлен алгоритм определения кинематических параметров движения дополнительных осей, которые предполагается включить в состав координатного стола многокоординатной машины скоростной лазерной резки в целях её модернизации путём проведения доработки.

Ключевые слова: лазерная резка, поверхность реза, зона термического влияния, координатный стол, скорость резки, лазерные технологии, многокоординатная машина, кинематическая ось.

PHYSICAL AND MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE ALGORITHM OF RELATIVE MOTION OF KINEMATIC COORDINATE AXES OF A MULTI- COORDINATE HIGH-SPEED LASER CUTTING MACHINE

Vyacheslav S. Bely,

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Physics of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow

ABSTRACT

This scientific article presents the results of a study of the theoretical feasibility of technical and software implementation of the process of refining existing samples of multi-coordinate machines designed for high-speed laser cutting by upgrading the coordinate tables included in them by installing additional kinematic axes. The paper presents an algorithm for determining the

kinematic parameters of the motion of additional axes, which are supposed to be included in the coordinate table of a multi-coordinate high-speed laser cutting machine in order to modernize it by refining.

Keywords: laser cutting, cutting surface, thermal effect zone, coordinate table, cutting speed, laser technology, multi-coordinate machine, kinematic axis.

Введение. Современные лазерные технологии требуют разработки всё более нового технологического оборудования, а также управляющего последним программного обеспечения. Современная многокоординатная машина скоростной лазерной резки (ЛР) представляет собой промышленный технологический комплекс, основными элементами которого являются координатный стол, лазер, контроллер и компьютер, обеспечивающий функционирование автоматизированной системы управления технологическим процессом [9, с. 45]. Динамические характеристики существующих в настоящее время промышленных технологических комплексов с одним массивным координатным столом не позволяют использовать все потенциальные возможности современных лазеров для создания высокоэффективных лазерных технологий. Лазер позволяет реализовывать высокие скорости процесса ЛР, но традиционная кинематическая схема установки не способна их обеспечить. Простые кинематические системы, где координатный стол имеет две степени свободы, не позволяют достигать требуемых высоких скоростей ЛР [10, с. 18-19]. При увеличении скорости ЛР с использованием простых систем значительно ухудшается качество выполнения деталей. В силу инерционности массивного координатного стола для обеспечения требуемых скоростей и ускорений в процессе обработки требуются мощные приводы двигателей. Кроме того, координатный стол установки не может быстро тормозить, что приводит к пережиганию поверхности обрабатываемого материала. Для увеличения скорости ЛР необходимо увеличивать мощность двигателей, а это обстоятельство ведет к увеличению массы и габаритных размеров установок. Увеличение массы установки приводит к резким возрастаниям колебаний координатного стола, что порождает новую серьёзную проблему предотвращения процессов возникновения вибраций установки при её технической реализации. Приведенные противоречия порождают научную проблему поиска альтернативного способа увеличения скорости ЛР. Для решения такой проблемы предлагается добавление в состав многокоординатной машины скоростной ЛР координатного стола с дополнительными кинематическими осями. Данная идея предопределяет, цель научной статьи – исследование теоретической возможности технической и программной реализации оговоренного выше проекта конструкторского решения. Данная цель достигается путём решения двух взаимосвязанных между собой научных задач:

1. Разработка алгоритма сглаживания траектории для синхронного управления основными и дополнительными кинематическими осями, обеспечивающий разложение сложного движения на основные и дополнительные оси;

2. Определение кинематических параметров движения дополнительных осей, которые предполагается включить в состав координатного стола многокоординатной машины скоростной лазерной резки.

Методическим инструментарием для проведения исследования являются положения и нормы, достаточно чётко и подробно описанные в [1, с. 582-591], [2, с. 64-76], [3, с. 443-451], а также в [4, с. 100-112]. Данная научная методика успешно реализована в трудах [5, с. 155-

166], [6, с. 138-148], [7, с. 443-451] и [8, с. 575-581] в ходе исследования различных процессов, в том числе и не имеющих тесной взаимосвязи с процессами скоростной ЛР.

Анализ состояния вопроса. ЛР, как механический процесс, характеризуется отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал. Как в процессе ЛР, так и после ее завершения, возникают минимальные деформации поверхности обрабатываемых материалов. Именно поэтому ЛР легкодеформируемых и нежестких заготовок и деталей осуществляется с высокой точностью. В настоящее время высокая производительность процесса ЛР с высоким качеством поверхностей реза обеспечивается за счёт высокой мощности современных источников лазерного излучения. При этом, всегда имеется возможность получения узких резов с минимальной зоной термического влияния. Простота процессов управления потоками лазерного излучения позволяет осуществлять процесс ЛР по сложным контурам плоских и объёмных объектов резки с высокой степенью автоматизации.

В работе [10, с. 47] предлагается алгоритм синхронного управления такой установкой и его программная реализация. Суть алгоритма состоит в разложении сложного движения на основные и дополнительные координатные оси. В итоге обеспечивается суммарное результирующее движение источника лазерного излучения вдоль траектории с постоянной контурной скоростью. Основное достоинство машины с дополнительными кинематическими осями заключается в возможности совершения локальных ускорений за счёт дополнительного координатного стола. В результате основной стол не испытывает резких ускорений, его движение практически прямолинейное и описывает основной контур заготовки. На сложных участках, где имеют место острые углы и (или) крутые дуги, в работу включается дополнительный стол, способный быстро проходить эти участки [11, с. 44-45].

В отличие от [11] в настоящей статье предложен новый алгоритм – алгоритм «сглаживания» траектории для синхронного управления основными и дополнительными кинематическими осями, обеспечивающий разложение сложного движения на основные и дополнительные оси.

Постановка задачи. Формально задачи разработки алгоритма «сглаживания» траектории для синхронного управления основными и дополнительными кинематическими осями, и определения кинематических параметров сложного движения основных и дополнительных осей сводится к определению скоростей $V_{I,i}$, $V_{II,i}$ и ускорений $a_{I,i}$, $a_{II,i}$ движения вышеуказанных осей после разделения траекторий их движения S на составляющие: для основного координатного стола S_1 и дополнительного S_2 . Определение значений искомых кинематических параметров осуществляется по известным значениям контурной скорости V_k движения оси и критического угла α между двумя соседними отрезками путём корректного использования математического аппарата, достаточно чётко и подробно изложенного в [13, с. 140-145] и [14, с. 152-155].

Алгоритм сглаживания траектории представляет собой последовательность действий, направленных на решение задачи повышения скорости ЛР. Исходными данными для определения параметров движения кинематических осей являются следующие величины и функции:

i – номер текущего участка траектории движения оси;

φ_i – длина участка траектории движения оси;

V_k – контурная скорость движения оси;

S – траектория движения кинематических осей.

α – критический угол между двумя соседними отрезками.

Требуется определить значения кинематических параметров в виде скоростей V_i и ускорений a_i движения дополнительно установленных координатных осей многокоординатной машины скоростной ЛР.

Алгоритм определения значений кинематических параметров движения координатных осей включает в себя следующую последовательность действий:

1. Предварительно производится кусочно-линейная аппроксимация траектории S . Для этого вся траектория S разбивается на n равных и последовательно соединенных отрезков длиной

$$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{i-1}, \quad (1)$$

которые можно описать двумя последовательностями их координат $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$.

2. На втором шаге вся траектория движения, представляющая собой результат кусочно-линейной аппроксимации траектории S , разделяется на две траектории: для основных S_1 и для дополнительных S_2 осей, таким образом, что результатом сложения этих двух траекторий является исходная траектория S , как показано на рисунке 1.

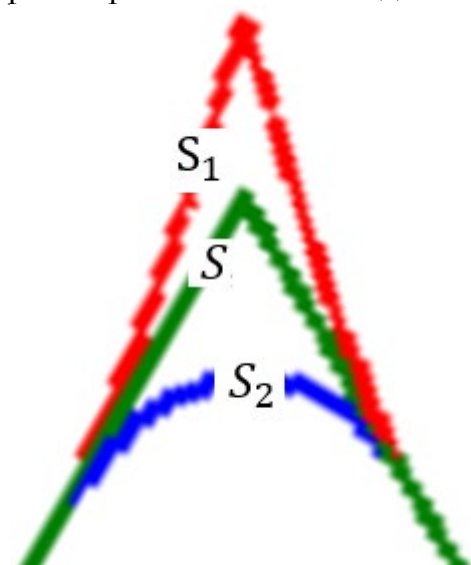


Рисунок 1 – Принцип разложения траектории S на составляющие

2.1. Для получения первой траектории S_1 используется следующий алгоритм. В цикле вычисляется угол α_i между двумя соседними отрезками траектории S

$$\alpha_i = \frac{(x_i - x_{i+1})(x_{i+1} - x_{i+2}) + (y_i - y_{i+1})(y_{i+1} - y_{i+2})}{\sqrt{[(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2] \cdot [(x_{i+2} - x_{i+1})^2 + (y_{i+2} - y_{i+1})^2]}}. \quad (2)$$

Если выполняется условие вида $\alpha_i < \alpha$, то вместо общей точки двух отрезков с координатами (x_{i+1}, y_{i+1}) подставляется точка с координатами (x_{i+1}^I, y_{i+1}^I) , лежащая на прямой, которой принадлежат две другие точки с координатами (x_i, y_i) и (x_{i+2}, y_{i+2}) соответственно. Значения координат x_{i+1}^I и y_{i+1}^I определяются с помощью выражений вида

$$x_{i+1}^I = x_i + \frac{x_i + (x_{i+2} - x_i)}{2}, \quad (3)$$

$$y_{i+1}^I = y_i + \frac{y_i + (y_{i+2} - y_i)}{2}. \quad (4)$$

Угол α_i связан с показателем степени сглаживания траектории, который принимает значения от 0 до 1.

Для обеспечения более высокой точности обработки необходимо уменьшать шаг разбиения при кусочно-линейной аппроксимации исходной траектории S . Это приводит к увеличению значения угла α_i , поэтому для обеспечения приемлемого сглаживания для заданной точности цикл отступает на шаг назад с целью проверки критерия вида $\alpha_{i-1} < \alpha$ для новообразованного угла α_{i-1} .

Если выполняется условие вида $\alpha_i \geq \alpha$, то $x_{i+1}^I = x_i$, $y_{i+1}^I = y_i$, т.е. точка остается прежней. Таким образом, получается первая траектория S_1 , которая представляется последовательностями координат её отрезков. Графически она выглядит сглаженным плавным контуром с большими радиусами кривизны.

2.2. Для получения второй траектории S_2 сначала представляются все отрезки полученной первой S_1 и исходной S траектории последовательно соединенными векторами, направление которых совпадает с направлением обхода контура. Далее из i -го вектора траектории S вычитается i -й вектор траектории S_1 . Получившееся множество последовательно соединенных векторов представляет собой вторую траекторию S_2 , которую также можно описать последовательностями координат $\{x_i^2\}$ и $\{y_i^2\}$. На рисунке 1 синим цветом отображается траектория движения основных осей S_1 , красным – дополнительных S_2 , зеленым – результирующее движение по траектории S .

3. После получения S_1 и S_2 находятся кинематические параметры для каждого из отрезков траекторий S_1 и S_2 . Начальная скорость движения для обеих траекторий определяется из формулы

$$V_0 = \frac{V_k}{2}. \quad (5)$$

3.1. Для нахождения скоростей на каждом шаге необходимо для начала ввести весовые коэффициенты каждого отрезка S_1 и S_2 . В исходной аппроксимации S все отрезки имеют равную длину, т.е. каждому из них можно придать весовой коэффициент, равный значению 0,5. После «сглаживания» некоторые отрезки S_1 и S_2 меняют значения своих весовых коэффициентов: S_1 в меньшую сторону (от 0 до 0,5), а S_2 в большую (от 0,5 до 1). Определяются эти весовые коэффициенты из формул

$$k_i^I = \frac{h_i^I}{h_i^I + h_i^{II}}, \quad k_i^{II} = \frac{h_i^{II}}{h_i^I + h_i^{II}}, \quad (6)$$

где h_i^I, h_i^{II} – длины i -х отрезков траекторий S_1 и S_2 .

Тогда скорости обеих траекторий на i -м шаге

$$V_{I,i} = 2 \cdot V_0 \cdot k_i^I, \quad V_{II,i} = 2 \cdot V_0 \cdot k_i^{II}. \quad (7)$$

3.2. Время на i -м шаге определяется по формуле

$$t_i = t_{i-1} + \frac{h_i^I}{V_{I,i}}. \quad (8)$$

3.3. Ускорения определяются соотношениями вида

$$a_{I,i} = \frac{V_{I,i} - V_{I,i-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad a_{II,i} = \frac{V_{II,i} - V_{II,i-1}}{t_i - t_{i-1}}. \quad (9)$$

Предложенный алгоритм является достаточно простым и вполне может быть программно реализуем.

Выводы: Таким образом, цель исследования достигнута путём решения двух взаимосвязанных между собой научных задач:

1. Разработан алгоритм сглаживания траектории для синхронного управления основными и дополнительными кинематическими осями многокоординатной машины, обеспечивающий разложение сложного движения на основные и дополнительные оси;

2. Определены выражения для расчёта значений кинематических параметров движения дополнительных осей, которые предполагается включить в состав координатного стола многокоординатной машины скоростной лазерной резки.

Предложенный алгоритм является простым и может быть программно реализуем. Теория предложенного метода решения задачи достаточно чётко и подробно описана в [13, с. 5-52] и [14, с. 617-621].

Список литературы:

1. Белый, В.С. Исследование процессов прохождения видимого излучения через оптическую систему на базе тонкой собирающей линзы / В. С. Белый, С. С. Воробьев // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 3. – С. 582-591;
2. Белый, В. С. Теоретические аспекты обнаружения микроорганизмов методами активной или полуактивной оптической локализации с использованием критерия максимума правдоподобия / В. С. Белый, Д. Д. Бабаев // Оригинальные исследования. – 2022. – Т. 12. – № 8. – С. 64-76. – EDN PPIVIN;
3. Белый, В.С. Исследование явления внешнего фотоэффекта при взаимодействии видимого излучения с плоской металлической равномерно заряженной цинковой пластиной / В.С. Белый, Д.Д. Бабаев // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – С. 443-451;
4. Белый, В. С. Теоретические аспекты обнаружения микроорганизмов методами активной или полуактивной оптической локализации с использованием критерия Неймана-Пирсона / В. С. Белый, Д. Д. Бабаев // Оригинальные исследования. – 2022. – Т. 12. – № 7. – С. 100-112. – EDN XVPHXC;
5. Белый, В. С. Особенности спектрального анализа пробы вещества с использованием низкотемпературной плазмы / В. С. Белый, Т. Н. Зайцева, А. В. Туранова // Обществознание и социальная психология. – 2022. – № 6(36). – С. 155-166. – EDN OFASJB;
6. Белый, В. С. Математическое моделирование распределения Больцмана в процессе получения низкотемпературной плазмы / В. С. Белый, Т. Н. Зайцева, А. В. Туранова // Обществознание и социальная психология. – 2022. – № 6(36). – С. 138-148. – EDN DKEKDC;
7. Белый, В. С. Исследование явления внешнего фотоэффекта при взаимодействии видимого излучения с плоской металлической равномерно заряженной цинковой пластиной / В. С. Белый, Д. Д. Бабаев // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – С. 443-451. – EDN VGJYIP;
8. Белый, В. С. Внешний фотоэффект при взаимодействии ультрафиолетового излучения с плоской металлической равномерно заряженной цинковой пластиной / В. С. Белый, С. С. Воробьев // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 3. – С. 575-581. – EDN KBLQGF;
9. Бруннер В. Справочник по лазерной технике: Пер. с нем. С74 М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 253-254;
10. Кондратенко В.С., Борисовский В.Е., Гиндин П.Д., Наумов А.С. Новые технологии лазерной обработки деталей оптического приборостроения // Приборы. 2008. – № 3. – С. 46-49;
11. Кондратенко В.С., Третьякова О.Н., Наумов А.С., Шевченко Г.Ю., Зобов А.К. Новые методы и средства управления промышленным оборудованием на базе технологии лазерного управляемого термораскалывания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. – №6. – С. 43-46;
12. Савельев И.В. Основы теоретической физики. Т.1. Механика и электродинамика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – С. 153-234;

13. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики: Учебник для вузов / С. М. Тарг. – 11-е изд., исправленное – М.: Высшая школа, 1995. – С. 148-151;
14. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техническим специальностям / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – 7-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 1998. – С. 117-121.

References:

1. Bely, V.S. Investigation of the processes of visible radiation passing through an optical system based on a thin collecting lens / V. S. Bely, S. S. Vorobyov // Issues of sustainable development of society. – 2022. – No. 3. – pp. 582-591;
2. Bely, V. S. Theoretical aspects of detection of microorganisms by methods of active or semi-active optical location using the maximum likelihood criterion / V. S. Bely, D. D. Babaev // Original research. – 2022. – Vol. 12. – No. 8. – PP. 64-76. – EDN PPIVIN;
3. Bely, V.S. Investigation of the phenomenon of an external photoelectric effect in the interaction of visible radiation with a flat metal uniformly charged zinc plate / V.S. Bely, D.D. Babaev // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – Pp. 443-451;
4. Bely, V. S. Theoretical aspects of detection of microorganisms by methods of active or semi-active optical location using the Neumann-Pearson criterion / V. S. Bely, D. D. Babaev // Original research. – 2022. – Vol. 12. – No. 7. – pp. 100-112. – EDN XVPHXC;
5. Bely, V. S. Features of spectral analysis of a substance sample using low-temperature plasma / V. S. Bely, T. N. Zaitseva, A.V. Turanova // Social studies and social psychology. – 2022. – № 6(36). – Pp. 155-166. – EDN OFASJB;
6. Bely, V. S. Mathematical modeling of Boltzmann distribution in the process of obtaining low-temperature plasma / V. S. Bely, T. N. Zaitseva, A.V. Turanova // Social studies and social psychology. – 2022. – № 6(36). – Pp. 138-148. – EDN DKEKDC;
7. Bely, V. S. Investigation of the phenomenon of an external photoelectric effect in the interaction of visible radiation with a flat metal uniformly charged zinc plate / V. S. Bely, D. D. Babaev // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – Pp. 443-451. – EDN BGJYIP;
8. Bely, V. S. External photoelectric effect in the interaction of ultraviolet radiation with a flat metal uniformly charged zinc plate / V. S. Bely, S. S. Vorobyev // Issues of sustainable development of society. – 2022. – No. 3. – PP. 575-581. – EDN KBLQGF;
9. Brunner V. Handbook of laser technology: Trans. from it. С74 М.: Energoatomizdat, 1991. – pp. 253-254;
10. Kondratenko V.S., Borisovsky V.E., Gindin P.D., Naumov A.S. New technologies of laser processing of optical instrument-making parts // Instruments. 2008. – No. 3. – pp. 46-49;
11. Kondratenko V.S., Tretyakova O.N., Naumov A.S., Shevchenko G.Yu., Zobov A.K. New methods and controls of industrial equipment based on laser controlled thermal cracking technology // Mechatronics, automation, control. 2014. – No. 6. – pp. 43-46;
12. Savelyev I.V. Fundamentals of theoretical physics. Vol. 1. Mechanics and electrodynamics. – М.: Nauka. Gl. ed. phys.-mat. lit., 1991. – pp. 153-234;
13. Targ, S. M. A short course in theoretical mechanics: A textbook for higher education institutions / S. M. Targ. – 11th ed., revised - М.: Higher School, 1995. – pp. 148-151;

14. Yablonsky, A. A. Course of theoretical mechanics: Textbook for university students studying in technical specialties / A. A. Yablonsky, V. M. Nikiforova. - 7th ed., revised. - St. Petersburg: Lan, 1998. - pp. 117-121.