

УДК 67.05, 658.5.012.1, 658.511
doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-9

Оптимизация загрузки станков производственных участков изготовления деталей

В. В. Коновалов¹, М. В. Донцова², А. Н. Расстегаев³, В. Ю. Зайцев⁴

^{1,2,3,4}Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹konovalov-penza@rambler.ru, ²dontmv@mail.ru,
³ran-tms@yandex.ru, ⁴vluzai@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью исследований является разработка компьютерной модели оптимизации загрузки станков одной классификационной группы, но различного типа, имеющегося парка технологического оборудования предприятия. *Материалы и методы.* Исследования предусматривали разработку методики и алгоритма расчета, реализованных в математическом пакете MatchCAD в виде компьютерной модели сравнительной оценки и оптимизации расчета количества деталей, обрабатываемых станками разного типа на основе имеющихся на производстве ограничений. *Результаты.* Разработанная методика позволила составить на ее основе алгоритм расчета. Реализованная компьютерная модель в математическом пакете MatchCAD позволяет производить оптимизацию значений количества деталей, обрабатываемых в каждой группе, но станками разных типов, путем поочередной оптимизации по минимуму эксплуатационных затрат, по минимуму энергозатрат и по минимуму трудозатрат. Найденная разница значений между вариантом минимального производственного цикла изготовления партии деталей и показателями после разных вариантов оптимизации позволяет сопоставить результаты различных способов загрузки оборудования для наиболее эффективного его использования. *Выводы.* На основе сравнения производственной программы типов станков по разным вариантам оптимизации находится наиболее приемлемый вариант производственной программы реализации технического задания (заказа, партии).

Ключевые слова: машиностроительные станки, технологические операции, оптимизация технологического процесса, распределение нагрузки участка

Для цитирования: Коновалов В. В., Донцова М. В., Расстегаев А. Н., Зайцев В. Ю. Оптимизация загрузки станков производственных участков изготовления деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 106–116. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-9

Optimization of loading of machines in production areas for parts manufacturing

V.V. Konovalov¹, M.V. Dontsova², A.N. Rasstegaev³, V.Yu. Zaitsev⁴

^{1,2,3,4}Penza State Technological University, Penza, Russia

¹konovalov-penza@rambler.ru, ²dontmv@mail.ru,
³ran-tms@yandex.ru, ⁴vluzai@gmail.com

Abstract. *Background.* The purpose of the research is to develop a computer model for optimizing the loading of machines of the same classification group, but of different types, of the existing fleet of technological equipment of the enterprise. *Materials and methods.*

© Коновалов В. В., Донцова М. В., Расстегаев А. Н., Зайцев В. Ю., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

The research provided for the development of a calculation methodology and algorithm implemented in the MatchCAD mathematical package in the form of a computer model for comparative evaluation and optimization of calculating the number of parts processed by machines of different types based on the limitations available in production. *Results.* The developed technique made it possible to create a calculation algorithm based on it. The implemented computer model in the MatchCAD mathematical package allows optimizing the values of the number of parts processed in each group, but with machines of different types, by alternately optimizing to minimize operating costs, to minimize energy consumption and to minimize labor costs. *Conclusions.* The found difference in values between the option of the minimum production cycle for the manufacture of a batch of parts and the display is stable.

Keywords: machine tools, technological operations, optimization of the technological process, load distribution of the site

For citation: Konovalov V.V., Dontsova M.V., Rasstegaev A.N., Zaitsev V.Yu. Optimization of loading of machines in production areas for parts manufacturing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):106–116. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-9

Введение

Оптимизация изготовления деталей широко используется в машиностроении, ее проводят с целью повышения качества и конкурентоспособности получаемой продукции и снижения издержек [1–3].

Оптимизации подвергается как конструкция изделий, так и технологические процессы производства. Первая направлена на увеличение надежности, прочности, снижение себестоимости, массы и затрат на материалы, а также улучшение эргономики и других характеристик деталей и изделий [4, 5]. При оптимизации конструкции детали часто используют метод топологической оптимизации. Топологическая оптимизация – это «метод инженерного анализа конструкции изделия, который применяется для оптимизации формы или структуры деталей с целью улучшения их эксплуатационных и функциональных характеристик» [6]. Топологическая оптимизация широко используется в аэрокосмической, автомобильной отраслях промышленности и других, где требуется получение легких и прочных конструкций.

Оптимизация технологических процессов включает в себя улучшение технологий производства, сокращение времени изготовления, оптимальную загрузку оборудования и снижение издержек [7–9]. Оптимизация технологических процессов заключается в поиске наиболее рационального способа производства изделия и использования ресурсов. Оптимизации подвергаются: маршрут обработки; производительность; основное и вспомогательное время изготовления деталей и сборки изделий; потери, возникающие при реализации технологии, и другие параметры [10–12]. К основным методам оптимизации технологических процессов можно отнести: внедрение принципов бережливого производства, реинжиниринг производственных процессов, применение математических методов [13, 14]. Для выбора метода оптимизации необходимо четко сформулировать целевые показатели, критерии, входные и выходные параметры, ограничения, а также сроки получения экономического эффекта [11, 14, 15].

В результате технологической оптимизации имеется возможность значительно повысить производительность, снизить издержки производства, повысить прибыль предприятия и конкурентоспособность продукции.

Целью исследования является разработка компьютерной модели оптимизации загрузки станков одной классификационной группы, но различного типа, имеющегося парка технологического оборудования предприятия.

Материалы и методика исследований

Исследования предусматривали разработку методики и алгоритма расчета, реализованных в математическом пакете MatchCAD в виде компьютерной модели сравнительной оценки и оптимизации расчета количества деталей, обрабатываемых станками одной классификационной группы, но различного типа, на основе имеющихся на производстве ограничений. Используя данные блока исходных значений показателей, производили в последующем расчет минимальной длительности работы станков одной группы при полной их загрузке.

Сравнение минимальных длительностей работы станков используемой группы, производили с заданным сроком исполнения заказа и обоснованием потребной минимальной длительности (контроль) выполнения заказа.

Осуществляли контроль производимого количества деталей по типам станков и их суммарное количество для всех станков участка при соблюдении заданной программы выпуска.

Производили расчет фактического фонда рабочего времени работы всех станков за допустимый период времени работы и количества деталей, выпускаемых типом станков за допустимый период времени.

Определяли потребные трудозатраты на выполнение производственной программы (заказа, партии), потребляемой мощности, расхода энергии, эксплуатационных затрат при условии одновременной работы всех станков группы, выполняющих заказ, т.е. при минимальном сроке выполнения заказа.

Устанавливали ограничения по количеству деталей, изготавливаемых станком каждой группы, выполняющих производственную программу (партию), в том числе за допустимый период работы, и типы станков, обеспечивающих выполнение заказа. Соответственно для типов станков, выполняющих один вид операций, рассчитывали: трудозатраты на выполнение производственной программы (партии), расход энергии, эксплуатационные затраты в случае выполнения потребного объема работ за допустимый период времени.

На основе распределения наряда по типам станков, осуществляющих выполнение конкретного вида операций на изготовление заданной программы выпуска деталей, проводили поочередную оптимизацию по минимуму эксплуатационных затрат, расходу энергии, трудозатрат на выполнение производственной программы (партии). Сравнивая производственную программу типов станков по вариантам оптимизации, находили наиболее приемлемый вариант.

Исходными данными для моделирования являются:

– производственное задание /партия/ (Z_v , шт. деталей);

– длительность допустимого периода работ /срок изготовления партии (D , сут.);

– сменность работы станков ($N_{ст}$, ч) и длительность смены ($D_{ст}$, ч);

– участки станков (i), объединенные по видам операций на станках, и численность ($Z_{i,j}$, шт.) станков по типам (j) на участках. Например:

$i = 1$ – токарные: $j = 1$ – универсальные, $j = 2$ – автоматы, $j = 3$ – с числовым программным управлением (ЧПУ);

$i = 2$ – фрезерные: $j = 1$ – горизонтальные, $j = 2$ – вертикальные, $j = 3$ – ЧПУ;

$i = 3$ – сверлильные: $j = 1$ – настольные, $j = 2$ – напольные, $j = 3$ – горизонтальные;

$i = 4$ – шлифовальные: $j = 1$ – наружно шлифовальные, $j = 2$ – внутришлифовальные, $j = 3$ – универсальные.

– установленная мощность привода станков (P_{ij} , кВт);

– стоимость эксплуатационных затрат станков каждого типа (Cr_{ij} , руб./ч), определяется предварительно на основании расчета технологического процесса и расчета себестоимости работ;

– трудозатраты выполнения технологических операций обработки детали на данном виде станков (Td_{ij} , мин/шт.), определяются предварительно на основании расчета технологического процесса изготовления детали по фактически имеющимся у станка подаче и частоте вращения шпинделя.

Результаты исследований

В процессе разработки математической модели оптимизации количества деталей, обрабатываемых на станках разных типов в составе одной технологической группы, была разработана методика, позволившая получить алгоритм расчета (рис. 1) и реализованная как компьютерная модель в математическом пакете MatchCAD.

Минимальная длительность (сут) работы производственного участка станков одной классификационной группы при полной загрузке оборудования определяется по выражению

$$T_{i,j} = \frac{Zv \cdot Td_{i,j} \cdot s_{i,j}}{60D_{ст} N_{ст} (Z_{i,j} + \min)}, \quad (1)$$

где $s_{i,j}$ – коэффициенты, уточняющие доли производительности участка по видам станков:

$$s_{i,j} = \frac{\frac{Z_{i,j}}{Td_{i,j} + \min}}{\sum_i \left(\frac{Z_{i,j}}{Td_{i,j} + \min} \right) + \min}. \quad (2)$$

При этом \min – параметр исключения ошибки при моделировании расчета в программе MatchCAD, $\min = 10^{-9}$.

Значения $T_{i,j}$ показывают минимальную длительность работы i -х участков при одновременной работе всех j -х станков.

Определяется фактически допустимый фонд рабочего времени (ч) всех станков конкретного типа за допустимый период работы:

$$Frv_{i,j} = D \cdot D_{ст} \cdot N_{ст} \cdot Z_{i,j}. \quad (3)$$

Производится контроль выполнимости задания в указанные сроки:

$$D \geq T_{i,j}. \quad (4)$$

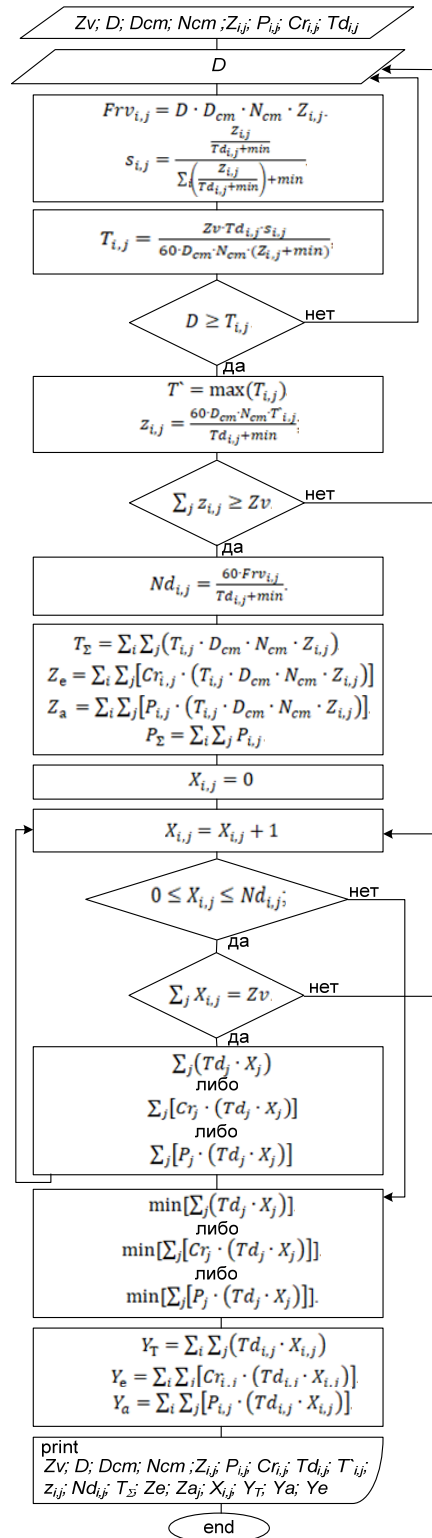


Рис. 1. Алгоритм оптимизации количества деталей $X_{i,j}$, обрабатываемых станками группы

При несоблюдении условия указанные в задании сроки невыполнимы и требуют корректировки.

При выполнении условия определяют максимальное значение $T_{i,j}$ для установления минимально возможного периода выполнения задания (T' , сут):

$$T' = \max(T_{i,j}). \quad (5)$$

В процессе определения ограничений модели уточняется возможное количество деталей, обрабатываемых каждым типом станков за время T' для контроля суммарного количества деталей, обрабатываемых всеми станками участка на соответствие заданию:

$$z_{i,j} = \frac{60D_{\text{ст}}N_{\text{ст}}T_{i,j}}{Td_{i,j} + \min}; \quad (6)$$

$$\sum_j z_{i,j} \geq Zv.$$

Максимальное количество деталей (шт.), которое возможно изготовить на станках каждого вида участка за фактически допустимый фонд рабочего времени:

$$Nd_{i,j} = \frac{60Frv_{i,j}}{Td_{i,j} + \min}. \quad (7)$$

Трудоемкость обработки (чел.ч) при выполнении производственной программы выпуска (заказа) с минимальным сроком выполнения заказа:

$$T_{\Sigma} = \sum_i \sum_j (T_{i,j} \cdot D_{\text{ст}} \cdot N_{\text{ст}} \cdot Z_{i,j}). \quad (8)$$

Эксплуатационные затраты (руб.) при условии одновременной работы всех станков участка, выполняющих заказ, т.е. при минимальном сроке выполнения заказа/ партии:

$$Z_e = \sum_i \sum_j [Cr_{i,j} \cdot (T_{i,j} \cdot D_{\text{ст}} \cdot N_{\text{ст}} \cdot Z_{i,j})]. \quad (9)$$

Затрачиваемая работа (кВт·ч) на выполнение производственной программы выпуска (заказа) при минимальном сроке производства:

$$Z_a = \sum_i \sum_j [P_{i,j} \cdot (T_{i,j} \cdot D_{\text{ст}} \cdot N_{\text{ст}} \cdot Z_{i,j})]. \quad (10)$$

Потребляемая мощность (кВт) привода станков при минимальном сроке выполнения заказа:

$$R_{\Sigma} = \sum_i \sum_j P_{i,j}. \quad (11)$$

Количество деталей, обрабатываемых станками каждого вида участка ($X_{i,j}$, шт.) в процессе оптимизации определяются условиями (ограничениями):

$$0 \leq X_{i,j} \leq Nd_{i,j}; \quad (12)$$

$$\sum_j X_{i,j} = Zv.$$

При использовании обрабатывающих центров с ЧПУ, которые включают в себя дополнительные функции – наличие дополнительного шпинделя с приводом, возможность работы в трех, четырех координатных осях, дополнительно вводится ограничение:

$$X_{2,3} = X_{3,3} = X_{1,3}. \quad (13)$$

В процессе оптимизации записываются целевые функции для каждого i -го участка, по которым осуществляется поиск минимального количества затрат на основе расчета числовых значений количества обрабатываемых деталей станками каждого участка конкретных типов (X_j):

– для трудозатрат:

$$\sum_j (Td_j \cdot X_j) = \min; \quad (14)$$

– для эксплуатационных затрат:

$$\sum_j [Cr_j \cdot (Td_j \cdot X_j)] = \min; \quad (15)$$

– для энергетических затрат:

$$\sum_j [P_j \cdot (Td_j \cdot X_j)] = \min. \quad (16)$$

После оптимизации количества деталей X_j по всем участкам основные сравниваемые показатели вариантов оптимизации для допустимого срока выполнения заказа определяются по следующим выражениям:

• Потребные трудозатраты (чел.ч) на выполнение производственной программы (партии, заказа) при допустимом сроке выполнения заказа:

$$Y_T = \sum_i \sum_j (Td_{i,j} \cdot X_{i,j}). \quad (17)$$

• Эксплуатационные затраты (руб.) при условии одновременной работы всех станков участка, выполняющих заказ, т.е. при допустимом сроке выполнения заказа:

$$Y_e = \sum_i \sum_j [Cr_{i,j} \cdot (Td_{i,j} \cdot X_{i,j})]. \quad (18)$$

• Затрачиваемая работа (кВт·ч) на выполнение производственной программы (заказа) при допустимом сроке выполнения заказа:

$$Y_a = \sum_i \sum_j \left[P_{i,j} \cdot (Td_{i,j} \cdot X_{i,j}) \right]. \quad (19)$$

При этом реализованная компьютерная модель (см. рис. 1) в математическом пакете MatchCAD производит оптимизацию значений количества деталей, обрабатываемых станками разных типов, усовершенствована путем поочередной оптимизации по минимуму эксплуатационных затрат, по минимуму энергозатрат и по минимуму трудозатрат.

Найденная разница значений между вариантом минимального срока выполнения заказа и показателями после разных вариантов оптимизации позволяет сопоставить результаты различных способов загрузки оборудования для наиболее эффективного его использования. На основе сравнения производственной программы типов станков по вариантам оптимизации находится наиболее приемлемый вариант производственной программы.

Заключение

Разработанная методика позволила составить на ее основе алгоритм расчета. Реализованная компьютерная модель в математическом пакете MatchCAD позволяет производить оптимизацию значений количества деталей, обрабатываемых в каждой группе, но станками разных типов, путем поочередной оптимизации по минимуму эксплуатационных затрат, по минимуму энергозатрат и по минимуму трудозатрат. Найденная разница значений между вариантом минимального производственного цикла изготовления партии деталей и показателями после разных вариантов оптимизации позволяет сопоставить результаты различных способов загрузки оборудования для наиболее эффективного его использования. Сравнение производственной программы типов станков по разным вариантам оптимизации дает возможность найти наиболее приемлемый вариант производственной программы реализации технического задания (заказа, партии).

Список литературы

1. Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А., Аносов М. С., Кузьмишина А. М. Интеллектуальное управление технологическими системами в условиях цифрового производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 1 (718). С. 3–12.
2. Горобец И. А. Определение критерия оптимизации системы управления токарных станков с ЧПУ // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2019. № 4 (67). С. 19–24.
3. Сидорова А. В., Пономарев Б. Б. Определение оптимального сочетания параметров управления промышленным роботом в робототехническом комплексе обработки кромок деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23, № 4 (147). С. 723–730.
4. Морозов А. С., Морозов С. А., Щенятский А. В. Параметрическая оптимизация процесса торцевой раскатки детали класса «Цилиндрическая с фланцем» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 425–433.

5. Андриюшкин А. Ю., Буцикин Е. Б., Ли Ч. Технологические подходы при проектировании топологически оптимизированных деталей // *Аэрокосмическая техника и технологии*. 2023. Т. 1, № 3. С. 102–114.
6. Клепцов А. А., Клепцова Л. Н. Методика параметрической оптимизации технологических процессов при обеспечении характеристик поверхностного слоя деталей // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2020. № 4 (140). С. 9–17.
7. Безъязычный В. Ф., Терехова А. С., Киселёв Э. В. Автоматизированный способ решения задачи выбора оптимальной технологии изготовления детали в рамках ресурсной базы конкретного производственного подразделения // *Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева*. 2020. № 3 (54). С. 43–47.
8. Оковитый В. А., Пантелеев Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М. Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методом плазменного напыления на воздухе // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 369–374.
9. Тараховский А. Ю., Богуцкий В. Б. К вопросу о подходе к оптимизации операций при обработке деталей на станках с ЧПУ // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2021. № 7. С. 19–21.
10. Анцев А. В., Пасько Н. И. Оптимизация скорости резания и периода замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019. Т. 15, № 4. С. 102–110.
11. Павлова А. Н., Кузнецова О. В. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021. № 1 (65). С. 78–87.
12. Полетаева Е. В., Горлов И. В. Оптимизация структуры производственной системы в условиях многономенклатурного машиностроительного производства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2022. № 2 (14). С. 77–82.
13. Школина Д. И., Ададунов А. С., Бехер С. А. Оптимизация ресурсов распределённых производственных процессов с использованием имитационного моделирования // *Мир транспорта*. 2022. Т. 20, № 6 (103). С. 56–63.
14. Абрамян В. Повышение технологичности выпускаемой продукции как ключевое направление снижения уровня затрат и роста эффективности машиностроительного производства // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2018. № 54 (2). С. 8–14.
15. Liu J., Wen, X., Zhou H., Sheng S., Zhao P. L., Xiaojun K., Chao, Chen Y Digital twin-enabled machining process modeling // *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol. 54 (6). P. 101737. doi: 10.1016/j.aei.2022.101737

References

1. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kuz'mishina A.M. Intelligent control of technological systems in the context of digital production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie = University proceedings. Mechanical engineering*. 2020;(1):3–12. (In Russ.)
2. Gorobets I.A. Definition of the optimization criterion for the control system of CNC lathes. *Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya = Progressive technologies and mechanical engineering systems*. 2019;(4):19–24. (In Russ.)
3. Sidorova A.V., Ponomarev B.B. Determination of the optimal combination of industrial robot control parameters in a robotic complex for edge processing of parts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):723–730. (In Russ.)
4. Morozov A.S., Morozov S.A., Shchenyatskiy A.V. Parametric optimization of the end rolling process of a part of the class “Cylindrical with flange”. *Izvestiya Tul'skogo gosudu-*

- darstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Engineering sciences. 2020;(4):425–433. (In Russ.)*
5. Andryushkin A.Yu., Butsikin E.B., Li Ch. Technological approaches in the design of topologically optimized parts. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii = Aerospace engineering and technology. 2023;1(3):102–114. (In Russ.)*
 6. Kleptsov A.A., Kleptsova L.N. Methodology of parametric optimization of technological processes in ensuring the characteristics of the surface layer of parts. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Kuzbass State Technical University. 2020;(4):9–17. (In Russ.)*
 7. Bez'yazychnyy V.F., Terekhova A.S., Kiselev E.V. An automated method for solving the problem of selecting the optimal technology for manufacturing a part within the resource base of a specific production division. *Vestnik RGATA imeni P.A. Solov'eva = Bulletin of RSATU named after P/A/ Solovyov. 2020;(3):43–47. (In Russ.)*
 8. Okovityy V.A., Panteleenko F.I., Okovityy V.V., Astashinskiy V.M. Optimization of the process of applying coatings from metal-ceramic powders by the method of plasma spraying in air. *Nauka i tekhnika = Science and technology. 2021;20(5):369–374. (In Russ.)*
 9. Tarakhovskiy A.Yu., Bogutskiy V.B. On the issue of the approach to optimization of operations during processing of parts on CNC machines. *Mekhatronika, avtomatika i roboto-tekhnika = Mechatronics, automation and robotics. 2021;(7):19–21. (In Russ.)*
 10. Antsev A.V., Pas'ko N.I. Optimization of cutting speed and tool change period in statistical adaptation mode. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2019;15(4):102–110. (In Russ.)*
 11. Pavlova A.N., Kuznetsova O.V. Mathematical modeling and optimization of technological processes. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern science-intensive technologies. Regional application. 2021;(1):78–87. (In Russ.)*
 12. Poletaeva E.V., Gorlov I.V. Optimization of the structure of the production system in the conditions of multi-product mechanical engineering production. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tver State Technical University. Series: Engineering sciences. 2022;(2):77–82. (In Russ.)*
 13. Shkolina D.I., Adadurov A.S., Bekher S.A. Optimization of distributed manufacturing process resources using simulation modeling. *Mir transporta = World of transport. 2022;20(6):56–63. (In Russ.)*
 14. Abramyan V. Improving the technological efficiency of manufactured products as a key direction for reducing costs and increasing the efficiency of mechanical engineering production. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern science-intensive technologies. Regional application. 2018;(54):8–14. (In Russ.)*
 15. Liu J., Wen, X., Zhou H., Sheng S., Zhao P.L., Xiaojun K., Chao, Chen Y Digital twin-enabled machining process modeling. *Advanced Engineering Informatics. 2022;(54):101737. doi: 10.1016/j.aei.2022.101737*

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Викторович Коновалов
 доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры технологии
 машиностроения, Пензенский
 государственный технологический
 университет (Россия, г. Пенза,
 пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
 E-mail: konovalov-penza@rambler.ru

Vladimir V. Konovalov
 Doctor of engineering sciences, professor,
 professor of the sub-department
 of mechanical engineering technology,
 Penza State Technological University
 (1a/11 Baydukova passage / Gagarina
 street, Penza, Russia)

Марина Владимировна Донцова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: dontmv@mail.ru

Marina V. Dontsova

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of mechanical
engineering technology, Penza State
Technological University (1a/11 Baydukova
passage / Gagarina street, Penza, Russia)

Александр Николаевич Расстегаев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: ran-tms@yandex.ru

Aleksandr N. Rasstegaev

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of mechanical
engineering technology, Penza State
Technological University (1a/11 Baydukova
passage / Gagarina street, Penza, Russia)

Владимир Юрьевич Зайцев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: vluzai@gmail.com

Vladimir Yu. Zaitsev

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of mechanical
engineering technology, Penza State
Technological University (1a/11 Baydukova
passage / Gagarina street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.01.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 15.02.2025

Принята к публикации / Accepted 03.03.2025