

УДК 681.5.015

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПРОГРАММНЫХ ТРАЕКТОРИЙ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ДУГОВОЙ СВАРКИ

М.М. КОЖЕВНИКОВ¹, О.А. ЧУМАКОВ², И.Э. ИЛЮШИН¹, Л.А. ЛОБОРЕВА¹

¹Могилевский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25 мая 2018

Аннотация. Разработаны новые эффективные методы и алгоритмы генерации программных траекторий роботов-манипуляторов для дуговой сварки с учетом технологических ограничений. Предложенные методы и алгоритмы, в отличие от известных, позволяют эффективно учесть форму сварного шва, а также ограничения, накладываемые на его ориентацию. Эффективность разработанных методов и алгоритмов подтверждена результатами экспериментов с моделями промышленных роботов-манипуляторов.

Ключевые слова: робот-манипулятор, алгоритмы управления, дуговая сварка, конфигурационное пространство.

Abstract. The new effective methods and algorithms were developed for generating of program trajectories for robotic manipulators of arc welding with account of technological limits. The proposed methods and algorithms, in contrast to the known ones, allow to effectively take into account the shape of the welded seam, as well as the constraints imposed on its orientation. The effectiveness of the developed methods and algorithms is confirmed by the results of experiments with models of robot-manipulators.

Keywords: robotic-manipulator, algorithms for control, arc welding, configuration space.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 19-25

The methods and algorithms for generating

of program trajectories for robotic manipulators of arc welding

M.M. Kozhevnikov, O.A. Chumakov, I.E. Ilushin, L.A. Loboreva

Введение

В данной работе рассмотрены задачи генерации программных траекторий роботов-манипуляторов (РМ) и роботизированных технологических комплексов (РТК) в технологическом процессе дуговой сварки (ДС). Типичный РТК для ДС включает роботы-манипуляторы с шестью степенями подвижности и позиционер (манипулятор изделия), который может иметь до трех степеней подвижности [1–4]. Позиционер предназначен для обеспечения требуемой ориентации шва относительно направления действия силы тяжести и обеспечения доступности шва для сварочной горелки.

Стоит отметить, что для реализации траекторий РМ на сегодняшний день чаще всего применяется метод обучения [5]: такой подход ведет к увеличению риска ошибок (качество процесса зависит непосредственно от навыков оператора), выявить и устранить которые возможно только на этапе наладки, что значительно увеличивает сроки освоения новых изделий. Известные подходы к генерации программных траекторий РМ не учитывают сложные геометрические характеристики всех элементов РТК, а также ограничения на ориентацию сварочной горелки, что приводит к снижению показателей качества работы системы управления и большим объемам

движений [6–8]. При этом программная траектория РМ вычисляется за конечное время только с некоторой вероятностью, т. е. свойство «полноты» решения теряется [9, 10].

В статье предложены новые подходы для генерации программных траекторий РМ в технологическом процессе дуговой сварки, которые учитывают форму сварного шва, а также ограничения, накладываемые на его ориентацию. Такой подход позволяет успешно осуществлять управление сварочными роботами с учетом геометрических характеристик всех элементов роботизированного комплекса, модели конфигурационного пространства и технологических ограничений.

Постановка задачи

Рассмотрим типичную схему РТК для автоматизации технологического процесса ДС (рис. 1). Данная схема состоит из РМ 1 с шестью степенями свободы (q_1 – q_6), сварочной горелки 2. Сварная конструкция 3 смонтирована на позиционере 4 с тремя степенями подвижности (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. Таким образом, общее число степеней свободы роботизированной сварочной системы – девять.

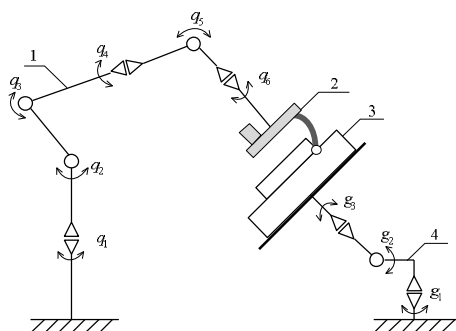


Рис. 1. Схема роботизированного технологического комплекса для дуговой сварки

Ориентация сварного шва определяется углами θ и ε (рис. 2).

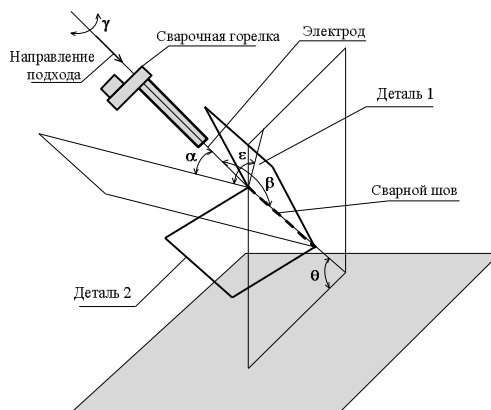


Рис. 2. Ориентация горелки дуговой сварки и сварного шва

Угол θ представляет собой угол между линией сварного шва и горизонтальной плоскостью. Угол ε определяет отклонение биссектрисы угла, образованного свариваемыми деталями, от вертикальной плоскости. Наилучшее качество ДС достигается при горизонтальном расположении шва и вертикальном расположении биссектрисы угла образованного свариваемыми деталями, т. е. оптимальные значения углов ориентации $\theta = \varepsilon = 0^\circ$.

Ориентация сварочной горелки по отношению к шву задается углами α и β . Угол α характеризует наклон плоскости перемещения сварочной горелки относительно биссектрисы угла, образованного свариваемыми деталями, β – угол наклона сварочной горелки к линии

сварного шва. Величина угла α может изменяться в допустимом диапазоне, который зависит от типа сварного соединения. Допустимый диапазон изменения угла β составляет $-15...15^\circ$. Угол γ определяет совместно с α и β ориентацию сварочной горелки и не влияет на качество сварки. Этот угол является свободным параметром и может принимать значения в диапазоне $-180...180^\circ$.

С учетом перечисленных технологических ограничений для дуговой сварки зададим диапазоны изменения углов ориентации сварочной горелки и сварного шва:

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}, \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}, \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}, \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}, \varepsilon_{\min} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}. \quad (1)$$

Разобьем диапазоны изменения углов ориентации с параметром дискретизации n и получим множества вида:

$$\{\alpha_i\}_{i=1}^n, \{\beta_i\}_{i=1}^n, \{\gamma_i\}_{i=1}^n, \{\theta_i\}_{i=1}^n, \{\varepsilon_i\}_{i=1}^n, \quad (2)$$

где $\alpha_1 = \alpha_{\min}$, $\alpha_n = \alpha_{\max}$, $\beta_1 = \beta_{\min}$, $\beta_n = \beta_{\max}$, $\gamma_1 = \gamma_{\min}$, $\gamma_n = \gamma_{\max}$, $\theta_1 = \theta_{\min}$, $\theta_n = \theta_{\max}$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\min}$, $\varepsilon_n = \varepsilon_{\max}$.

Определим модель пространственного сварного шва сложной формы в виде множества точек $\{p_j\}_j^N$, соединенных «простыми» прямолинейными сегментами. Координаты этих точек в мировой системе координат зададим множеством векторов $\{\mathbf{x}_j\}_j^N$.

Связь между углами ориентации сварного шва $\theta_i^j, \varepsilon_i^j$ и углами в сочленениях позиционера g_2, g_3 описывается прямым и обратным кинематическими преобразованиями вида

$$\mathbf{x}_j = dkinp_j(g_2^j, g_3^j, confp), \quad (3)$$

$$(g_2^j, g_3^j) = ikinp_j(\theta_i^j, \varepsilon_i^j, confp), \quad (4)$$

где $dkinp_j(\bullet)$ – функция вычисления прямого кинематического преобразования для позиционера относительно точки сварного шва p_j ; $ikinp_j(\bullet)$ – функция вычисления обратного кинематического преобразования для позиционера относительно точки сварного шва p_j ; $confp$ – индикатор конфигурации позиционера.

Вектор, описывающий углы в сочленениях манипулятора, которые позволяют переместить горелку ДС в точку p_j , имеющую координаты \mathbf{x}_j и ориентацию $[\alpha_i^j, \beta_i^j, \gamma_i^j]^T$, вычисляется как

$$(q_1^j, \dots, q_6^j) = ikinm([\alpha_i^j, \beta_i^j, \gamma_i^j]^T, \mathbf{x}_j, confm), \quad (5)$$

где $ikinm(\bullet)$ – функция расчета обратной задачи кинематики РМ; $confm$ – индикатор конфигурации РМ.

В данной статье рассмотрены промышленные манипуляторы без кинематической избыточности, имеющие единственное решение обратной задачи кинематики (5) для заданного значения $confm$.

Найдем множество конфигураций манипулятора для точки сварного шва p_j и множества дискретных значений углов ориентации горелки $\alpha_i^j, \beta_i^j, \gamma_i^j, j = 1, \dots, N$, допустимых в этой точке:

$$\mathbf{q}^j = \{(q_1^j, \dots, q_6^j)\}_{j=1}^N \cap \mathbf{C}_f, \quad (6)$$

где \mathbf{C}_f – множество, описывающее конфигурации РМ, при позиционировании в которые нет столкновений:

$$\mathbf{C}_f = \{\mathbf{q} | \mathbf{M}(\mathbf{q}) \cap \mathbf{P}(\mathbf{g}) = \emptyset\}, \quad (7)$$

где $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ – модель РМ в конфигурации \mathbf{q} ; $\mathbf{P}(\mathbf{g})$ – геометрическая модель позиционера с присоединенной сварной конструкцией, имеющая конфигурацию \mathbf{g} . Ограничения на диапазоны углов в сочленениях манипулятора и позиционера задаются следующим образом:

$$\mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max}, \quad (8)$$

$$\mathbf{g}_{\min} \leq \mathbf{g} \leq \mathbf{g}_{\max}, \quad (9)$$

где \mathbf{q}_{\min} , \mathbf{q}_{\max} – максимальное и минимальное ограничения на диапазоны углов в сочленениях РМ, а \mathbf{g}_{\min} , \mathbf{g}_{\max} – максимальное и минимальное ограничения на диапазоны углов позиционера.

Представим модель конфигурационного пространства манипулятора (7), применив неориентированный граф $\mathbf{DC}_f = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$. Вершины графа $\mathbf{V} \subset \mathbf{C}_f$ описывают конфигурации манипулятора, в которых нет столкновений и которым соответствуют определенные конфигурации позиционера. Множество \mathbf{V} формируется за счет генерации конфигурации манипулятора и проведения тестирования столкновений манипулятора с позиционером. Если столкновения не обнаружены, то конфигурация включается в \mathbf{V} , иначе – конфигурация отбрасывается. Ребра графа \mathbf{E} определяются как фрагменты траектории горелки между конфигурациями манипулятора из \mathbf{V} .

Таким образом, задача генерации программных траекторий промышленного РМ в процессе ДС может быть сформулирована следующим образом: найти траектории, обеспечивающие движение сварочной горелки вдоль сварного шва за счет скоординированного перемещения РМ и позиционера по свободным от столкновений конфигурациям из множеств (6) с учетом технологических (1) и механических (8), (9) ограничений.

Метод генерации программных траекторий РМ в процессе ДС

Для решения поставленной задачи разработан метод генерации программных траекторий промышленного РМ в процессе ДС с учетом технологических ограничений, основанный на следующей итерационной процедуре, последовательно применяемой к каждой из точек сварного шва $j = 1, \dots, N$.

1. Используя обратное кинематическое преобразование позиционера (4), вычисляются углы в его сочленениях, соответствующие дискретным значениям допустимых углов ориентации $\{\theta_i^j\}_{i=1}^n, \{\varepsilon_i^j\}_{i=1}^n$:

$$\mathbf{g}^j = \left\{ (g_2^j, g_3^j) \right\}_{k=1}^{n^2}. \quad (10)$$

2. Используя прямое кинематическое преобразование позиционера (3), вычисляются множества, определяющие координаты точек сварного шва p_j при конфигурировании позиционера каждым из элементов множества (10):

$$\mathbf{x}_j = \left\{ dkinp_j(g_{2k}^j, g_{3k}^j, confp) \right\}_{k=1}^{n^2}. \quad (11)$$

3. Используя обратное кинематическое преобразование манипулятора (5), вычисляются углы в его сочленениях, соответствующие дискретным значениям допустимых углов ориентации сварочной горелки $\{\alpha_i\}_{i=1}^n, \{\beta_i\}_{i=1}^n, \{\gamma_i\}_{i=1}^n$:

$$\mathbf{q}_k^j = \left\{ ikinm((\alpha^j, \beta^j, \gamma^j)_i, p_j^k, confm) \right\}_{i=1}^{n^3}. \quad (12)$$

4. Каждый элемент множеств \mathbf{q}_k^j ($k = 1, \dots, n^2$) проверяется на принадлежность свободному от столкновений конфигурационному пространству (7) при конфигурировании геометрической модели позиционера $\mathbf{P}(\mathbf{g})$ соответствующими углами из множества \mathbf{g}^j (10). Если элемент принадлежит \mathbf{C}_f , то он и соответствующий ему элемент, описывающий углы в сочленениях позиционера, добавляются в множество вершин \mathbf{V} графа \mathbf{DC}_f , в противном случае элемент отбрасывается.

5. Ищутся траектории манипулятора между элементами $\mathbf{q}_k^j, \mathbf{q}_k^{j+1}$, включенными в множество \mathbf{V} . При существовании таких фрагментов траектории ребро включается в \mathbf{E} .

6. Пункты 1–5 выполняются циклически для каждой из точек шва. В результате этого формируется граф \mathbf{DC}_f , включающий конфигурации манипулятора и позиционера, которые обеспечивают сварку точек шва $\{p_j\}_{j=1}^N$, 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 DC_f от элементов $\{\mathbf{q}^1, \mathbf{g}^1\}$ до элементов $\{\mathbf{q}^N, \mathbf{g}^N\}$, образующих траектории манипулятора, согласованные с ориентационными движениями позиционера.

Алгоритм генерации программных траекторий РМ в процессе ДС

На основе предлагаемого метода разработан алгоритм формирования программных траекторий манипулятора в процессе дуговой сварки, приведенный в таблице.

Алгоритм использует следующие обозначения: *Getg* – функция нахождения вектора конфигураций позиционера \mathbf{g}_k^j в соответствии с выражениями (4) и (10); *Getx* – функция нахождения вектора \mathbf{x}_k^j по выражению (11); *Getq* – функция вычисления вектора конфигураций манипулятора $(\mathbf{q}_k^j)_i$ по выражениям (5) и (12); *Edge* – функция формирования «простого» участка (если таковой имеется) между конфигурацией РМ $(\mathbf{q}_k^j)_i$ и каждой свободной от столкновения конфигурацией из множества \mathbf{q}^{j-1} ; *PathSearch* – функция поиска кратчайших маршрутов на графе DC_f от элементов из множества $\{\mathbf{q}^1, \mathbf{g}^1\}$ до элементов множества $\{\mathbf{q}^N, \mathbf{g}^N\}$.

Алгоритм генерации траекторий

Входные данные: Модель РТК – $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\mathbf{P}(\mathbf{g})$, Модель сварного шва – $\{p_j\}_j^N$	
1:	$j := 1; \mathbf{V} \leftarrow \emptyset; \mathbf{E} \leftarrow \emptyset;$
2:	повторять
3:	$k := 1;$
4:	повторять
5:	$Getg(\mathbf{g}_k^j);$
6:	$Getx(\mathbf{x}_k^j);$
7:	$i := 1;$
8:	повторять
9:	$Getq((\mathbf{q}_k^j)_i);$
10:	если $\mathbf{M}((\mathbf{q}_k^j)_i) \cap \mathbf{P}(\mathbf{g}_k^j) = \emptyset$
11:	то $\mathbf{V} \leftarrow \{(\mathbf{q}_k^j)_i, \mathbf{g}_k^j\};$
12:	$\mathbf{E} \leftarrow Edge((\mathbf{q}_k^j)_i, \mathbf{q}^{j-1});$
13:	$i := i + 1;$
14:	до тех пор, пока $i \leq n^3;$
15:	$k := k + 1;$
16:	до тех пор, пока $k \leq n^2;$
17:	$j := j + 1;$
18:	до тех пор, пока $j \leq N;$
19:	$path \leftarrow PathSearch(DC_f, \{\mathbf{q}^1, \mathbf{g}^1\}, \{\mathbf{q}^N, \mathbf{g}^N\}).$

Исследование эффективности предложенных методов и алгоритмов

Разработанные методы и алгоритмы генерации траекторий протестированы на примере сварочной роботизированной установки. Такая установка представлена на рис. 3. Установка обеспечивает сварку металлических пластин и реализована на базе РМ IR761, пятиосного позиционера и контроллера RCM3. Сварка металлической пластины производится за несколько шагов. Перед очередным шагом производится сборка и прихватка деталей. Сборка и установка деталей производятся с использованием съемной оснастки.

Выполнено исследование эффективности и определена точность геометрических характеристик РТК, необходимых для генерации программных траекторий роботов с учетом предложенной модели. Установлено, что для реализации учета данной модели конфигурационного пространства необходимо контролировать геометрические характеристики сварного шва, отклонение сварочной горелки от шва в горизонтальном и вертикальном направлениях. Показано, что точность и достоверность измерения данных характеристик существенно влияют на эффективность разработанных методов генерации программных траекторий. Результаты тестирования разработанных методов и алгоритмов показывают, что они позволяют найти траектории движения РМ вдоль сварных швов с эффективным обходом технологических ограничений.

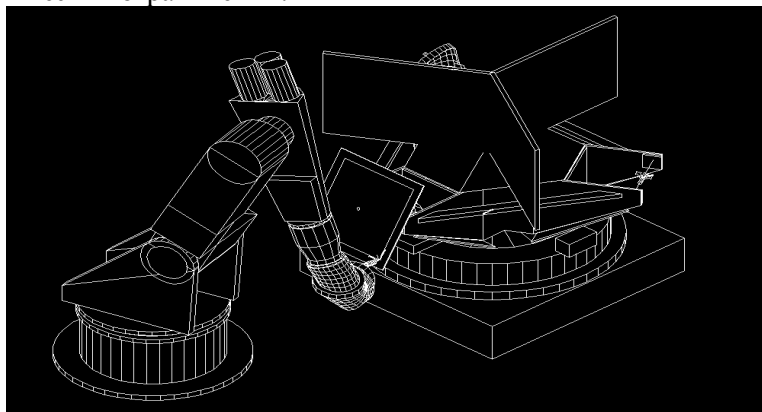


Рис. 3. Тестовая роботизированная ячейка

Заключение

В статье предложен новый метод генерации программных траекторий манипулятора для ДС. На основе предложенного метода разработан алгоритм генерации программных траекторий, позволяющий эффективно учитывать характеристики сварочных манипуляторов и сварных конструкций, а также ограничения, обусловленные технологией ДС, а именно ограничения на ориентацию горелки дуговой сварки и ориентацию шва. Эффективность предлагаемых алгоритмов подтверждена тестированием выполненного посредством моделирования РТК.

Список литературы

1. Климов А.С., Машнин Н.Е. Роботизированные технологические комплексы и технологические линии в сварке. СПб.: Лань, 2011. 240 с.
2. Сварочные технологии в экстремальных условиях. Ч. 1. Анализ многофакторного потенциального риска / Б.Е. Патон [и др.] // Автомат. сварка. 2002. № 11. С. 3–7.
3. Вернадский В.Н. Промышленные роботы в современном производстве // Автомат. сварка. 2001. № 11. С. 37–42.
4. Pires J.N., Loureiro A., Bolmisjo G. Welding robots: technology, systems issues and applications. Springer-Verlag London Limited, 2006. 192 p.
5. Цыбульский Г.А. Автоматизация процедур обучения роботов семейства «PUMA» // Автомат. сварка. 2007. № 6. С. 49–50.
6. Цыбульский Г.А. Алгоритм автоматической ориентации манипуляционного робота относительно тестируемых поверхностей // Автомат. сварка. 2006. № 3. С. 43–45.
7. Zhang Q., Zhao M.-Y. Minimum time path planning of robotic manipulator in drilling/spot welding tasks // Journal of Computational Design and Engineering. 2016. № 2 (3). P. 132–139.

8. Rantanen M., Juhola M. A configuration deactivation algorithm for boosting probabilistic roadmap planning of robots // *International Journal of Automation and Computing*. 2012. № 9 (2). P. 155–164.
9. Rantanen M., Juhola M. Speeding up probabilistic roadmap planners with locality-sensitive hashing // *Robotica*. 2015. № 33 (7). P. 1491–1506.
10. Akbaripour H., Masehian E. Semi-lazy probabilistic roadmap: a parameter-tuned, resilient and robust path planning method for manipulator robots // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. № 89 (5). P. 1401–1430.

References

1. Klimov A.S., Mashnin N.E. Robotizirovannye tehnologicheskie komplekсы i tehnologicheskie linii v svarke. SPb.: Lan', 2011. 240 s. (in Russ.)
2. Svarochnye tehnologii v jekstremal'nyh uslovijah. Ch. 1. Analiz mnogofaktornogo potencial'nogo riska / B.E. Paton [i dr.] // *Avtomat. svarka*. 2002. № 11. S. 3–7. (in Russ.)
3. Vernadskij V.N. Promyshlennye roboty v sovremennom proizvodstve // *Avtomat. svarka*. 2001. № 11. S. 37–42. (in Russ.)
4. Pires J.N., Loureiro A., Bolmisjo G. Welding robots: technology, systems issues and applications. Springer-Verlag London Limited, 2006. 192 p.
5. Cybul'kin G.A. Avtomatizacija procedur obuchenija robotov semejstva «PUMA» // *Avtomat. svarka*. 2007. № 6. S. 49–50. (in Russ.)
6. Cybul'kin G.A. Algoritm avtomaticheskoy orientacii manipuljacionnogo robota otnositel'no testiruemyh poverhnostej // *Avtomat. svarka*. 2006. № 3. S. 43–45. (in Russ.)
7. Zhang Q., Zhao M.-Y. Minimum time path planning of robotic manipulator in drilling/spot welding tasks // *Journal of Computational Design and Engineering*. 2016. № 2 (3). P. 132–139.
8. Rantanen M., Juhola M. A configuration deactivation algorithm for boosting probabilistic roadmap planning of robots // *International Journal of Automation and Computing*. 2012. № 9 (2). P. 155–164.
9. Rantanen M., Juhola M. Speeding up probabilistic roadmap planners with locality-sensitive hashing // *Robotica*. 2015. № 33 (7). P. 1491–1506.
10. Akbaripour H., Masehian E. Semi-lazy probabilistic roadmap: a parameter-tuned, resilient and robust path planning method for manipulator robots // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. № 89 (5). P. 1401–1430.

Сведения об авторах

Кожевников М.М., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Чумаков О.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Илюшин И.Э., ассистент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Лоборева Л.А., ассистент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Information about the authors

Kozhevnikov M.M., PhD., associate professor, chief of department of automation of technological processes and production procedures of Mogilev state university of food technologies.

Chumakov O.A., PhD, associate professor, associate professor of department of control systems of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Ilushin I.E., assistant of department of automation of technological processes and production procedures of Mogilev state university of food technologies.

Loboreva L.A., assistant of department of automation of technological processes and production procedures of Mogilev state university of food technologies.

Адрес для корреспонденции

212027, Республика Беларусь,
г. Могилев, пр. Шмидта, 3, 314,
Могилевский государственный
университет продовольствия
тел. + 375-222-48-56-76;
e-mail: iliue@yandex.by
Илюшин Игорь Эдуардович

Address for correspondence

212027, Republic of Belarus,
Mogilev, Shmidta av., 3, 314,
Mogilev state university
of food technologies
tel. + 375-222-48-56-76;
e-mail: iliue@yandex.by
Ilushin Igor Eduardovich