

УДК 621.785.53

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-700-707

Для цитирования: Метод автоматизации перемещения плазмотрона шестиосным роботом-манипулятором / А. С. Калашников, М. С. Руденко, А. Д. Кучеренко и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 700–707. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-700-707.

For citation: Kalashnikov A. S., Rudenko M. S., Kucherenko A. D., Girn A. V., Mikheev A. E. The method of the automation of the plasmotron movement by six-axis robotic manipulator. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 700–707. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-700-707.

Метод автоматизации перемещения плазмотрона шестиосным роботом-манипулятором

А. С. Калашников*, М. С. Руденко, А. Д. Кучеренко, А. В. Гирн, А. Е. Михеев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: fangy.ko@gmail.com

В статье приставлен метод автоматизации создания траекторий движения плазмотрона шестиосным роботом-манипулятором. Система автоматизации создавалась на базе промышленного робота компании KUKA. Автоматизация создания траекторий движения плазмотрона над поверхностью детали реализована следующим образом: создается траектория движения плазмотрона в графическом редакторе в формате .dwg. Созданный файл загружается в САМ-программу для станков с ЧПУ. САМ-программа преобразует вектор или область, заданную векторами, в управляющую команду в g-code формате, которая затем преобразуется в KRL программой, написанной на языке программирования Python. Разработка программы состояла из двух этапов: создание прямолинейных движений и создание криволинейных движений. Представлен результат работы метода.

Ключевые слова: плазменное напыление, промышленный робот, Python, автоматизация.

The method of the automation of the plasmotron movement by six-axis robotic manipulator

A. S. Kalashnikov*, M. S. Rudenko, A. D. Kucherenko, A. V. Girn, A. E. Mikheev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: fangy.ko@gmail.com

The article presents a method for automating the creation of trajectories of the plasmotron motion by a six-axis robotic manipulator. The automation system was created on the basis of an industrial robot from KUKA. The automation of the creation of trajectories of the plasmotron over the surface of the part is implemented as follows: the trajectory of the plasmotron is created in a graphic editor in the .dwg format. The created file is loaded into the CAM program for CNC machines. A CAM program converts a vector or an area specified by vectors into a control command in g-code format, which is then converted to KRL by a program written in the Python programming language. The development of the program consisted of two

stages: the creation of rectilinear movements and the creation of curvilinear movements. The result of the method is presented.

Keywords: plasma spraying, industrial robot, Python, automation.

Введение

В аэрокосмической, металлургической, нефтедобывающей промышленности с каждым годом повышаются требования по безопасности, надёжности и долговечности изделий при эксплуатации в экстремальных условиях (воздействие высоких температур, динамических нагрузок, коррозионных сред и т. д.). Для обеспечения этих требований возникает необходимость наносить на изделия защитные покрытия. Одним из способов нанесения защитных покрытий является плазменное напыление, которое широко используют в аэрокосмической технике [1–4].

С каждым годом количество изделий, используемых в ракетно-космической технике, растёт, усложняются их форма и размеры [5–8]. В связи с этим способы нанесения плазменных покрытий становятся практически невыполнимыми. Рабочим органом для нанесения покрытий является плазматрон [9–10]. В плазматроне создается струя низкотемпературной плазмы, в которую подается порошок материала покрытия, порошок расплавляется под воздействием температуры плазмы и наносится на подложку-изделие. Однако для получения покрытия плазматрон необходимо перемещать над поверхностью подложки по определённой траектории и с определённой скоростью. Для этого плазматрон размещают на роботе-манипуляторе, который обеспечивает его движение.

На рынке представлено большое количество промышленных роботов-манипуляторов, которые могут передвигать плазматрон в процессе напыления, например роботы компаний KUKA, Doosan ROBOTICS, ABB и др. [11–13]. Робот-манипулятор представляет собой шестиосевой промышленный механизм с приводами и редукторами. На установочном фланце оси A6 устанавливается плазматрон (рис. 1).

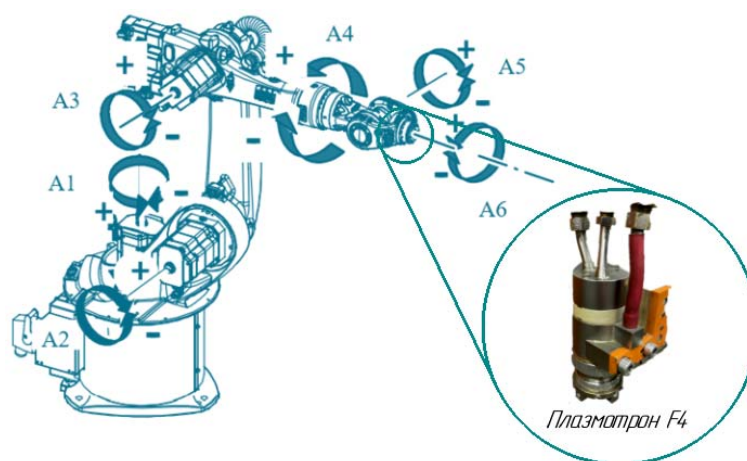


Рис. 1. Оси шестиосного промышленного робота-манипулятора и возможность их передвижения

Fig. 1. Axes of a six-axis industrial robotic arm and the possibility of their movement

Существуют плазматроны, которые способны наносить покрытие в сложно достижимые места [14], но без программы автоматизации движения плазматрона их эффективность падает. Компании-производители промышленных роботов предоставляют платные программные обеспечения для создания управляющих программ, возможности функционала которых чрезмерны для передвижения плазматрона во время нанесения покрытия. Приобретение таких программ-

ных обеспечений не целесообразно, однако программирование траекторий в ручном режиме является трудоемким. Поэтому задача разработки метода автоматического управления передвижения плазматрона промышленным роботом является актуальной.

Система автоматизации процесса управления передвижения разрабатывалась для промышленного робота серии KUKA KR16-2, стоит отметить, что метод может работать и с другими версиями промышленных роботов. В случае перемещения плазматрона 6-осным роботом KUKA, управление им обеспечивается с переносного программирующего устройства – пульта управления KUKA smartPAD. Роботы-манипуляторы компании KUKA программируются на языке KRL. Траектории движения плазматрона можно задавать следующими видами команд:

- движение Point-to-Point (PTP) – перемещение происходит вдоль быстрой траектории, которая, как правило, не является прямой линией. Из-за того, что оси робота совершают вращательные движения, нелинейные траектории выполняются быстрее линейных;
- линейное движение (LIN) – движение выполняется по прямой линии;
- круговое движение (CIRC) – движение по круговой траектории. Задаются вспомогательная (лежащая на траектории) и целевая точки;
- движения SPLINE – для сложных изогнутых траекторий [11].

Автоматизация создания траекторий обработки плоской поверхности реализована следующим образом: создается траектория движения плазматрона в графическом редакторе в формате .dwg. Созданный файл загружается в САМ-программу для станков с ЧПУ. САМ-программа преобразует вектор или область, заданную векторами, в управляющую команду в g-code формате, которая затем преобразуется в KRL программой, написанной на языке программирования Python.

Для этого требуется создать программу на пульте управления KUKA smartPAD. Установить начальную точку и сохранить её. Программа на пульте управления сохраняется в двух файлах. В первом файле формата .src хранится код программы, а во втором файле формата .dat хранятся координаты точек, углы поворота осей и другие необходимые параметры.

Разработанная нами программа на языке Python производит синтаксический анализ файлов с пульта управления KUKA smartPAD и файла траектории в g-code формате с САМ-программы с помощью регулярных выражений, используя модуль re [15]. Затем программа формирует файл с управляющей траекторией, дополняя код программы в файле с форматом .src. Данный файл загружается на пульт управления KUKA smartPAD.

Алгоритм действий создания управляющей программы представлен в блок-схеме на рис. 2.

Созданная программа преобразует g-code формат в KRL в движение LIN, что было реализовано на первом этапе разработки метода. Далее расстояние между точками траектории анализируется и определяется, лежат они на прямолинейном или криволинейном участке, что было реализовано на втором этапе разработки.

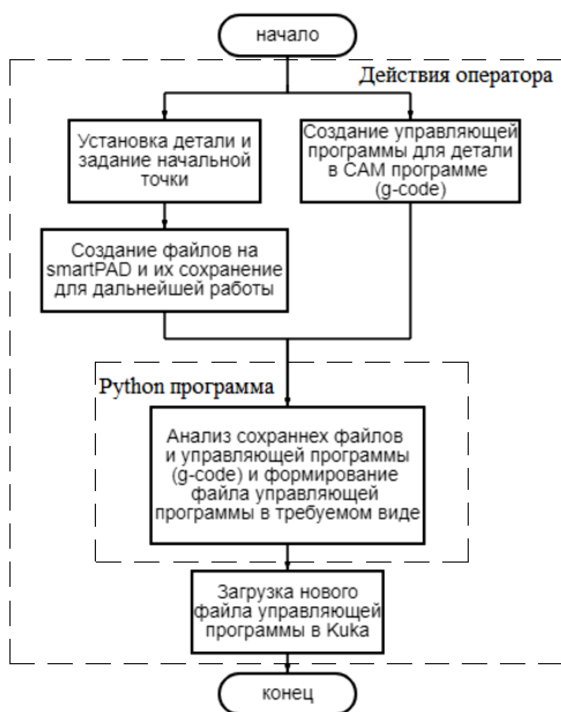


Рис. 2. Блок-схема автоматизированного алгоритма создания управляющей программы

Fig. 2. The flowgraph of an automated algorithm for creating a control program

Первый этап

На первом этапе реализовано создание прямолинейных траекторий (движение LIN), что необходимо и достаточно для нанесения покрытия на прямоугольные участки поверхности детали.

В созданной траектории движения САМ программой начальная точка задается нулевыми координатами, для этого, как указано в блок-схеме, требуется задать начальную точку, по которой будут пересчитываться все точки траектории. Траектория в g-code формате представлена на рис. 3. Эти данные переводятся в формат KRL. Учитывается возможность наличия изменения координаты по одной оси. Лишние для нас данные, такие как обороты шпинделя и другие, игнорируются.

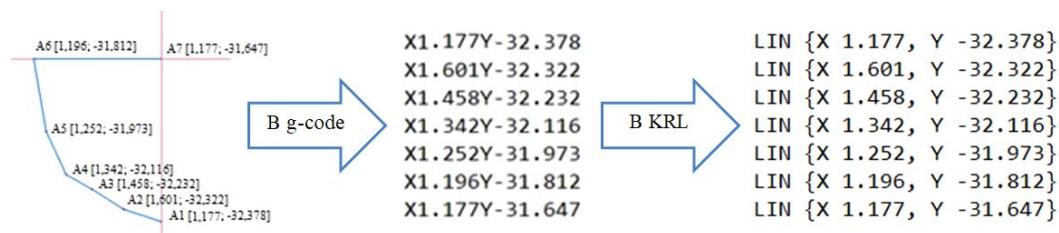


Рис. 3. Задание прямолинейного движения в управляющей программе в g-code формате и в KRL

Fig. 3. Specifying a rectilinear motion in the control program in g-code format and in KRL

Второй этап

На втором этапе оценены команды движения CIRC и SPLINE для кривых участков траекторий, так как использование LIN для этих целей приводит к долгому «зависанию» плазмотрона над одной областью, что нарушает расчетный режим напыления. Результаты оценки показали, что для поставленной задачи выгоднее использовать движение SPLINE, так как оно обеспечивает плавное движение с заданной скоростью без «зависаний», в отличие от CIRC.

Алгоритм реализации с движением SPLINE основан на программе первого этапа с дальнейшим анализом точек траектории. Кривую линию САМ-программа делит на множество точек, соответственно, оценивая расстояние между двумя соседними точками по формуле $r_n = \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}$, можно определить, лежат они на прямой или кривой линии и, в соответствии, с этим изменить команду линейного движения на SPLINE.

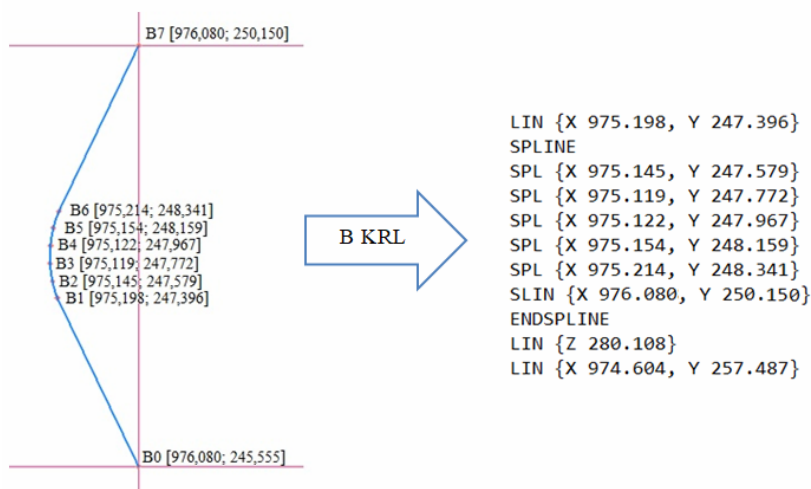


Рис. 4. Задание криволинейного движения в управляющей программе (KRL)

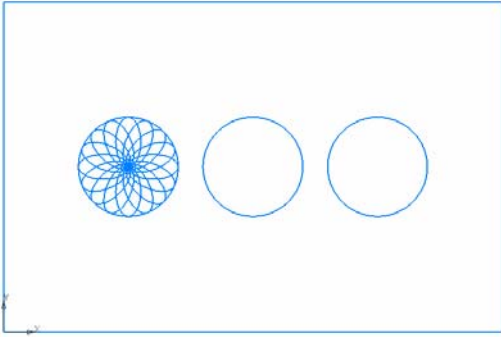
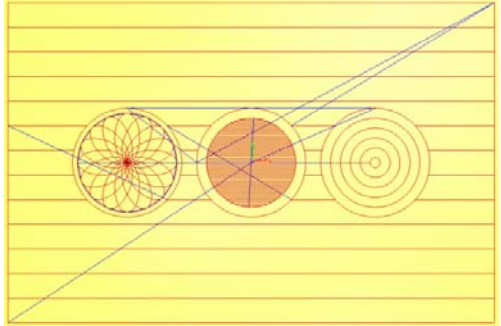
Fig. 4. Defining a curvilinear movement in the control program (KRL)

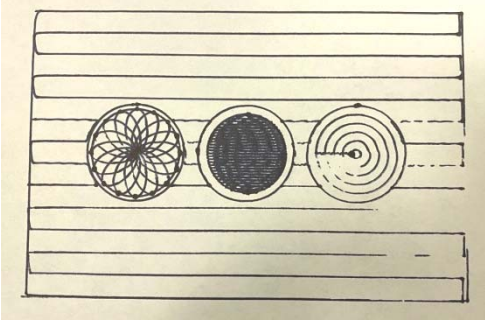
Для достижения этого необходимо устранить отсутствие одной из координат точки при её повторении (при движении параллельно осям X или Y). Начало движения SPLINE задается командой SPLINE и заканчивается командой ENDSPLINE, движение внутри этого блока формируется командой SPL для кривой линии и командой SLIN для прямой линии. Перемещение по оси Z формируется изменением только этой координаты, осуществляется движением LIN. Команды в управляющей программе имеют вид, представленный выше на рис. 4.

Заключение

Созданная программа на языке Python позволяет программировать движение плазматрона на 6-осном роботе-манипуляторе KUKA KR16-2, используя САМ-программу для станков с ЧПУ. При этом упрощается создание траекторий движения плазматрона по поверхности изделий. В таблице представлены этапы автоматизации создания траекторий движения плазматрона. Для визуализации результата программы на установочном фланце робота-манипулятора был установлен маркер, который отобразил заданную траекторию.

Этапы автоматизации создания траекторий

№	Отображение траекторий	Вид
1	В графическом редакторе	
2	В САМ-программе для станков с ЧПУ	
3	В g-code формате	<pre>X73.500Y-41.038 X-73.500Y-41.038 X-73.500Y-33.577 X73.500Y-33.577 X73.500Y-26.115 X-73.500 X-73.500Y-18.654 X73.500Y-18.654</pre>
4	В KRL	<pre>LIN {X 907.113, Y 209.41} LIN {X 907.113, Y 216.871} LIN {X 1054.113, Y 216.871} LIN {X 1054.113, Y 224.333} LIN {X 1030.237, Y 224.333} SPLINE SPL {X 1030.745, Y 224.91} SPL {X 1031.229, Y 225.514} SPL {X 1031.685, Y 226.142} SPL {X 1032.113, Y 226.793}</pre>

№	Отображение траекторий	Вид
5	Результат	

В дальнейшем планируется доработать программу для объемных траекторий, например, используя в САМ-программе чистовую обработку рельефа объемной детали, можно напылять покрытие плазмотроном на объемные детали несложных форм, такие как рефлектор. А также планируется уменьшить число шагов алгоритма автоматизации внедрением Python-программы в САМ-программу макросом и рассмотреть другие варианты автоматизации.

Библиографические ссылки

1. Хасуй А. Техника напыления. М. : Машиностроение, 1975. 288 с.
2. Кудинов В. В Плазменные покрытия. М. : Наука, 1977. 270 с.
3. Михеев А. Е., Колмыков В. А. Повышение эксплуатационных характеристик поверхностей элементов конструкций летательных аппаратов. Автоматизация процессов обработки. М. : МАКС Пресс, 2002. 224 с.
4. Зуев, Д. М., Шахматов А. В., Ханов В. Х. Концепция реконфигурируемой космической лаборатории на примере космического аппарата ReshUCube // Космические системы. М. : Перо, 2021. С. 17–18.
5. Aysha S. Hameed, Bindu G. R-Single segment approach and landing guidance and control for an unpowered reusable launch vehicle / Aerospace Science and Technology. 2021. No. 115. P. 106777. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106777>.
6. Формирование сложнопрофильных деталей космических аппаратов методом селективного лазерного сплавления / А. И. Ананьев, Ю. П. Борщев, М. Ю. Квардаков и др. // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 1(35). С. 87–92.
7. Ethan P. Hopping, Wensheng Huang, Kunning G. Xu. Small Hall Effect Thruster with 3D Printed Discharge Channel: Design and Thrust Measurements // Aerospace. 2021. Vol. 8. P. 227. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace8080227>.
8. Lawand Lydia, Massimo Panarotto, Petter Andersson, Ola Isaksson, Michael Kokkolaras. Dynamic Lifecycle Cost Modeling for Adaptable Design Optimization of Additively Remanufactured Aeroengine Components // Aerospace. 2020. No. 8. P. 110. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace7080110>.
9. Плазмотрон для нанесения покрытий из тугоплавких дисперсных материалов / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина, И. О. Якубович // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 365–372. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-365-372.
10. Напыление покрытий плазмотроном с подачей порошка спутно плазменному потоку / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. С. 194–200. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-194-200.

11. Компания KUKA Roboter [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kuka.com> (дата обращения: 28.11.2021).
12. Производитель промышленных роботов Doosan Robots [Электронный ресурс]. URL: <https://doosanrobots.ru> (дата обращения: 28.11.2021).
13. Промышленные роботы АБВ [Электронный ресурс]. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/ru/> (дата обращения: 28.11.2021).
14. Плазматрон для нанесения покрытий на внутренние поверхности изделий / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 2. С. 274–278. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-274-278.
15. re – Regular expression operations [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.python.org/3/library/re.html> (дата обращения: 28.11.2021).

References

1. Khasuy A. *Tekhnika napyleniya* [Spraying technique]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 288 p.
2. Kudinov V. V. *Plazmennye pokrytiya* [In Plasma coatings]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 270 p.
3. Mikheev A. E., Kolmykov V. A. [Improving the performance characteristics of the surfaces of structural elements of aircraft.]. *Avtomatizatsiya protsessov obrabotki*. Moscow, MAKS Press Publ., 2002, 224 p.
4. Zuev D. M., Shakhmatov A. V., Khanov V. Kh. [The concept of reconfigurable space lab on the example of the spacecraft ReshUCube]. *Kosmicheskie sistemy*. Moscow, Pero Publ., 2021, P. 17–18.
5. Aysha S. Hameed, Bindu G. R-Single segment approach and landing guidance and control for an unpowered reusable launch vehicle. *Aerospace Science and Technology*. 2021, No. 115, P. 106777. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106777>.
6. Anan'ev A. I., Borshchev Yu. P., Kvardakov M. Yu. et al. [The formation of geometrically-complex parts of space vehicles by means of selective laser melting]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 2017, No. 1(35), P. 87–92 (In Russ.).
7. Ethan P. Hopping, Wensheng Huang, Kunning G. Xu. Small Hall Effect Thruster with 3D Printed Discharge Channel: Design and Thrust Measurements. *Aerospace*. 2021, Vol. 8, P. 227. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace8080227>.
8. Lawand Lydia, Massimo Panarotto, Petter Andersson, Ola Isaksson, Michael Kokkolaras. Dynamic Lifecycle Cost Modeling for Adaptable Design Optimization of Additively Remanufactured Aeroengine Components. *Aerospace*. 2020, No. 8, P. 110. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace7080110>.
9. Mikheev A. E., Girn A. V., Ravodina D. V., Yakubovich I. O. [Plasmatron for coating of refractory dispersed materials]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 2, P. 365–372 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-365-372.
10. Mikheev A. E., Girn A. V., Yakubovich I. O., Rudenko M. S. [Spraying of coatings with a plasma torch with powder feeding in a satellite plasma]. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 1, P. 194–200 (In Russ.). Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-194-200.
11. *Kompaniya KUKA Roboter* [KUKA Roboter Company]. Available at: <https://www.kuka.com> (accessed 28.11.2021).
12. *Proizvoditel' promyshlennykh robotov Doosan Robots* [Manufacturer of industrial robots Doosan Robots]. Available at: <https://doosanrobots.ru> (accessed: 28.11.2021).
13. *Promyshlennyye roboty ABB* [BB Industrial robots]. Available at: <https://new.abb.com/products/robotics/ru/> (accessed: 28.11.2021).

14. Mikheev A. E., Girn A. V., Yakubovich I. O., Rudenko M. S. [Plasmatron for coating the inner surfaces of products]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 274–278 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-274-278.

15. re – Regular expression operations. Available at: <https://docs.python.org/3/library/re.html> (accessed: 28.11.2021).

© Калашников А. С., Руденко М. С., Кучеренко А. Д.,
Гирн А. В., Михеев А. Е., 2021

Калашников Алексей Сергеевич – студент 5 курса; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: fangy.ko@gmail.com.

Руденко Михаил Сергеевич – ассистент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com.

Кучеренко Антон Дмитриевич – студент 5 курса; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dartantonton@yandex.ru.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: girn007@gmail.com.

Kalashnikov Alexey Sergeevich – fifth-year student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: fangy.ko@gmail.com.

Rudenko Mikhail Sergeevich – Assistant; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com.

Kucherenko Anton Dmitrievich – fifth-year student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: dartantonton@yandex.ru.

Girn Alexey Vassilyevich – Cand. Sc., Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: girn007@gmail.com.

Mikheev Anatoly Yegorovich – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.
