

---

---

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**  
**DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENT ENGINEERING  
AND RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT**

---

---

УДК 658.512.4  
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-1067-1074

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОЕВЫХ АЛГОРИТМОВ  
ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА**

Д. В. КОЛЕСНИКОВА\*, Р. А. ЮРЬЕВА

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

\*Kolesnikova\_d@itmo.ru

**Аннотация.** В рамках технологической подготовки производства проектирование технологических процессов является сложной и трудоемкой задачей. Выдвинута гипотеза о возможности применения средств роевого интеллекта в задаче разработки маршрутной технологии. Исследованы особенности технологической подготовки производства, модернизация которой позволит повысить автоматизацию производственного процесса, а также снизит риск появления ошибок, связанных с человеческим фактором. Представлена математическая модель оценки состояния оборудования. Предложен алгоритм, позволяющий автоматизировать разработку маршрутной технологии на основе теории графов и алгоритмов роевого интеллекта, а также мониторинга состояния оборудования и его готовности к выполнению поставленной задачи. Отмечено, что применение роевых алгоритмов может позволить работать с графами и строить маршрутные технологии с большей скоростью обработки данных.

**Ключевые слова:** технологическая подготовка производства, роевые алгоритмы, экспертная система, математическая модель, технологический процесс, маршрутная технология

**Ссылка для цитирования:** Колесникова Д. В., Юрьева Р. А. Использование роевых алгоритмов при технологической подготовке производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 12. С. 1067—1074. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-1067-1074.

**THE USE OF SWARM ALGORITHMS IN TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION**

D. V. Kolesnikova\*, R. A. Yurieva

*ITMO University, St. Petersburg, Russia*

\*Kolesnikova\_d@itmo.ru

**Abstract.** As part of technological preparation of production, the technological processes design is a complex and time-consuming task. A hypothesis is put forward about the possibility of using swarm intelligence tools in the task of developing route technology. The features of technological preparation of production are studied; modernization of the technological preparation is aimed at increasing the production process automation, as well as reducing the risk of errors associated with the human factor. A mathematical model for assessing the condition of equipment is presented. An algorithm is proposed which allows automating the development of routing technology based on graph theory and swarm intelligence algorithms, as well as monitoring the condition of equipment and its readiness to perform the task. It is noted that the use of swarm algorithms can make it possible to work with graphs and build routing technologies with greater data processing speed.

**Keywords:** technological preparation of production, swarm algorithms, expert system, mathematical model, technological process, route technology

**For citation:** Kolesnikova D. V., Yurieva R. A. The use of swarm algorithms in technological preparation of production. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 12. P. 1067—1074 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-1067-1074.

**Введение.** Главной особенностью современного производства являются слишком большие, для того чтобы человек мог их эффективно обрабатывать, объемы информации. При технологической подготовке производства (ТПП) необходимо анализировать текущее состояние и возможности производства и прогнозировать их, а также обеспечивать успешное выполнение составленных планов. Но в области обработки информации, непосредственно для анализа состояния оборудования, существует глобальная проблема: процессы анализа и обработки информации зачастую не полностью автоматизированы, также не предусматривается их адаптация к производственной среде. Планирование технологических процессов (ТП) может зависеть от поставленных задач, заказов, состояния технологического оборудования, а также изделий, которые необходимо произвести. Чаще всего проблему представляют непредвиденные объемные заказы или заказы, выполнение которых просрочено из-за недостаточно быстрой реакции управленцев [1].

В настоящее время при использовании автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП) наиболее универсальными методами математического моделирования и многокритериальной оптимизации являются методы искусственного интеллекта [2]. Типичные методы и средства структурной и параметрической оптимизации (теория игр, теория статистических решений, линейное и динамическое программирование) все чаще заменяются методами математического моделирования и оптимизации, основанными на использовании искусственного интеллекта (экспертные системы, методы нечеткой логики, сети и генетические алгоритмы).

В работах [3—5] анализируются АСТПП, описываются перспективы их развития и основные проблемы, также представлена методология автоматизации ТПП, включающая единое информационное пространство и средства виртуализации ТПП.

В статье [6] рассмотрен метод оптимизации директивных технологических процессов в АСТПП. Предложена методика математического моделирования и оптимизации директивных технологических процессов для применения в АСТПП при создании технологических инноваций с помощью методов искусственного интеллекта.

В работе [7] описаны задачи ТПП. Авторы представили модель современной ТПП в соответствии с требованиями современного бизнеса и инженерными возможностями новой техники и информационных технологий.

Анализ показывает, что традиционные методы ТПП не в состоянии в режиме реального времени эффективно обеспечивать конкурентоспособность продукции и технологий. В современных условиях на первый план должны выходить новые методы развития инновационной экономики и формирования системы подготовки приборостроительного производства.

В рамках исследования выдвигается гипотеза о возможности модернизации ТПП, повышения его гибкости с помощью использования алгоритмов роевого интеллекта. Эти алгоритмы могут использоваться для разработки маршрутной технологии, которая является предварительным шагом в разработке технологического процесса. В настоящей работе ТП представляется в виде взвешенного графа, где вес дуги определяется оценкой состояния оборудования, к которому производится переход. Вершинами графа служат узлы оборудования, между которыми (до определенного этапа или до получения конечного продукта) перемещается заготовка. Маршрутная технология (МТ) разрабатывается при помощи поиска пути на графе с использованием алгоритмов роевого интеллекта, при этом стоимость пути может варьиро-

вать в зависимости от поставленной задачи или критериев рациональности (скорость, стоимость, вероятность брака).

Основной задачей любого производственного процесса является обеспечение заданных характеристик изготавливаемого изделия наиболее производительным путем при минимальных затратах [8]. В рамках настоящего исследования предложено рассматривать в качестве критериев рациональности ТП:

- наименьшее время прохождения маршрута,
- равновесный критерий,
- наименьший риск задержки производства или брак товара (в связи с поломками оборудования).

*Целями работы* служат исследование гипотезы о рациональности использования роевых алгоритмов при разработке МТ и ТП, а также анализ алгоритмов роевого интеллекта для построения МТ на основе количественной оценки состояния оборудования.

В рамках исследования выдвигается гипотеза о возможности модернизации ТПП, повышения его гибкости с помощью алгоритмов роевого интеллекта. Алгоритмы представляет собой мультиагентную систему (муравьиная, пчелиная колония и алгоритм мултистарта), которая формирует варианты МТ. Разработка вариантов МТ основывается на использовании объединения графовой модели ТП и оценки оборудования для каждой операции ТП. На основе заданного критерия алгоритмы выбирают маршрут при использовании метода консенсуса.

**Методы исследования.** Для достижения поставленной цели были поставлены задачи: анализа подходов к модернизации ТПП; рассмотрения ТП и маршрутной технологии в виде графа; анализа особенностей применения роевых алгоритмов к работе с графами; математического представления алгоритмов оптимизации; практической реализации алгоритма; схематического определения алгоритма ТПП в рамках выдвинутой гипотезы.

Авторами проанализированы подходы к организации ТПП, а также современные методы автоматизации и оптимизации проектирования ТП. При этом выбранный исследовательский аппарат позволил выявить особенности интеграции методов ИИ в процессе оценки состояния оборудования и последующего проектирования ТП. Анализ факторов, влияющих на формирование ТП, позволил сформулировать алгоритм его построения, отличающийся от существующих использованием роевого интеллекта. Авторами исследования проанализированы возможности представления в виде графа ТП, а в дальнейшем — производственных планов, а также использования алгоритмов роевого интеллекта для работы с графами при построении ТП.

**Применение роевых алгоритмов.** Рассмотрим алгоритмы оптимизации на основе роевого интеллекта. Сходимость нескольких алгоритмов позволит создать экспертную систему, где в качестве экспертов будут выступать алгоритмы, способные к самообучению и работающие в режиме реального времени (изменяют свой выбор и расчеты при изменении состояния окружающей обстановки).

В числе задач непрерывной конечномерной оптимизации важнейшим является класс задач глобальной оптимизации [9], при этом, в частности, используются эвристические методы, к ним относятся эволюционные и поведенческие (имитационные).

Основанные на моделировании интеллекта и поведения колоний (роев) агентов (муравьев, пчел) поведенческие методы можно использовать в мультиагентных системах [10, 11]. Особенности соответствующего алгоритма: позитивная обратная связь; решение в виде пути на графе; снижение со временем важности опыта, полученного на прошлых итерациях.

Методы муравьиной колонии (роевые) являются новыми в данном направлении: первые работы по ним опубликованы в 1997 г. [12—14]. Методы относятся к эвристическим итеративным мультиагентным методам случайного поиска, основная идея которых состоит в моделировании поведения муравьев при поиске новых источников еды.

В работе [15] приведена структурная схема алгоритма муравьиной колонии и указана его временная сложность. В работах [16—18] показано, что применение алгоритма муравьиной колонии помогает в режиме реального времени эффективно решать ряд сложных задач на производстве. Алгоритм может быть частью экспертной и интеллектуальной системы планирования для поддержки принятия решений при планировании и управлении производственными процессами или оборудованием.

Разработка и использование нескольких подобных алгоритмов позволит получать обоснованную оценку состояния оборудования для дальнейшего построения ТП в контексте заданных критериев рациональности. Таким образом, сходимость нескольких подобных алгоритмов позволит создать аналог экспертной системы, которая будет использовать данные в режиме реального времени для отслеживания поломок, задержек и прочих проблем на производственных участках и реагирования на них.

**Математическая модель оценки состояния оборудования.** Для оценки состояния оборудования можно использовать два основных подхода [19, 20]. Первый применяется в пространстве параметров, где с помощью данных (скорость и ускорение деталей по осям, напряжение, ток и др.), получаемых от оборудования, отслеживаются значения параметров объекта и оценивается отклонение их от заданного (номинального) значения; второй — в пространстве сигналов, где контролируется отклонение выходных сигналов от оборудования и его частей от расчетных значений.

На первом этапе выполняется анализ функционирования и эксплуатации надежности объекта, создается перечень основных узловых компонентов и определяются связи возможных неисправностей с данными узлами. С целью выявления проблем, неисправностей и повреждений определяются и устанавливаются их диагностические признаки и контролируемые параметры.

Далее выбираются методы измерения, датчики и прочие технические средства для получения контролируемых параметров (могут использоваться автоматизированные системы контроля для измерения и мониторинга параметров).

На следующем этапе выполняются обработка сигналов и их дальнейшее исследование, распознавание состояния исследуемого объекта и его узлов. После обработки данных определяется текущее и прогнозируется будущее состояние оборудования.

При отклонении, превышающем определенную величину, можно сделать вывод, что оборудование работает некорректно.

Контролируемые параметры должны удовлетворять ограничениям значений ( $x_i$ ) следующего вида:

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, \quad i=1 \dots N,$$

где  $i$  — число узлов оборудования, включенного в план технического контроля;  $\underline{x}_i, \bar{x}_i$  — верхняя и нижняя граница значений соответственно.

Для оценки состояния оборудования должны быть заданы или определены текущие ( $x_i(t)$ ) и нормативные ( $x_i^*(t)$ ) значения параметров. Значения параметров зависят от переменной, которая может задавать текущий момент времени ( $t$ ) или начальный момент эксплуатации средств ( $t_0$ ).

Расчетные значения отслеживаемых параметров описываются уравнением состояния:

$$x_i^*(t) = F\left(x_i(t_0), u_{[t_0, t]}, K_i\right), \quad (1)$$

где  $x_i(t_0)$  — вектор расчетно-технических параметров оборудования, которые были заданы при начале эксплуатации;  $u_{[t_0,t]}$  — условия эксплуатации средств на заданном промежутке времени;  $K_i$  — вектор характеристик режима работы средств или оборудования.

Результаты измерений для каждого узла оборудования будут зависеть от соответствующих технических параметров производственного процесса, условий эксплуатации:

$$x_i(t) = H(v_i(t), u_i(t)), \quad (2)$$

где  $v_i(t)$  — вектор технических параметров оборудования в текущий момент времени;  $u_i(t)$  — условия эксплуатации оборудования в текущий момент времени.

Для дальнейшего определения состояния оборудования может быть применен интегрированный показатель оценки  $J_i(t)$  [21], который будет учитывать важность каждого из наблюдаемых параметров, представленных во входных данных, и существенность их отклонений:

$$J_i(t) = \frac{\sum_{i=1}^I c_i a_i (x_i(t) - x_i^*(t))^2}{I}, \quad (3)$$

где  $c_i$  — весовые коэффициенты, учитывающие важность параметров;  $a_i$  — масштабирующий коэффициент, учитывающий существенность отклонений каждого параметра;  $x_i(t)$  — значения контролируемых параметров в текущий момент времени;  $I$  — количество контролируемых параметров оборудования.

Таким образом, выражение (3) позволяет получить количественную оценку технического состояния оборудования, но не учитывает значимость наиболее важного узла, т.е. для разных видов оборудования могут быть получены показатели технического состояния  $J_i(t)$  с одинаковыми значениями. При этом каждый узел в силу своей физической природы и производственных мощностей может характеризоваться разными весовыми коэффициентами для обеспечения полноценного производственного процесса, который должен учитываться при принятии решений. Для того чтобы рассчитанный показатель объективно отражал техническое состояние, с учетом важности самого оборудования выражение (3) примет вид:

$$J_i(t) = w_i \frac{\sum_{i=1}^I c_i a_i (x_i(t) - x_i^*(t))^2}{I}, \quad (4)$$

где  $w_i$  — весовой коэффициент важности  $i$ -го узла оборудования;  $J_i(t)$  — интегральный показатель текущего технического состояния  $i$ -го узла оборудования.

Все используемые весовые коэффициенты определяются путем экспертного оценивания [22]. Тогда математическая модель оценки фактического технического состояния оборудования выглядит следующим образом (на основании уравнений (1)—(4)):

$$\begin{cases} J_i(t) = w_i \frac{\sum_{i=1}^I c_i a_i (x_i(t) - x_i^*(t))^2}{I}, \\ x_i^*(t) = F(x_i(t_0), u_{[t_0,t]}, K_i), \\ x_i(t) = H(v_i(t), u_i(t)), \\ J_i(t) \rightarrow \min, J_i(t) \leq J_{\max}(t). \end{cases}$$

Значение интегрального показателя  $J_i(t)$  отражает текущее техническое состояние оборудования с учетом важности производственных входных данных и отклонений каждого из его параметров. Так как показатель отображает состояние оборудования, его необходимо минимизировать, чтобы обеспечить корректное функционирование производственного процесса.

Результаты оценки состояния оборудования используются для прогноза состояния оборудования и его отдельных узлов на временном горизонте, на котором рассматриваются различные варианты технических решений.

**Алгоритм автоматизированного проектирования маршрутной технологии** для модернизации технологической подготовки производства включает следующие шаги.

*Шаг 1.* Поступление входных данных о ТП. Данные содержат конструкторскую документацию, сведения о заказе (количество изделий и срок изготовления).

*Шаг 2.* Задание критерия, по которому будет спроектирована и выбрана маршрутная технология.

*Шаг 3.* Отработка конструкций деталей на технологичность с учетом типа производства.

*Шаг 4.* Оценка состояния необходимого оборудования для реализации ТП, которая основывается на применении алгоритмов машинного обучения.

*Шаг 5.* Использование графа ТП из базы знаний, его дополнение данными об оценке оборудования.

*Шаг 6.* Применение экспертной системы с использованием мультиагентного решения для проектирования маршрутной технологии, в котором учитываются критерии проектирования рациональной МТ.

*Шаг 7.* Передача полученного маршрутного описания технологу для разработки рационального ТП.

*\*Шаг 8.* В случае необходимости технолог может вернуться к любому из шагов и произвести вычисления, изменить критерий и обновить оценку состояния оборудования.

Использование предложенного алгоритма в рамках разрабатываемой методики позволит получать рациональную МТ, которая будет являться основой для разработки ТП.

Применение экспертной системы на основе алгоритмов роевого интеллекта позволит пользователю принимать решения, подкрепленные числовой оценкой технологического маршрута, состоящей из суммы оценок готовности оборудования к выполнению поставленной задачи. Кроме того, появится возможность изменять МТ и ТП в зависимости от входных условий и критерия рациональности: скорости, стоимости и др. Необходимо отметить, что оценка состояния оборудования происходит в режиме реального времени на основе поступающих данных.

Сочетание роевых алгоритмов и средств нечеткой логики позволит создать гибридную вычислительную систему, основой которой будет искусственный интеллект. Такая система сможет обеспечить многокритериальную оптимизацию технологической подготовки производства, что качественно изменит труд технологов и другого персонала, а также обеспечит конкурентоспособность выстраиваемых технологических процессов.

**Заключение.** В ходе работы была выдвинута и подтверждена гипотеза о том, что можно модернизировать ТПП с помощью использования роевых алгоритмов для построения МТ и ТП в качестве экспертной оценки. Маршрутная технология строится на основе оценки состояния оборудования, она зависит от поставленной задачи и критериев ее выполнения.

ТП представлен в виде графа, начальная и конечная вершины которого являются началом и концом ТП. Путь от данных вершин может быть проложен разными способами, в зависимости от оборудования, на котором должна быть исполнена операция (его состояния, удаленности, доступности). Каждый переход является взвешенным, оценка зависит от состояния оборудования. На данный момент реализован поиск кратчайшего пути. На примере роевого

алгоритма рассмотрена операция построения ТП на основе поиска пути, который соответствует критерию рациональности.

Описана особенность построения ТП — использование алгоритмов роевого интеллекта, каждый из которых предоставляет собственное решение, соответственно итоговый результат формируется на основе усредненных данных доступности инструмента в нужный момент.

Применение аналога экспертной системы для рационального выбора оборудования при выполнении операций значительно сократит время обоснованного выбора оборудования и соответственно проектирования ТП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yuanyushkin A. S., Lobanov D. V., Rychkov D. A.* Automation tool preparation in the conditions of production // *Applied mechanics and materials*. Trans. Tech. Publications Ltd, 2015. Vol. 770. P. 739—743.
2. *Yusupbekov N., Adilov F., Ergashev F.* Development and improvement of systems of automation and management of technological processes and manufactures // *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*. 2017. Vol. 11. P. 53—57.
3. *Куликов Д. Д., Падун Б. С., Яблочников Е. И.* Перспективы автоматизации технологической подготовки производства // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57, № 8. С. 7—11.
4. *Яблочников Е. И.* Методологические основы построения АСТПП. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 84 с.
5. *Яблочников Е. И.* Современные информационные технологии в ТПП приборостроительного предприятия // *Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики*. 2006. № 30. С. 3—8.
6. *Селиванов С. Г., Поезжалова С. Н.* Метод оптимизации директивных технологических процессов в АСТПП // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2012. Т. 16, № 6(51). С. 53—61.
7. *Lukić D., Todić V., & Milošević M.* Model of modern technological production preparation // *Proc. in Manufacturing Systems*. 2010. Vol. 5(1). P. 15—22.
8. *Fayziloevich U. N., Hamroevna S. M., Nurilloevich Y. M.* Analysis of Types of Optimizations of Technological Processes of Manufacture of Parts // *Intern. J. on Human Computing studies*. 2021. Vol. 3(8). P. 23—26.
9. *Weise T.* Global Optimization Algorithms – Theory and Application. 2009 [Электронный ресурс]: <[https://archive.org/details/Thomas\\_Weise\\_Global\\_Optimization\\_Algorithms\\_Theory\\_and\\_Application/mode/2up?view=theater](https://archive.org/details/Thomas_Weise_Global_Optimization_Algorithms_Theory_and_Application/mode/2up?view=theater)>.
10. *Beni G., Wang J.* Swarm intelligence in cellular robotic systems // *Robots and biological systems: towards new bionics?* Berlin, Heidelberg: Springer, 1993. P. 703—712.
11. *Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G.* Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. NY: Oxford University Press, 1999. 320 p.
12. *Gambardella L. M. and Dorigo M.* HAS-SOP: Hybrid ant system for the sequential ordering problem. Technical Report IDSIA-11-97. Lugano, Switzerland, IDSIA, 1997.
13. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization // *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2006. Vol. 1, N 4. P. 28—39.
14. *Dorigo M., Blum C.* Ant colony optimization theory: A survey // *Theoretical Computer Science*. 2005. Vol. 344, N 2—3. P. 243—278.
15. *Montemanni R., Smith D. H., Gambardella L. M.* Ant colony systems for large sequential ordering problems // *Swarm Intelligence Symposium*. IEEE, 2007. P. 60—67.
16. *Alaykýran K., Engin O., Döyen A.* Using ant colony optimization to solve hybrid flow shop scheduling problems // *Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology*. 2007. Vol. 35, N 5. P. 541—550.
17. *Deng Wu, Junjie Xu, Huimin Zhao.* An improved ant colony optimization algorithm based on hybrid strategies for scheduling problem // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 20281—20292. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2897580.
18. *Mavrovouniotis M., Shengxiang Y.* Ant colony optimization with immigrants schemes for the dynamic travelling salesman problem with traffic factors // *Applied Soft Computing*. 2013. Vol. 13, N 10. P. 4023—4037.

19. Irovan M. et al. The software application for mathematical modelling of technological process in textile industry // *Annals of the University of Oradea: Fascicle of Textiles, Leatherwork*. 2018. Vol. 19, N 2. P. 55—60.
20. Kartsev S. V. Mathematical Model of Optimization of Controlled Parameters of the Plasma Surfacing Technological Process of Wear-Resistant Coatings // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. Vol. 49, N. 9. P. 823—828.
21. Галюева И. Э., Добаев А. З., Дедегкаева А. А. Разработка математической модели комплексной оценки состояния электроэнергетических объектов // *Инженерный вестник Дона*. 2013. Т. 26, № 3. С. 102.
22. Глотов В. А., Павельев В. В. Экспертные методы определения весовых коэффициентов // *Автоматика и телемеханика*. 1976. № 12. С. 95—107.

#### Сведения об авторах

- Дарья Викторовна Колесникова** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: Kolesnikova\_d@itmo.ru
- Радда Алексеевна Юрьева** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: raddaiureva@itmo.ru

Поступила в редакцию 05.02.2023; одобрена после рецензирования 04.09.2023; принята к публикации 27.10.2023.

#### REFERENCES

1. Yuanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. *Applied mechanics and materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2015, vol. 770, pp. 739–743.
2. Yusupbekov N., Adilov F., Ergashev F. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 2017, vol. 11, pp. 53–57.
3. Kulikov D.D., Padun B.S., Yablochnikov E.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 8(57), pp. 7–11. (in Russ.)
4. Yablochnikov E.I. *Metodologicheskiye osnovy postroyeniya ASTPP (Methodological Basis for Constructing ACPP)*, St. Petersburg, 2005, 84 p. (in Russ.)
5. Yablochnikov E.I. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, no. 30, pp. 3–8. (in Russ.)
6. Selivanov S.G., Poyezshalova S.N. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 6(16), pp. 53–61. (in Russ.)
7. Lukić D., Todić V., & Milošević M. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 2010, no. 1(5), pp. 15–22.
8. Fayziloevich U.N., Hamroevna S.M., Nurilloevich Y.M. *International Journal on human computing studies*, 2021, no. 8(3), pp. 23–26.
9. Weise T. *Global Optimization Algorithms – Theory and Application*, 2009, vol. 361, [https://archive.org/details/Thomas\\_Weise\\_Global\\_Optimization\\_Algorithms\\_Theory\\_and\\_Application/mode/2up?view=theater](https://archive.org/details/Thomas_Weise_Global_Optimization_Algorithms_Theory_and_Application/mode/2up?view=theater).
10. Beni G., Wang J. *Swarm intelligence in cellular robotic systems // Robots and biological systems: towards new bionics?* Springer, Berlin, Heidelberg, 1993, pp. 703–712.
11. Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, NY, Oxford University Press, 1999, 320 p.
12. Gambardella L.M. and Dorigo M. *HAS-SOP: Hybrid ant system for the sequential ordering problem*, Technical Report IDSIA-11-97, Lugano, Switzerland, IDSIA, 1997.
13. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, no. 4(1), pp. 28–39.
14. Dorigo M., Blum C. *Theoretical Computer Science*, 2005, no. 2-3(344), pp. 243–278.
15. Montemanni R., Smith D.H., Gambardella L.M. *2007 IEEE Swarm intelligence symposium*, 2007, pp. 60–67.
16. Alaykýran K., Engin O., Döylen A. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, no. 5(35), pp. 541–550.
17. Deng Wu, Junjie Xu, Huimin Zhao, *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 20281–20292, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2897580.
18. Mavrovouniotis M., Shengxiang Y. *Applied Soft Computing*, 2013, no. 10(13), pp. 4023–4037.
19. Irovan M. et al. *Annals of the University of Oradea: Fascicle of Textiles, Leatherwork*, 2018, no. 2(19), pp. 55–60.
20. Kartsev S.V. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, no. 9(49), pp. 823–828.
21. Gagloeva I.E., Dobaev A.Z., Dedegkaeva A.A. *Engineering Bulletin of the Don*, 2013, no. 3(26), pp. 102. (in Russ.)
22. Glotov V.A., Pavelev V.V. *Automation and Remote Control*, 1976, no. 12, pp. 95–107. (in Russ.)

#### Data on authors

- Daria V. Kolesnikova** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: Kolesnikova\_d@itmo.ru
- Radda A. Yurieva** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: raddaiureva@itmo.ru

Received 05.02.2023; approved after reviewing 04.09.2023; accepted for publication 27.10.2023.