

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 658.5

doi: 10.30987/2658-6436-2024-4-21-27

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ ЗАГРУЗКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ

Александр Николаевич Феофанов^{1✉}, Павел Михайлович Кузнецов²,
Александр Леонидович Хорошко³

¹ Московский государственный технический университет «Станкин», г. Москва, Россия

^{2, 3} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия

¹ feo.fanov.fan@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0003-4761-0538>

² profpol@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9237-3848>

³ alexanderxop@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0008-0877-7320>

Аннотация. Целью исследования является процесс распределения производственных заданий между отдельными единицами технологического оборудования в технологической системе предприятия. В условиях многономенклатурного производства актуальным оказывается снижение времени на технологическую подготовку производства, которая носит достаточно частый характер. Значительное сокращение времени может быть достигнуто путем рациональной загрузки отдельных единиц технологического оборудования, т.е. за счет увеличения коэффициента его загрузки. Коэффициент загрузки технологического оборудования зависит от ряда факторов, в частности от рационального распределения производственных заданий не только по рабочим местам, но и во времени. Поиск рациональной последовательности запуска производственных заданий носит комплексный характер, включающий в себя генерацию различных сочетаний запуска отдельных производственных заданий и временной последовательности начала их выполнения. Поставленная задача решается путем разработки математической модели, позволяющей заранее спрогнозировать результат реализации множества сгенерированных вариантов. В качестве базового варианта предлагается имитационная модель технологической системы, позволяющей симулировать сгенерированные варианты и на основе сопоставления полученных результатов выбрать лучшие решения на различных этапах функционирования технологической системы. Новизной полученного решения является информационное обеспечение, позволяющее повысить степень адекватности математической модели реальному объекту. В результате проведенного моделирования были получены данные, позволяющие строить стратегию запуска производственных заданий в технологическую систему. Был получен инструмент, используя который можно при минимальных затратах ресурсов и в кратчайшие сроки выявить рациональный вариант стратегии планирования производства. Отметим, что практически во всех случаях необходим итерационный подход при работе с моделью. Степень достоверности результатов определяется глубиной прогноза. Полученный подход является полезным на этапе составления бизнес-планов машиностроительного предприятия.

Ключевые слова: автоматизация, технологический процесс, моделирование, симуляция, прогнозирование

Для цитирования: Феофанов А.Н., Кузнецов П.М., Хорошко А.Л. Автоматизация поддержки процессов загрузки технологической системы предприятия // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №4 (26). С. 21-27. doi: 10.30987/2658-6436-2024-4-21-27.

Original article

Open Access Article

AUTOMATION OF BOOT PROCESS SUPPORT FOR THE ENTERPRISE'S TECHNOLOGICAL SYSTEM

Alexander N. Feofanov^{1✉}, Pavel M. Kuznetsov², Alexander L. Khoroshko³

¹ Moscow State University of Technology "Stankin", Moscow, Russia

^{2, 3} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

¹ feo.fanov.fan@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0003-4761-0538>

² profpol@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9237-3848>

³ alexanderxop@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0008-0877-7320>

Abstract. The aim of the study is the process of distributing production tasks between individual units of the processing equipment in the enterprise's technological system. In the conditions of multi-product manufacturing, it is

important to reduce the time for its technological preparation, which is quite frequent. Rational loading of individual processing equipment can achieve a significant reduction in time, i.e. by increasing its load factor. The load factor of the processing equipment depends on a number of factors, in particular on the rational distribution of production tasks not only by workplaces, but also in time. The search for a rational sequence of starting production tasks is complex, including the generation of various combinations of starting individual production tasks and the time sequence of beginning their implementation. Developing a mathematical model solves the problem that allows predicting in advance the result of implementing a set of generated options. As a basic option, the authors propose a simulation model of a technological system, allowing imitating the generated options and, based on a comparison of the obtained results, selecting the best solutions at various stages of the technological system operation. The novelty of the obtained solution is information support, allowing increasing the adequacy degree of the mathematical model to the real object. Because of the conducted modelling, the paper obtains the data that make it possible to build a strategy for launching production tasks in the technological system. The authors get a tool, using which it is possible to identify a rational version of the production planning strategy with minimal resource costs and in the shortest possible time. The paper notes that in almost all cases an iterative approach is necessary when working with the model. The depth of the forecast determines the degree of the result reliability. The obtained approach is useful at the stage of drawing up business plans for a machine-building enterprise.

Keywords: automation, technological process, modelling, simulation, forecasting

For citation: Feofanov A.N., Kuznetsov P.M., Khoroshko A.L. Automation of Boot Process Support for the Enterprise's Technological System. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 4 (26). pp. 21-27. doi: 10.30987/2658-6436-2024-4-21-27.

Введение

Современное машиностроительное производство ориентировано на мелкосерийный тип производства, что продиктовано динамичным развитием потребительского спроса. В этих условиях, с целью обеспечения конкурентоспособности, оказывается необходимым обеспечение быстрой перестройки производственной системы и, прежде всего, технологической системы на выпуск новой номенклатуры изделий. Составляющая временных затрат на технологическую подготовку становится существенной в общем объеме времени и может сыграть существенную роль в удлинении сроков начала выпуска новой продукции [1].

При технологической подготовке производства организационные мероприятия обычно сводятся к использованию предшествующего опыта, определенных наработок, типовых решений, имевших в прошлом положительный эффект и т.д. При реализации подобных подходов неизбежны ошибки, исправление которых связано с неизбежными потерями материальных и временных ресурсов. Актуальной задачей является разработка подхода, позволяющего принципиально снизить указанные потери [2].

Предлагаемый подход основан на организации виртуальной технологической системы, функционирование которой не предусматривает использование материальных ресурсов, а ее функционирование осуществляется в рамках математической модели. Основой такой модели является имитационная модель, позволяющая симулировать функционирование реальной технологической системы в машинном масштабе времени. Использование машинного масштаба времени позволяет получать результаты практически сразу, что позволяет осуществлять верификацию принимаемых решений до их реальной реализации принципиально снижая риски от последствий принятия ошибочны решений [3, 4].

Материалы, модели, эксперименты и методы

Поставленная задача может быть решена с использованием совокупности действий, предусматривающих вариантное проектирование технологических процессов, подразумевающих получение ряда структур, степень рациональности которых определяется последующими процедурами, включающими моделирование их с последующей верификацией, с целью выбора наиболее удачных вариантов применительно к различным вариантам конфигураций технологической системы. В случаях необходимости применения творческих подходов предусматривается подключение модели эксперта, использующей опыт проектировщика непосредственно или в режиме диалога [5].

Рассматриваемая текущая конфигурация, определяет некоторый уровень загрузки технологической системы, информация о которой содержится в математической модели технологической системы, рассматриваемой, как виртуальная, причем ее параметры легко и быстро модифицируются. Виртуальность такой технологической системы обеспечивает ее исключительную гибкость при практически отсутствующих материальных затратах на ее перестройку.

Используя итерационный подход при генерации различных вариантов структур, можно добиться оперативного выбора наиболее рациональной конфигурации, которая на этом этапе реализуется в реальной материальной технологической системе, что обеспечивает сокращение времени на технологическую подготовку производства и повышение эффективности за счет:

- сокращение времени выполнения технологических процессов;
- минимизацию объемов продуктов незавершенного производства;
- выполнение производственных заданий точно в срок;
- снижение затрат на выполнение производственных заданий;
- увеличение пропускной способности технологической системы за счет повышения уровня загрузки технологического оборудования.

Удачные варианты сгенерированных технологических структур являются информационной базой, которая может быть использована для решения подобных технологических задач в дальнейшем [6]. Порождающая среда, образованная совокупностью сформированной базой удачных решений совместно с информацией о новых сгенерированных вариантах с информацией о новых производственных заданиях, рассматривается как множество сущностей OS , математическое представление которой имеет вид:

$$OS = (\{sa_i, SA_i\} | i \in N_n), \{(sb_j, SB_j)\} | j \in N_m,$$

где sa_i, SA_i – свойство объекта и множество его проявлений; sb_j, SB_j – информационная база данных объекта и совокупность ее элементов; N_n – множество сочетаний элементов при $(1, 2, \dots, n)$ и $N_m = (1, 2, \dots, m)$; m – количественное выражение номенклатуры изделий в технологической системе; n – количественное выражение оборудования в технологической системе.

Множественную последовательность отношений можно представить как $D1, D2, \dots, DN$, в этом случае R можно рассматривать, как отношение представленных множеств. Полагая, что R – множество (n кортежей) упорядоченных последовательностей вида $\langle d1, d2, \dots, dn \rangle$, где $d1$ – элемент из $D1$; $d2$ – элемент из $D2$; ...; dn – элемент из DN . Множества $D1, D2, \dots, DN$ являются доменами отношения R .

Отношение R представляет собой некоторую совокупность кортежей, отражающих ряд возможных вариантов структур виртуальной технологической системы и представляется в виде реляционных баз данных.

Значения атрибутов рассчитываются на основе выбора проекции и насыщаются информационным содержанием базы данных. Полученный результат анализируется и принимается решение о степени удачности решений на основе сгенерированных структурных вариантов. Принятый рациональный вариант содержит описание технологических процессов, привязанных к конкретным единицам оборудования технологической системы, оснастки и т.д.

Для математического моделирования процессов, протекающих в технологической системе, целесообразно использовать метод имитационного моделирования на основе дискретно-событийной реализации. Модель содержит логические условия, определяющие событийный характер процессов в технологической системе. Периоды времени между событиями описываются аналитическими выражениями, характеризующими непрерывность самих технологических операций. Вариативность параметров модели обеспечивается итерационными подходами при определении последовательностей выполняемых технологических операций.

Модель порождающей среды может представлять собой табличную, сетевую, перестановочную и их сочетания. Взаимосвязь между свойствами определяется логическими функциями дизъюнкции и конъюнкции. При оценке сгенерированных вариантов осуществляется последовательный анализ с выбором лучшего по установленным критериям, например, себестоимость, сроки выполнения объем выполненных производственных заданий за рассматриваемый период и т.д. [7].

При совпадении свойств спроектированного технологического процесса и технологической системы выполняется логическая функция эквиваленция, в противном случае имеет место пересечение массивов свойств:

$$C = \{c \mid c \in A \text{ и } c \in B\},$$

где C – множество технологических операций, выполняемых при данных производственных условиях; A – свойства текущей конфигурации технологической системы; B – свойства спроектированного технологического процесса.

Структура технологического процесса при математическом моделировании представляется в виде булевой матрицы взаимосвязей, являющимися бинарными отношениями:

$$[C] = [A \times B] = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{12} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix}.$$

При наличии взаимосвязи элементов a_i и b_j значение $c_{ij} = 1$, в противном случае $c_{ij} = 0$. В записи булевой матрицы $\{c_{ij}\}$ подразумевается A – множество строк, а B – множество столбцов.

Используя значения компонентов матрицы, выстраиваются логические связи между массивами технологического оборудования и требующих выполнения операций технологических процессов. При получении нескольких работоспособных вариантов структур распределения технологических операций осуществляется выбор лучшего варианта. Основным критерием выбора лучшего варианта является совпадение сроков выполнения производственных заданий и их плановым завершением. При несовпадении осуществляется анализ результатов. Если сроки выполнения оказываются более ранними, осуществляется смещение сроков их запуска на более поздние сроки и соответственно корректируются сроки поставок комплектующих и т.д. Если сроки выпуска оказываются более поздними – осуществляется комплекс коррекций в сторону более ранних сроков. При невозможности получения работоспособного варианта должны рассматриваться варианты коррекции сроков с заказчиком или, в худшем случае, отказ от принятия данного задания в производство.

В ходе поиска рационального варианта, при нахождении некоторого удачного решения, которое может быть использовано в дальнейшей практике, такое решение помечается с указанием полезных свойств и вносится в базу данных удачных решений. Обычно такие решения связаны с использованием эвристических методик. Наличие подобной базы позволяет существенно ускорить процессы технологической подготовки и снизить вероятность принятия ошибочных решений.

При разработке технологических процессов изготовления одних и тех же деталей, технологические возможности конкретных единиц технологического оборудования оказывают существенное влияние на структуру формируемого технологического процесса. При ограниченных возможностях обработка поверхностей $\Phi_{\text{пов } i}$ может выполняться последовательно на различном оборудовании, при этом математическая модель имеет вид:

$$\Phi_{\text{пов } 1} \cup \Phi_{\text{пов } 2} \cup \dots \cup \Phi_{\text{пов } i} \cup \dots \cup \Phi_{\text{пов } n} \rightarrow \Phi_{\text{д}}.$$

Если используется технологическое оборудование с широкими технологическими возможностями, то можно получать сочетания поверхностей $\Phi_{\text{соч } i}$ и математическая модель приобретает вид:

$$\Phi_{\text{соч } 1} \cup \Phi_{\text{соч } 2} \cup \dots \cup \Phi_{\text{соч } j} \cup \dots \cup \Phi_{\text{соч } n} \rightarrow \Phi_{\text{д}}.$$

При технологических возможностях получения поверхностей как по первому, так и по второму варианту, математическая модель приобретает вид:

$$(\Phi_{\text{пов } 1} \cup \dots \cup \Phi_{\text{пов } M}) \cup (\Phi_{\text{соч } 1} \cup \dots \cup \Phi_{\text{соч } L}) \rightarrow \Phi_{\text{д}}.$$

Наиболее перспективным является получение всего комплекта требуемых поверхностей:

$$\Phi_{\sum_{i=1}^n \text{ элем } i} \rightarrow \Phi_{\text{д}}.$$

Последние достижения в области аддитивных технологий позволяют шире использовать четвертый вариант, например за счет печатанья без стержневых литевых форм со сложным геометрическим содержанием. При невозможности использования такой технологии используют традиционные, менее эффективные пути, подразумевающие членение детали на отдельные составляющие, после изготовления которых конструкция собирается в единое целое с разъемными и не разъемными соединениями.

Результаты

При выполнении процесса моделирования функционирования технологического участка используется имитационная модель. На рис. 1 приведена визуализация работы конкретного гибкого производственного участка, состоящего из четырех станков с ЧПУ и робота их обслуживающего. В общем виде количество и состав участка варьируется в зависимости от конфигурации конкретного участка.

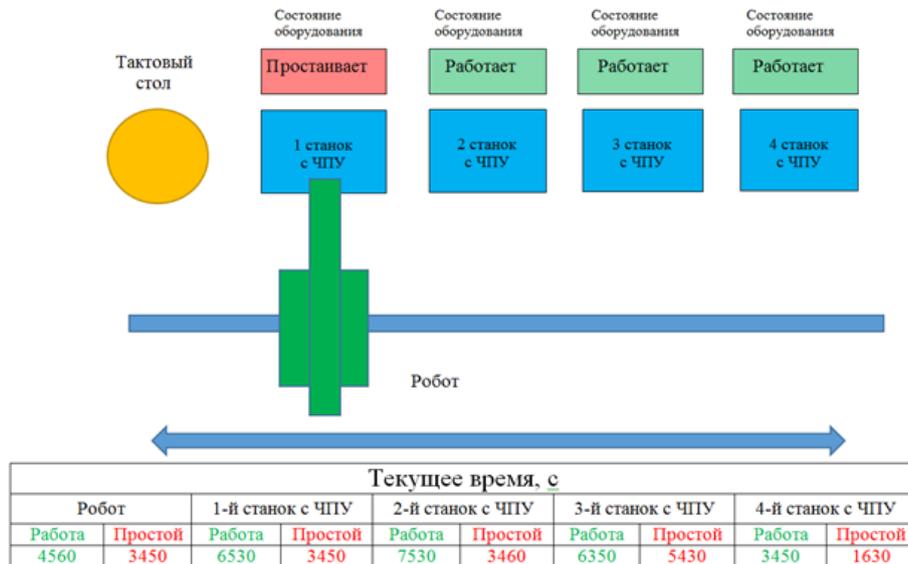


Рис. 1. Визуализация функционирования имитационной модели автоматического участка, состоящего из станков с ЧПУ, обслуживаемых промышленным роботом

Fig. 1. Visualization of the functioning of the simulation model of an automatic section consisting of CNC machines serviced by an industrial robot

Разработанные технологические процессы рассчитываются по времени выполнения каждой технологической операции. Далее технологические операции распределяются по отдельным рабочим местам и процесс моделирование запускается. Параметры технологического оборудования известны, например, скорость перемещения робота, длина перемещения от тактового стола до обслуживаемого станка, время взаимодействия робота с тактовым столом и каждым из станков. На рисунке представлены текущие величины времени работы и простоя каждой единицы технологического оборудования.

При запуске математической модели визуально можно видеть все перемещения технологических объектов. Одновременно идет отсчет текущего времени. Текущее время для

каждой единицы технологического оборудования разделяется отдельно как время работы и как время простоя.

Общее время работы участка ограничено некоторым производственным периодом, например, сменой. После завершения этого периода происходит останов работы программы и производится анализ полученных результатов. Например, если в качестве критерия выступает коэффициент загрузки каждой единицы оборудования $K_{\text{загр}}$, то производится расчет по формуле:

$$K_{\text{загр}} = \frac{\sum_0^T t_{\text{раб}}}{\sum_0^T t_{\text{раб}} + \sum_0^T t_{\text{пр}}},$$

где $\sum_0^T t_{\text{раб}}$ – суммарное время работы единицы технологического оборудования за моделируемый период времени; $\sum_0^T t_{\text{пр}}$ – суммарное время простоя единицы технологического оборудования за моделируемый период времени.

Если величина коэффициента недостаточно высокая (менее 0,6), то моделируется следующая сгенерированная последовательность. На основе проведенного моделирования выбирается либо вариант с наилучшими показателями, либо любой, показатели которого удовлетворяют заданным значениям.

Функционирование модели в машинном масштабе времени позволяет проводить все расчеты за короткие промежутки времени. Разумеется, режим визуализации в этом случае будет недоступен. Возможен комбинированный вариант, при котором статические ситуации при которых все станки работают, а робот ожидает заявки на обслуживание сокращаются за счет перехода от реального масштаба времени к машинному и наоборот, когда какой-либо станок завершает свою работу. Используя итерационный подход, добиваются наилучше варианта загрузки.

Предложенная модель программным путем легко перенастраивается на другие участки с другой конфигурацией, например с другим числом обслуживаемых станков. При этом математическое обеспечение остается инвариантным.

Заключение

В условиях мелкосерийного производства, которому присуще быстрая сменность номенклатуры выпускаемой продукции, важное значение приобретает виртуальность технологической системы, при которой процессы апробации различных вариантов структур технологических процессов носят характер простого машинного эксперимента с затратой минимальных объемов материальных и временных ресурсов. Организация порождающей среды, в сочетании с итерационным подходом, позволяет придать процессу поиска рациональный, лучший из вариантов поведенческий характер, присущий целеустремленным системам.

Целью поиска рационального решения является нахождение такого варианта конфигурации технологического процесса, при котором обеспечивается максимальная эффективность функционирования технологической системы предприятия. Поиск основывается на данных о текущем состоянии технологической системы, включая информацию о ее составе, организации и свойствах, данные о плановых производственных заданиях. Использование имитационного моделирования позволяет описывать поведение технологической системы с максимальной достоверностью, относительно реально существующей на предприятии.

Список источников:

1. Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве / А.В. Цырков, П.М. Кузнецов, Г.А. Цырков и др. // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – № 4. – С. 511-522.
2. Бутко А.О., Кузнецов П.М. Построение информационных моделей в интегрированных системах // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу. – 2019. – № 3. – С. 20-25.

References:

1. Tsyrcov A.V., Kuznetsov P.M., Tsyrcov G.A., et al. Project and Operations Management of Machine-Building Production. Mordovia University Bulletin. 2018;28(4):511-522.
2. Butko A.O., Kuznetsov P.M. Creating of Information Models in Integrated Systems. Defence Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress. 2019;3:20-25.

3. Zayatzev A., Lukianova A., Demorentky D., Alexandrova Yu. Evaluation of the influence geometric parameters of a cylindrical specimen for tensile adhesion testing of thermally sprayed coating. E3S Web of Conferences 2023, 402, 09001.

4. Andryukhin N.D., Yagopol'skii A.G., Zaitsev A.N. et al. Simulation in Selecting Metal-Cutting Equipment at Different Stages of Preproduction. Russ. Engin. Res. 2023, 43(5), pp. 598-600.

5. Timiryazev V.A., Scirtladce A.G. Samoprogrammirovaniye trayektoriy s ispol'zovaniyem rezhushchego instrumenta na tokarnykh stankakh s CHPU v remontnykh proizvodstvakh // International Journal of Science, Technology and Society (IJSTS). Vol. 7. №2. 2019, pp. 38-43.

6. Sledkov Yu.G., Khoroshko L.L., Kuznetsov P.M. Management of business processes in short-run production // Russian Engineering Research, 2022, Vol. 42, No. 3, pp. 282-285.

7. Sledkov Yu.G., Khoroshko L.L., Butko A.O., Kuznetsov P.M. Controlling the Dynamic Accuracy in the Contour Machining of Plane // Russian Engineering Research, 2023, Vol. 43, No. 1, pp. 86-88.

3. Zayatzev A., Lukianova A., Demorentky D., Alexandrova Yu. Evaluation of the Influence Geometric Parameters of a Cylindrical Specimen for Tensile Adhesion Testing of Thermally Sprayed Coating. In: Proceedings of International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023: E3S Web of Conferences: 2023, vol. 402. p. 09001.

4. Andryukhin N.D., Yagopol'skii A.G., Zaitsev A.N., et al. Simulation in Selecting Metal-Cutting Equipment at Different Stages of Preproduction. Russ. Engin. Res. 2023;43(5):598-600.

5. Timiryazev V.A., Scirtladce A.G. Self-Programming the Movement Trajectory of Cutting Tool on CNC Lathes at Repair Plants. International Journal of Science, Technology and Society (IJSTS). 2019; 7(2):38-43.

6. Sledkov Yu.G., Khoroshko L.L., Kuznetsov P.M. Management of Business Processes in Short-Run Production. Russian Engineering Research. 2022;42(3):282-285.

7. Sledkov Yu.G., Khoroshko L.L., Butko A.O., Kuznetsov P.M. Controlling the Dynamic Accuracy in the Contour Machining of Plane. Russian Engineering Research. 2023;43(1):86-88.

Информация об авторах:

Феофанов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор кафедры АСОИ и МГТУ «СТАНКИН», вице-президент отделения «Квалиметрия» МОО «Академия проблем качества»

Кузнецов Павел Михайлович

доктор технических наук, профессор, почетный работник высшей школы, ORCID 0000-0001-9237-3848, ResearcherID: K-8831-2018

Хорошко Александр Леонидович

аспирант Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), ORCID: 0009-0008-0877-7320

Information about the authors:

Feofanov Alexander Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automated Information Processing and Management Systems of Moscow State University of Technology «STANKIN», Vice-President at the Qualimetry Department of the Interregional Public Organization the Academy of Quality Problems of Moscow State University of Technology «STANKIN»

Kuznetsov Pavel Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Worker of Higher Education, ORCID: 0000-0001-9237-3848, ResearcherID: K-8831-2018

Khoroshko Alexander Leonidovich

Postgraduate student of Moscow Aviation Institute (National Research University), ORCID: 0009-0008-0877-7320

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.04.2024; одобрена после рецензирования 20.06.2024; принята к публикации 24.07.2024.

The article was submitted 22.04.2024; approved after reviewing 20.06.2024; accepted for publication 24.07.2024.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.