

УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

CONTROL, MODELING, AUTOMATION

Научная статья
УДК 517.977
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-2-7-13>
EDN FELRAS

Стратегия управления технологией в многостадийных системах

*Андрей Мاستиславович Корнеев, Татьяна Андреевна Сметанникова[✉],
Олег Иванович Огаджанян, Михаил Олегович Огаджанян*

*Липецкий государственный технический университет,
Липецк, Россия, aveenrok@mail.ru[✉]*

Аннотация. В ходе реализации многостадийных производственных процессов необходимо решать задачи управления технологией и определения оптимальных диапазонов изменения реализуемых факторов технологии. Рассматриваемые процессы характеризуются отсутствием строго определенных функциональных зависимостей между свойствами выпускаемой продукции и реализуемыми технологическими факторами. Многостадийный производственный процесс характеризуется наличием набора случайных величин, оказывающих влияние на технологию обработки и характеристики выпускаемой продукции. Для исследования пространственно-распределенных технологических систем, включающих набор стадий обработки, применяется клеточно-иерархический подход. Реализуется технология дискретно-аргументного моделирования сложноструктурированных процессов. Этапы обработки рассматриваются как дискретные системы, содержащие иерархию клеток. Клетки отражают функционирование определенных стадий обработки, при этом показатели качества продукции часто задаются в виде разрешенных диапазонов. Для применения клеточного подхода диапазоны изменения исследуемых технологических факторов каждой клетки разбиваются на элементы алфавитов. Решение задачи управления технологией в многостадийных системах направлено на определение оптимальных сочетаний алфавитов выходов, соответствующих требованиям стандартов. Отражены условия, учитываемые при использовании оптимальной стратегии управления исследуемыми процессами. Представлен алгоритм стратегии управления технологией в многостадийных системах. Осуществляется анализ технологических цепочек с выбором оптимальной, для которой критерий оптимальности будет максимальным. Рассматриваемая стратегия управления технологией позволяет осуществлять контроль за выполнением выбранных режимов обработки и принимать решения по их корректировке в случае наличия каких-либо отклонений. Важными элементами стратегии управления являются изменение качества сырья, корректировка требуемых значений выходных свойств, изменение режимов функционирования, нарушение технологического процесса. Рассмотрен алгоритм стратегии управления технологией в многостадийных системах, позволяющий контролировать технологический процесс и своевременно реагировать на возникающие отклонения с целью успешного достижения требуемых результатов.

Ключевые слова: многостадийная система, управление технологическим процессом, технологическая цепочка, режимы обработки, отклонение, сочетание алфавитов входов и состояний

Для цитирования: Корнеев А. М., Сметанникова Т. А., Огаджанян О. И., Огаджанян М. О. Стратегия управления технологией в многостадийных системах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 2. С. 7–13. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-2-7-13>. EDN FELRAS.

Technology management strategy in multi-stage systems

Andrey M. Korneev, Tatyana A. Smetannikova[✉],
Oleg I. Ogadzhanian, Mikhail O. Ogadzhanian

Lipetsk State Technical University,
Lipetsk, Russia, aveenrok@mail.ru[✉]

Abstract. During the implementation of multi-stage production processes, it is necessary to solve the problems of technology management and determine the optimal ranges of changes in the implemented technology factors. The processes under consideration are characterized by the absence of strictly defined functional dependencies between the properties of the products and the technological factors being implemented. A multi-stage production process is characterized by the presence of a set of random variables that affect the processing technology and the characteristics of the products. A cellular hierarchical approach is used to study spatially distributed technological systems that include a set of processing stages. The technology of discrete-argumentative modeling of complex structured processes is being implemented. The processing stages are considered as discrete systems containing a hierarchy of cells. The cells reflect the functioning of certain processing stages, while product quality indicators are often set in the form of permitted ranges. To apply the cellular approach, the ranges of variation of the studied technological factors of each cell are divided into alphabetic elements. The solution of the technology management problem in multi-stage systems is aimed at determining the optimal combinations of output alphabets that meet the requirements of the standards. The conditions taken into account when using the optimal management strategy for the studied processes are reflected. The algorithm of technology management strategy in multi-stage systems is presented. The analysis of technological chains is carried out with the choice of the optimal one, for which the optimality criterion will be the maximum. The technology management strategy under consideration allows monitoring the implementation of selected processing modes and making decisions on their adjustment in case of any deviations. Important elements of the management strategy are changing the quality of raw materials, adjusting the required values of output properties, changing operating modes, and disrupting the technological process. The algorithm of the technology management strategy in multi-stage systems is considered, which allows controlling the technological process and responding in a timely manner to deviations in order to successfully achieve the required results.

Keywords: multi-stage system, process control, process chain, processing modes, deviation, combination of alphabets of inputs and states

For citation: Korneev A. M., Smetannikova T. A., Ogadzhanian O. I., Ogadzhanian M. O. Technology management strategy in multi-stage systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2025;2:7-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-2-7-13>. EDN FELRAS.

Введение

Во время функционирования многостадийных производственных систем возникает задача выработки стратегии управления реализуемым технологическим процессом. Исследуемые процессы отличаются тем, что в них отсутствуют строго определенные функциональные зависимости выходных свойств выпускаемой продукции от технологических факторов. В процессе производства присутствуют случайные величины, которые воздействуют на технологию обработки и характеристики готовой продукции, при этом показатели качества продукции часто задаются в виде разрешенных диапазонов. Таким образом, необходимо управлять технологическим процессом и находить оптимальные интервалы изменения реализуемых технологических величин [1–4].

Для исследования пространственно-распределенных технологических систем, включающих набор стадий обработки, применяется клеточно-иерархический подход [5–7]. Этапы обработки описываются как дискретные системы, содержащие иерархию клеток. Клетки описывают функционирование различных стадий обработки. Представление

информации в применяемом дискретном подходе отражается в виде создания конечных алфавитов множества входов, состояний и выходов системы.

В работе отражены условия, учитываемые при использовании оптимальной стратегии управления исследуемыми процессами. Важными показателями выступают изменение качества сырья, корректировка требуемых значений выходных свойств, изменение режимов функционирования, нарушение технологического процесса.

Постановка задачи управления технологией в многостадийных системах

Для применения клеточного подхода диапазоны изменения исследуемых технологических факторов каждой клетки разбиваются на элементы алфавитов: $b_{km_k1}, b_{km_k2}, \dots, b_{km_kj_{m_k}}, \dots, b_{km_kJ_{m_k}}$, при этом номер клетки обозначается k , а технологический фактор клетки m_k . Выбираются отрезки, составляющие алфавиты факторов: $j_{m_k} = 1, \dots, J_{m_k}$. Из элементов алфавитов для каждой клетки формируется

массив сочетаний алфавитов исследуемых факторов:

$$\xi_{\beta_{(k)}} = b_{(k)1j_1}, \dots, b_{(k)m_k j_{m_k}}, \dots, b_{(k)M_k j_{M_k}}.$$

Аналогично создаются алфавиты входных сигналов a_{klj_k} для алфавита l -го входа. Элементы сочетаний алфавитов входов σ_a : $\sigma_{a_k} = a_{k1j_1}, \dots, a_{kL_k j_{L_k}}.$

Выходные величины формируют свой набор сочетаний алфавитов: $\tau_{\gamma_k} = c_{k1j_1}, \dots, c_{krj_r}, \dots, c_{kRj_R}$, где $r = 1, \dots, R$ – количество свойств.

Определяется сочетание выходных алфавитов, являющихся оптимальными для рассматриваемого вида продукции: $\tau_{\gamma}^+ = c_{k1j_1}^*, \dots, c_{krj_r}^*, \dots, c_{kRj_R}^*.$

Задача управления технологией в многостадийных системах сводится к нахождению технологических цепочек из набора алфавитов входов и состояний (σ_a, ξ_{β}) , позволяющих получать требуемое оптимальное сочетание $\tau_{\gamma}^+.$

Методика определения оптимальной технологической цепочки

Процесс оптимальной идентификации заключается в определении технологической цепочки (подпространства $\Xi_j^* = \{\xi_{\beta_1}^*, \dots, \xi_{\beta_k}^*, \dots, \xi_{\beta_K}^*\}$), для которой критерий оптимальности будет максимальным [8–11].

Так как рассматривается R показателей качества,

то для каждой единицы продукции, соответствующей подпространству Ξ_j , число показателей, соответствующих оптимальным сочетаниям алфавитов выходов, изменяется от 0 до R . Опыты, реализованные по технологии Ξ^* , но не принадлежащие подмножеству τ_{γ}^+ , формируют $(\tau_{\gamma}^- / \Xi^*)_j$. Индекс j отражает долю выходных величин, соответствующих оптимальным сочетаниям алфавитов. Например, $(\tau_{\gamma}^- / \Xi^*)_0$ отражает вариант, при котором все свойства не соответствуют требованиям, а $(\tau_{\gamma}^+ / \Xi^*)_R$ указывает на соответствие подмножеству $\tau_{\gamma}^+.$

Для сравнения технологических цепочек и выбора оптимальной используется критерий

$$Q = \left((\tau_{\gamma}^+ / \Xi^*)_R + \sum_{i=1}^{R-1} \frac{(\tau_{\gamma}^- / \Xi^*)_i}{R-i+1} \right) \frac{(\tau_{\gamma}^+ / \Xi^*)}{N}.$$

Выбранная оптимальная технологическая цепочка позволяет получать требуемые выходные свойства с максимальной вероятностью. Полученное сочетание алфавитов факторов фиксируется в качестве оптимального. Стратегия управления технологией состоит в контроле выполнения требуемых режимов обработки и принятии решений в случае возникновения любых отклонений.

Этапы стратегии управления технологией в многостадийных системах представлены на рис. 1.

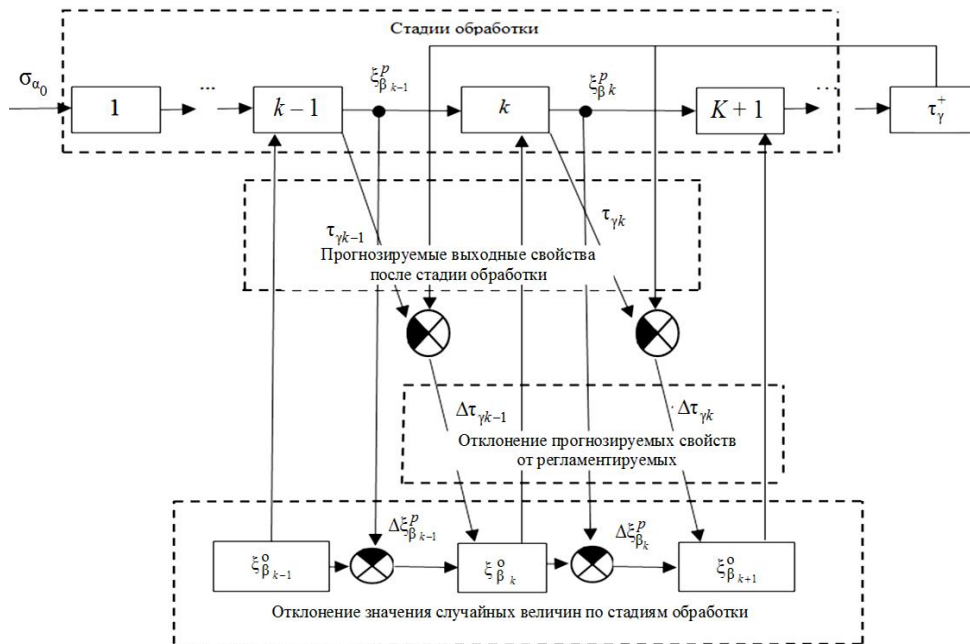


Рис. 1. Этапы стратегии управления технологией в многостадийных системах

Fig. 1. Stages of technology management strategy in multi-stage systems

После реализации режимов обработки на отдельном технологическом этапе, представляемом отдельной клеткой, оценивается соответствие реализованного сочетания алфавитов факторов выбранному оптимальному сочетанию. В случае отклонения оценивается вероятность получения требуемых показателей выходов и, при необходимо-

сти, выполняется корректировка режимов последующей обработки.

Экспериментальная часть

Ниже рассмотрен алгоритм стратегии управления технологией в многостадийных системах (рис. 2).

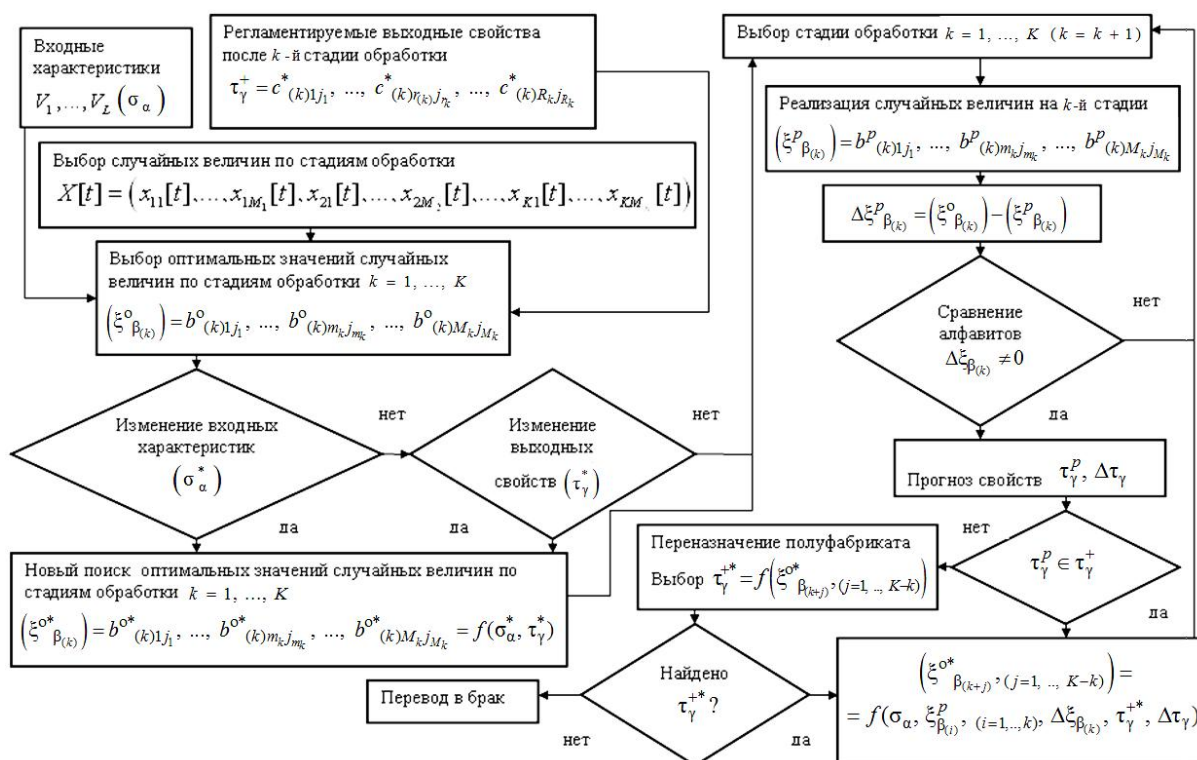


Рис. 2. Алгоритм стратегии управления технологией в многостадийных системах

Fig. 2. Algorithm of technology management strategy in multi-stage systems

При изменении характеристик сырья формируется новое сочетание алфавитов входов (σ_a^*). Это вызывает необходимость корректировки алфавитов

случайных величин. Выбранная стратегия управления режимами функционирования позволяет провести поиск новых сочетаний алфавитов:

$$\left(\xi^{o*}_{\beta(k)}\right) = b^{o*}_{(k)1j_1}, \dots, b^{o*}_{(k)m_kj_{m_k}}, \dots, b^{o*}_{(k)M_kj_{M_k}} = f(\sigma_a^*, \tau_{\gamma}^*).$$

Если при реализации процесса произошло отклонение от выбранного оптимального сочетания алфавитов факторов: $\left(\xi^p_{\beta(k)}\right) = b^p_{(k)1j_1}, \dots, b^p_{(k)m_kj_{m_k}}, \dots, b^p_{(k)M_kj_{M_k}}$, исследуется отклонение реализованных режимов обработки от заданных технологических режимов: $\Delta\xi_{\beta(k)} = \left(\xi^o_{\beta(k)}\right) - \left(\xi^p_{\beta(k)}\right)$. Если $\Delta\xi_{\beta(k)} \neq 0$, оценивается возможность получения заданных зна-

чений выходов τ_{γ}^+ . Выполняется прогноз свойств и рассматривается отклонение от оптимальных значений $\tau_{\gamma}^p, \Delta\tau_{\gamma}$. Если $\tau_{\gamma}^p \in \tau_{\gamma}^+$, то для сочетания случайных величин выбирается новое, рациональное сочетание алфавитов факторов. Для этого исследуются возможные продолжения, позволяющие получить требуемые значения выходов:

$$\left(\xi^{o*}_{\beta(k+j)}, j=1, \dots, K-k\right) = f(\sigma_a, \xi^p_{\beta(i)}, (i=1, \dots, k), \Delta\xi_{\beta(k)}, \tau_{\gamma}^+, \Delta\tau_{\gamma}).$$

Если после отклонения от заданных режимов обработки невозможно получить требуемые значения выходов при любой корректировке последующих этапов обработки, оценивается возможность продолжения процесса обработки для получения продукции со свойствами, которые можно достичь. Подбирается сочетание выходов алфавитов для данного вида продукции: $\tau_{\gamma}^{+*} = f(\xi_{\beta(i)}^p, (i=1, \dots, k))$.

Если нарушения технологии не позволяют получить продукцию заданного качества, полученный полуфабрикат отправляется в брак до момента

окончания технологического процесса.

В итоге приведенный алгоритм стратегии управления технологией в многостадийных системах позволяет контролировать технологический процесс и своевременно реагировать на возможные отклонения с целью успешного достижения требуемых результатов.

Результаты исследования

В качестве примера в таблице рассмотрены 3 клетки, соответствующие различным стадиям обработки.

Пример формирования технологических цепочек и их характеристик

An example of the formation of technological chains and their characteristics

Сочетания алфавитов факторов			Объем выборки n	Совместная частота			Критерий Q
$\xi_{\beta(1)}$	$\xi_{\beta(2)}$	$\xi_{\beta(3)}$		$(\tau_{\gamma}^{-} / \Xi^{*})_0$	$(\tau_{\gamma}^{-} / \Xi^{*})_1$	$(\tau_{\gamma}^{-} / \Xi^{*})_2$	
1	1	1	80	10	20	50	3
		2	140	10	30	100	11,5
	2	1	160	0	10	150	23,25
		2	90	30	30	30	1,35
2	1	1	90	20	10	60	3,9
		2	110	20	80	10	0,5
	2	1	125	10	15	100	10,75
		2	205	0	5	200	40,5

Набор сочетаний алфавитов факторов каждой клетки состоит из двух вариантов.

В рассмотренном примере оптимальные сочетания алфавитов факторов каждой клетки: $\xi_{\beta_1}^* = 2, \xi_{\beta_2}^* = 2, \xi_{\beta_3}^* = 2$. Технологическая цепочка, для которой критерий оптимальности Q будет максимальным: $\Xi_j^* = \{2, 2, 2\}$.

В случае отклонения оптимального сочетания алфавитов в одной из клеток исследуемого процесса осуществляется процедура управления технологией на последующих этапах обработки, например $\xi_{\beta_1}^p = 1$. Так как $\Delta \xi_{\beta_1} \neq 0$, оценивается возможность получения заданных значений выходов τ_{γ}^+ при дальнейшем соблюдении заданной оптимальной технологии. В рассмотренном случае анализируется цепочка $\Xi_j = \{1, 2, 2\}$. Из таблицы видно, что данный вариант обеспечивает вероятность получения требуемых значений выходов τ_{γ}^+ только в пределах 33,3 %. Критерий $Q = 1,35$ (для оптимального сочетания вероятность получения τ_{γ}^+ составляла 97,56 %, а $Q = 40,5$). Необходимо сформировать продолжение $(\xi_{\beta(1+j)}^{o*}, (j=1,2))$, позволяющее получать требуемые значения выходов.

Таким вариантом выступает $\Xi_j = \{1, 2, 1\}$. Для данного сочетания вероятность получения τ_{γ}^+ составляла 93,75 %, а $Q = 23,25$.

Представленные характеристики технологических цепочек позволяют оценить вероятность получения заданных свойств и выделить те траектории, которые ведут к получению брака. Например, вариант сочетания алфавитов факторов $\Xi_j = \{2, 1, 2\}$ обеспечивает вероятность получения τ_{γ}^+ 9,09 %, что, безусловно, не является допустимым вариантом. Реализуемая процедура управления технологией позволяет на ранних стадиях определять невозможность получения необходимых свойств и снимать данную партию с дальнейшего производства или переназначать в другие виды продукции.

Заключение

Представлен новый подход к исследованию сложных производственных процессов для объектов, имеющих сложную многоступенчатую структуру. Реализуется технология дискретно-аргументного моделирования сложноструктурированных процессов.

Представлены алгоритмы стратегии управления

технологией в многостадийных системах. Выбраны показатели, влияющие на процесс корректи-

ровки режимов обработки.

Список источников

1. Прангишвили И. В. Системный подход и общесистемные закономерности. М.: СИНТЕГ, 2000. 528 с.
2. Юрков Н. К. Модели и алгоритмы управления интегрированными производственными комплексами. Пенза: Информ.-издат. центр ПГУ, 2003. 198 с.
3. Clark J. S., Gelfand A. E. Hierarchical modelling for the environmental sciences: statistical methods and applications. Oxford University Press, 2006. P. 205.
4. Sakarovitch J. Elements of automata theory. Cambridge University Press, 2009. P. 758.
5. Корнеев А. М., Суханов А. В. Исследование точности и скорости сходимости алгоритмов стохастической оптимизации функций // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 3. С. 26–37.
6. Korneev A. M., Abdullakh L. S., Sukhanov A. B., Antart S. D., Al-jonid Kh. M. Identification of complex production

systems with using iterative networks // International Journal of Engineering & Technology. 2018. V. 7 (3). P. 37–39.

7. Корнеев А. М., Лаврухина Т. В., Сметанникова Т. А., Ерохин Л. К. Построение модели многоэтапного технологического процесса в виде сети Петри // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2024. Т. 20. № 3. С. 64–70.

8. Godfrey Onwubolu C., Babu B. V. New optimization techniques in engineering. Springer, 2004. P. 712.

9. Kwang Y. Lee. Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems. John Wiley & Sons, 2008. P. 586.

10. Токарев В. В., Соколов А. В. Методы оптимальных решений. Многокритериальность. Динамика. Неопределенность. М.: Физматлит, 2010. 416 с.

11. Пупков К. А., Егупов Н. Д. Теория оптимизации систем автоматического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 744 с.

References

1. Prangishvili I. V. *Sistemnyj podhod i obshchiesistemnye zakonomernosti* [A systematic approach and system-wide patterns]. Moscow, SINTEG Publ., 2000. 528 p.

2. Yurkov N. K. *Modeli i algoritmy upravleniya integrirovannymi proizvodstvennymi kompleksami* [Models and algorithms for managing integrated production complexes]. Penza, Inform.-izdat. centr PGU, 2003. 198 p.

3. Clark J. S., Gelfand A. E. *Hierarchical modelling for the environmental sciences: statistical methods and applications*. Oxford University Press, 2006. P. 205.

4. Sakarovitch J. *Elements of automata theory*. Cambridge University Press, 2009. P. 758.

5. Korneev A. M., Suhanov A. V. Issledovanie tochnosti i skorosti skhodimosti algoritmov stohasticheskoy optimizatsii funktsij [Investigation of the accuracy and convergence rate of stochastic function optimization algorithms]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2018, no. 3, pp. 26–37.

6. Korneev A. M., Abdullakh L. S., Sukhanov A. B., Antart S. D., Al-jonid Kh. M. Identification of complex production systems with using iterative networks. *International*

Journal of Engineering & Technology, 2018, vol. 7 (3), pp. 37–39.

7. Korneev A. M., Lavruhina T. V., Smetannikova T. A., Erohin L. K. Postroenie modeli mnogoetapnogo tekhnologicheskogo processa v vide seti Petri [Building a model of a multi-stage technological process in the form of a Petri net]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2024, vol. 20, no. 3, pp. 64–70.

8. Godfrey Onwubolu C., Babu B. V. *New optimization techniques in engineering*. Springer, 2004. P. 712.

9. Kwang Y. Lee. *Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems*. John Wiley & Sons, 2008. P. 586.

10. Tokarev V. V., Sokolov A. V. *Metody optimal'nykh reshenij. Mnogokriterial'nost'. Dinamika. Neopredelennost'* [Methods of optimal solutions. Multicriteria. Dynamics. Uncertainty]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 416 p.

11. Pupkov K. A., Egupov N. D. *Teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of optimization of automatic control systems]. Moscow, Izd-vo MGТУ im. N. E. Bauman, 2004. 744 p.

Статья поступила в редакцию 14.02.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 01.04.2025
The article was submitted 14.02.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 01.04.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Мстиславович Корнеев – доктор технических наук, доцент; профессор кафедры общей механики; Липецкий государственный технический университет; weenrok@mail.ru

Andrey M. Korneev – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of General Mechanics; Lipetsk State Technical University; weenrok@mail.ru

Татьяна Андреевна Сметанникова – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры высшей математики; Липецкий государственный технический университет; aveenrok@mail.ru

Олег Иванович Огаджанян – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой общей механики; Липецкий государственный технический университет; Oleg28072006@yandex.ru

Михаил Олегович Огаджанян – аспирант кафедры общей механики; Липецкий государственный технический университет; omo2504@yandex.ru

Tatyana A. Smetannikova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Higher Mathematics; Lipetsk State Technical University; aveenrok@mail.ru

Oleg I. Ogadzhanian – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of General Mechanics; Lipetsk State Technical University; Oleg28072006@yandex.ru

Mikhail O. Ogadzhanian – Postgraduate Student of the Department of General Mechanics; Lipetsk State Technical University; omo2504@yandex.ru

