

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ЦЕЛЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМПЛЕКСА ДЕЙСТВИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЯ В ПРОЦЕССЕ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ¹

OPTIMIZATION MODEL OF TARGETS FOR THE COMPLEX OF ACTIONS ON CHANGING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE PRODUCT DURING ITS MANUFACTURE

I. Khrustaleva
M. Khrustalev
V. Khokhlovskiy
V. Shkodyrev
L. Chernyh

Summary. The work addresses the issues of multi-criteria optimization of the target indicators of the manufacturing process of products on metal-cutting machines. The effectiveness of the optimization process directly depends on its level of detail and the optimal choice of targets and control parameters. The process of changing the structure and properties of the product during its manufacture can be represented as a hierarchical model based on the decomposition of goals that must be achieved within the framework of the selected control levels. This goal hierarchy ultimately improves process efficiency through detailed analysis and optimization of targets for individual structural elements of the model. This describes a multi-level hierarchical model for optimizing the machining process, comprising five levels of control. The following control levels are identified: technological process, processing stage, technological operation, technological transition, working stroke. Control parameters, individual optimization criteria, and vector optimization criteria are defined for each structure element of the hierarchical model. The practical implementation of the developed control model is presented on the example of optimization of the target indicators of the Valik product. A graph of changing the states of a control object during its manufacture is presented. The problem of optimizing the target indicators of one of the intermediate states of the control object is solved. The practical significance of the work lies in the development of a hierarchical model, which is the basis of the software module for multi-critical optimization of the process of manufacturing products on metal-cutting machines.

Keywords: multi-criteria optimization, technological process, vector optimization criterion, particular optimization criterion, hierarchical model, structural elements, machining, technological transition, technological operation, working stroke.

Хрусталева Ирина Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»
Irina.khrustaleva@mail.ru

Хрусталев Михаил Борисович

аспирант, Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»
m320prk1@rambler.ru

Хохловский Владимир Николаевич

Кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»
78v.kh77@gmail.com

Шкодырев Вячеслав Петрович

Доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»
shkodyrev@mail.ru

Черных Лариса Георгиевна

Кандидат технических наук, ассистент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»
2904180@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы многокритериальной оптимизации целевых показателей процесса изготовления изделий на металлорежущих станках. Эффективность процесса оптимизации напрямую зависит от уровня его детализации и оптимального выбора целевых показателей и параметров управления. Процесс изменения структуры и свойств изделия в процессе его изготовления можно представить в виде иерархической модели, основанной на декомпозиции целей, которые должны быть достигнуты в рамках выделенных уровней управления. Данная иерархия целей, в конечном итоге, позволяет повысить эффективность технологического процесса за счет детального анализа и оптимизации целевых показателей отдельных структурных элементов модели. В работе описана многоуровневая иерархическая модель оптимизации процесса механической обработ-

¹ Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23–29–00551 от 13.01.2023 «Методы и алгоритмы построения интеллектуальных киберфизических систем для обеспечения семантической интероперабельности».



Введение

Возрастающий уровень конкуренции и стремительные темпы развития производства способствуют широкому внедрению цифровых технологий на все этапах производственного процесса. В рамках рыночной экономики с учетом роста уровня конкуренции среди промышленных предприятий внедрение цифровых технологий в производственный процесс является одним из ключевых условий для повышения эффективности хозяйственной деятельности предприятия. Создание многоуровневой детализированной модели производственного процесса позволяет оптимизировать параметры производственных потоков предприятия на основе многокритериального анализа.

В настоящее время вопросы многокритериальной оптимизации и внедрения цифровых технологий в производственный процесс являются одной из наиболее актуальных задач в области машиностроения, что подтверждается многочисленными публикациями в научной литературе [1–9].

Решение задачи многокритериальной оптимизации производственных процессов базируется на анализе большого объема информации не может быть эффективно решена без применения искусственного интеллекта и технологий BigData [10–12].

Широкое распространение получили методы оптимизации, в основе которых лежат графы знаний [13–16], представляющие собой семантическую сеть, описывающую структуру объекта и взаимосвязи между отдельными его элементами.

Одним из ключевых показателей эффективности работы предприятия является качество выпускаемой про-

дукции, содержащая пять уровней управления. Выделены следующие уровни управления: технологический процесс, этап обработки, технологическая операция, технологический переход, рабочий ход. Для каждого структурного элемента иерархической модели определены параметры управления, частные критерии оптимизации, а также сформированы векторные критерии оптимизации. Представлена практическая реализация разработанной модели управления на примере оптимизации целевых показателей изделия «Валик». Представлен граф изменения состояний объекта управления в процессе его изготовления. Решена задача оптимизации целевых показателей одного из промежуточных состояний объекта управления. Практическая значимость работы заключается в разработке иерархической модели, которая является основой программного модуля многокритериальной оптимизации процесса изготовления изделий на металлорежущих станках.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, технологический процесс, векторный критерий оптимизации, частный критерий оптимизации, иерархическая модель, структурные элементы, механическая обработка, технологический переход, технологическая операция, рабочих ход.

дукции. Для оптимизации данного целевого показателя применяется метод Тагути [17–20], который позволяет оценить показатели качества производимой продукции и потери, которые возникают по мере отклонения значений технического параметра изделия от номинального, в том числе и в пределах допуска.

В научной литературе представлены модели для решения задач оптимизации, в основе которых лежат генетические алгоритмы [21–25]. В основе данных алгоритмов лежит последовательность действий, состоящая в последовательном подборе, комбинировании и вариации исходных параметров.

В рамках данной работы рассмотрены вопросы оптимизации параметров технологического процесса изготовления изделий на металлорежущих станках.

Цель работы заключается в разработке иерархической модели многокритериальной оптимизации параметров технологического процесса изготовления деталей на металлорежущих станках.

Задачей исследования является структурный анализ процесса изготовления изделий на металлорежущих станках; выявление факторов, влияющих на эффективность процесса изготовления изделий на металлорежущих станках; формирование множества целевых показателей процесса и параметров управления.

Описание изделия машиностроения как объекта управления

Машиностроительное изделие как объект управления можно представить в виде структурно-сложной иерархической модели, в основе которой лежит декомпозиция процесса его изготовления, описанная в виде

четкой последовательности изменения состояний объекта управления на этапах его производства.

Структурная иерархическая модель изделия является базовым элементом построения оптимизационной модели. Эффективность процесса оптимизации целевых показателей напрямую зависит от уровня детализации объекта управления при разработке иерархической модели.

Процесс изготовления изделия на металлорежущих станках сопровождается изменением структуры и свойств исходной заготовки в результате реализации соответствующего комплекса последовательных действий.

Предложенная иерархическая модель, описывающая изменение структуры и свойства объекта управления в процессе его изготовления, содержит пять уровней управления (рисунок 1).

Первый уровень описывает объект управления в рамках технологического процесса и имеет два состояния: $S_{заг}$ — состояние изделия до начала процесса обработки и $S_{изд}$ — состояние изделия после завершения выполнения всех технологических операций.

Условие перехода объекта управления из состояния $S_{заг}$ в состояние $S_{изд}$ может быть описано следующим выражением (1):

$$S_{заг} = f(S_{заг}, U_1), U_1 \in D \quad (1)$$

где U_1 — вектор управляемых параметров на первом уровне управления; D — множество управляемых параметров объекта управления.

Частными критериями оптимизации, на первом уровне управления, являются $G_1^{изд}$ — трудоемкость изготовления изделия в рамках технологического процесса, час.; $G_2^{изд}$ — величина оперативных затрат в рамках технологического процесса (ОРЕХ), руб.; $G_3^{изд}$ — индекс точности достижения заданных технических параметров в рамках технологического процесса; $G_4^{изд}$ — величина капитальных затрат, необходимых для изготовления изделия (СОРЕХ), руб.

Таким образом, векторный критерий оптимизации для первого уровня управления может быть записан в следующем виде (2):

$$F^{изд}(U_1) = (G_1^{изд}(U_1), G_2^{изд}(U_1), G_3^{изд}(U_1), G_4^{изд}(U_1)) \quad (2)$$

Вектор U_1 содержит два параметра управления N_{tr} — количество этапов обработки, шт.; $Type_{tr}$ — тип обработки в рамках этапа обработки.

Второй уровень управления описывает состояние объекта управления в рамках этапа обработки. На данном этапе объект управления имеет следующие состояния (3):

$$S_{21} \rightarrow S_{22} \rightarrow \dots \rightarrow S_{2(k-1)} \rightarrow S_{2k}, \quad (3)$$

где k — количество этапов обработки в рамках технологического процесса, шт.

Условие перехода объекта управления из состояния S_{k-1} в состояние S_k может быть описано следующим выражением (4):

$$S_{2k} = f(S_{2(k-1)}, U_2), U_2 \in D, \quad (4)$$

где U_2 — вектор управляемых параметров на втором уровне управления.

Вектор управляемых параметров U_2 содержит следующие компоненты: N_{op} — количество технологических операций в рамках этапа обработки, шт.; $Type_{eq}$ — тип применяемого оборудования в рамках этапа обработки.

Частными критериями оптимизации на втором уровне управления являются $(G_1^{эо})_{2k}$ — трудоемкость изготовления изделия в рамках k -ого этапа обработки, час.; $(G_2^{эо})_{2k}$ — величина оперативных затрат в рамках k -ого этапа обработки (ОРЕХ), руб.; $(G_3^{эо})_{2k}$ — индекс точности достижения заданных технических параметров в k -ого рамках этапа обработки.; $(G_4^{эо})_{2k}$ — величина капитальных затрат, необходимых для реализации k -ого этапа обработки (СОРЕХ), руб.

Исходя из этого, векторный критерий оптимизации на втором уровне управления для k -ого этапа обработки будет иметь вид (5):

$$F_{2k}^{эо}(U_2) = ((G_1^{эо})_{2k}(U_2), (G_2^{эо})_{2k}(U_2), (G_3^{эо})_{2k}(U_2), (G_4^{эо})_{2k}(U_2)) \quad (5)$$

Третий уровень описывает состояние объекта управления после реализации технологической операции. На третьем уровне объект управления имеет следующую последовательность промежуточных состояний (6):

$$S_{31}^{заг-21} \rightarrow \dots \rightarrow S_{3(n-1)}^{2k-изд} \rightarrow S_{3n}^{2k-изд}, \quad (6)$$

где k — количество этапов обработки в рамках технологического процесса, шт.; n — количество промежуточных состояний объекта управления в рамках этапа обработки, шт.

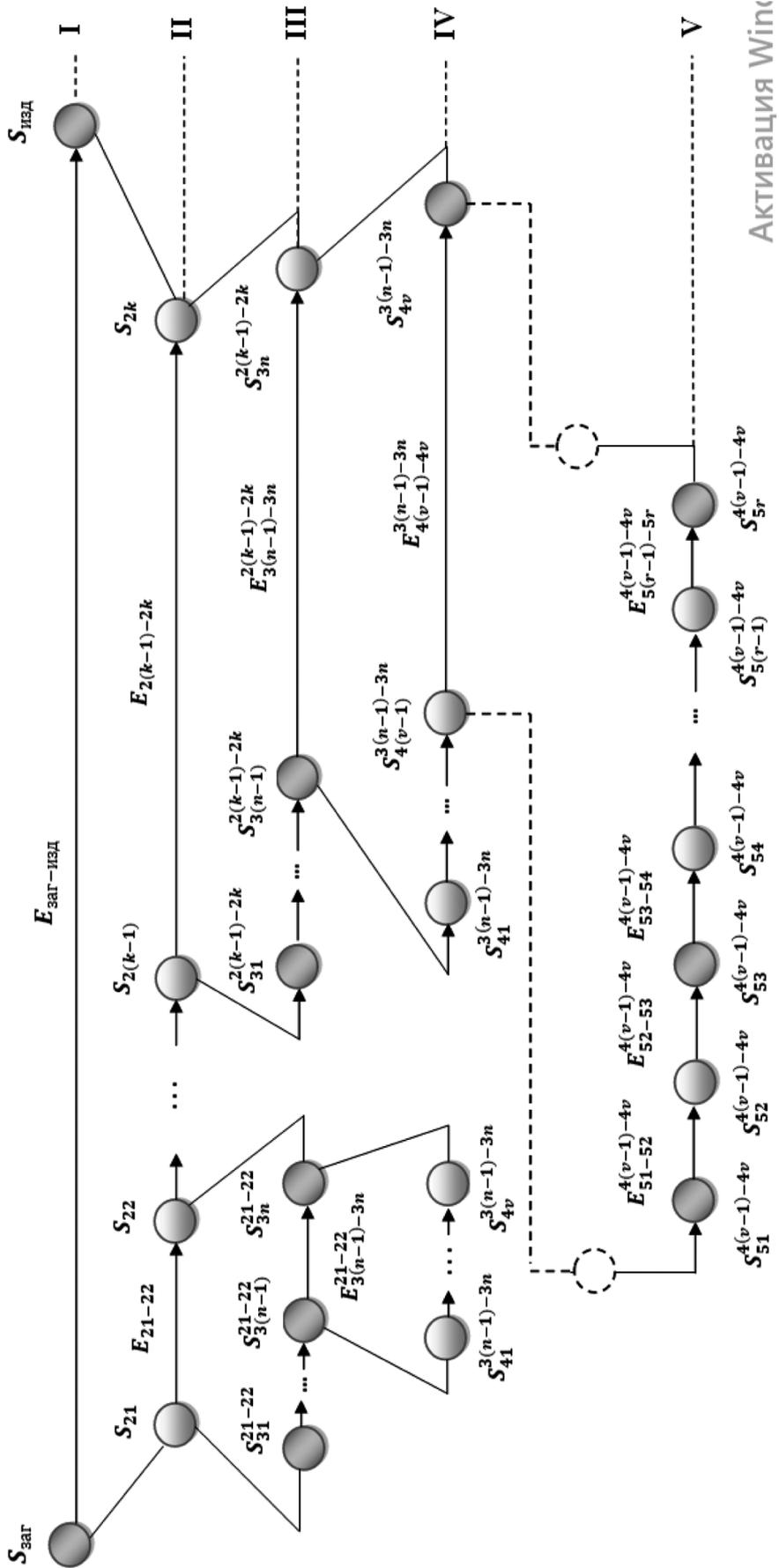


Рис. 1. Иерархическая модель уровней управления машиностроительного изделия

Условие перехода объекта управления из состояния $S_{3(n-1)}^{2k-изд}$ в состояние $S_{3n}^{2k-изд}$ можно описать выражением (7):

$$S_{3n}^{2k-изд} = f\left(S_{3(n-1)}^{2k-изд}, U_3\right), U_3 \in D, \quad (7)$$

где U_3 — вектор управляемых параметров в рамках третьего уровня управления.

Векторный критерий оптимизации для третьего уровня управления описывается выражением (8):

$$F_{3n}^{TO}(U_3) = ((G_1^{TO})_{3n}(U_3), (G_2^{TO})_{3n}(U_3), (G_3^{TO})_{3n}(U_3)), \quad (8)$$

где $(G_1^{TO})_{3n}$ — трудоемкость выполнения работ в рамках n -ой технологической операции, час.; $(G_2^{TO})_{3n}$ — величина оперативных затрат в рамках n -ой технологической операции (ОРЕХ), руб.; $(G_3^{TO})_{3n}$ — индекс точности достижения заданных технических параметров в рамках n -ой технологической операции.

Вектор управляемых параметров U_3 содержит четыре компонента N_{tt} — количество технологических переходов в рамках технологической операции, шт.; $Type_{eq-u}$ — модель технологического оборудования, применяемого в рамках технологической операции; $Type_{if}$ — модель установочно-зажимного приспособления, применяемого в рамках технологической операции; $(Type_{pM})_{1...k}$ — методы формообразования, применяемые в рамках технологических переходов 1...v.

На четвертом уровне управления производится оптимизация параметров в рамках технологического перехода. В данном случае объект управления имеет следующую последовательность состояний (9):

$$S_{41}^{3(n-1)-3n} \rightarrow \dots \rightarrow S_{4(v-1)}^{3(n-1)-3n} \rightarrow S_{4v}^{3(n-1)-3n} \quad (9)$$

где v — количество состояний объекта управления в рамках технологической операции, шт.

Частными критериями оптимизации на четвертом уровне управления являются: $(G_1^{TO})_{4v}$ — трудоемкость выполнения работ в рамках v -ого технологического перехода, час.; $(G_2^{TO})_{4v}$ — величина оперативных затрат в рамках v -ого технологического перехода (ОРЕХ), руб.; $(G_3^{TO})_{4v}$ — индекс точности достижения заданных технических параметров в рамках v -ого технологического перехода.

Таким образом, векторный критерий оптимизации для v -ой технологического перехода будет иметь вид (10):

$$F_{4v}^{TO}(U_4) = ((G_1^{TO})_{4v}(U_4), (G_2^{TO})_{4v}(U_4), (G_3^{TO})_{4v}(U_4)) \quad (10)$$

Условие перехода объекта управления из состояния $S_{4(v-1)}^{3(n-1)-3n}$ в состояние $S_{4v}^{3(n-1)-3n}$ можно описать выражением (11):

$$S_{4v}^{3(n-1)-3n} = f\left(S_{4(v-1)}^{3(n-1)-3n}, U_4\right), U_4 \in D, \quad (11)$$

где U_4 — вектор управляемых параметров в рамках четвертого уровня управления.

Вектор управляемых параметров U_4 содержит два компонента $Type_{ct}$ — модель режущего инструмента, применяемого в рамках технологического перехода; $Type_{pSh}$ — схема траектории движения режущего инструмента.

На пятом уровне изменение состояний объекта управления производится в результате выполнения отдельных рабочих ходов и может быть описано в виде следующей последовательности (12):

$$S_{51}^{4(m-1)-4m} \rightarrow \dots \rightarrow S_{5(r-1)}^{4(m-1)-4m} \rightarrow S_{5r}^{4(m-1)-4m}, \quad (12)$$

где r — количество промежуточных состояний объекта управления в рамках технологического перехода, шт.

Условие перехода объекта управления из состояния $S_{5(r-1)}^{4(m-1)-4m}$ в состояние $S_{5r}^{4(m-1)-4m}$ может быть описано выражением (13):

$$S_{5r}^{4(m-1)-4m} = f\left(S_{5(r-1)}^{4(m-1)-4m}, U_5\right), U_5 \in D, \quad (13)$$

где U_5 — вектор управляемых параметров в рамках пятого уровня управления.

Вектор управляемых параметров U_5 содержит три компонента: S — величина подачи; V — величина скорости резания, м/мин; t — величина глубины резания, мм.

Векторный критерий оптимизации имеет вид (14):

$$F_{5r}^{PX}(U) = ((G_1^{PX})_{5r}(U), (G_2^{PX})_{5r}(U), (G_3^{PX})_{5r}(U)), \quad (14)$$

где $(G_1^{PX})_{5r}$ — трудоемкость выполнения работ в рамках r -ого рабочего хода, час.; $(G_2^{PX})_{5r}$ — величина оперативных затрат в рамках r -ого рабочего хода (ОРЕХ), руб.; $(G_3^{PX})_{5r}$ — индекс точности достижения заданных технических параметров в рамках r -ого рабочего хода.

Оптимизация параметров обработки

В рамках технологической подготовки производства поставлена задача оптимизации параметров процесса изготовления детали «Валик» (рисунок 2).

На рисунке 3 представлен граф изменения состояний объекта управления в процессе его изготовления.

В работе рассмотрен пример оптимизации целевых показателей для промежуточного состояния объекта управления S_{55}^{31-41} . В действующем технологическом процессе установлены следующие значения параметров резания: $V = 294$, $s = 0,058$, $t = 0.5$ мм. В данном случае целевые показатели имеют следующие значения: $(G_1^{PX})_{55} = 1,094$; $(G_2^{PX})_{55} = 0,37625$; $(G_3^{PX})_{55} = 0,812919$.

Цель оптимизации: снижение значения целевого показателя $(G_3^{PX})_{55}$ не менее, чем на 8,5 %, при этом увеличение значения целевого показателя $(G_1^{PX})_{55}$ не должно превышать 20 %.

Оптимизация значений целевых показателей (частных критериев оптимизаций) производилась при фикси-

рованном значении глубины резания $t = const = 0,5$ мм. Для параметров управления V — скорость резания и s — подача установлены следующие диапазоны допустимых значений:

$$V \in [285; 330]$$

$$s \in [0.04; 0.07]$$

Графики зависимости значений частных критериев оптимизации от параметров управления для промежуточного состояния объекта управления S_{55}^{31-41} при фиксированной глубине резания 0,5 мм представлены на рисунке 4.

На основе программного модуля был проведен анализ возможных комбинаций значений параметров управления в пределах установленных диапазонов. В результате анализа было выявлено, что условиям оптимизации соответствуют 27 комбинаций параметров резания (скорости резания и подачи) при фиксированной глубине резания $t = 0.5$ мм (рисунок 5).

Выбор оптимальной комбинации значений параметров резания был произведен исходя из условия (15):

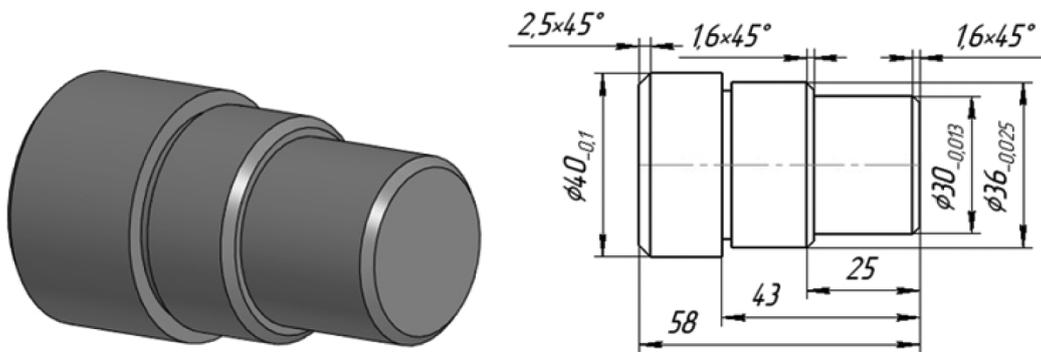


Рис. 2. Модель детали «Втулка»

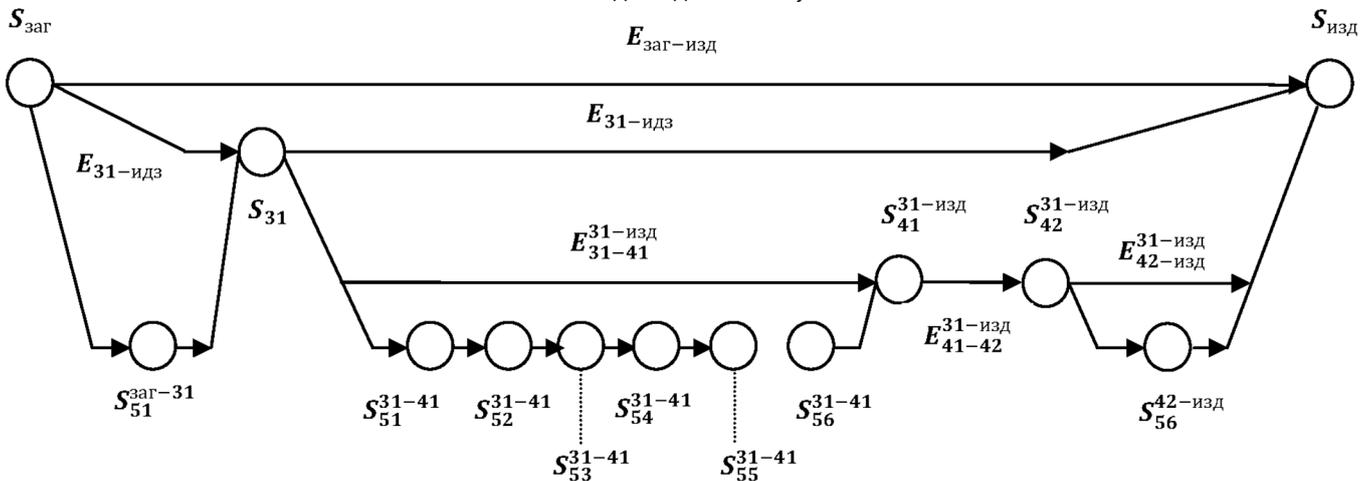
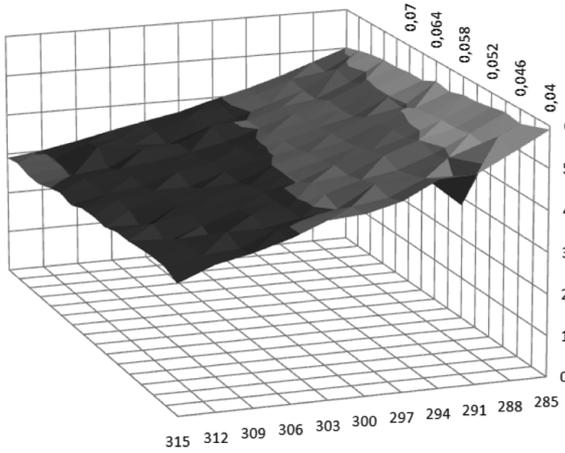
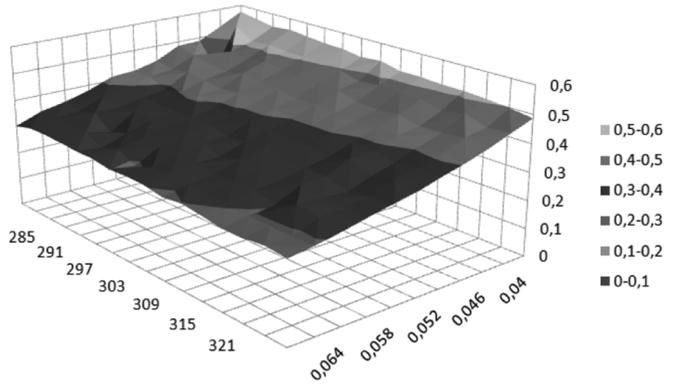


Рис. 3. Граф изменения состояний изделия «Валик» в процессе его изготовления

Зависимость трудоемкости от скорости резания и подачи при глубине резания $t=0.5$ мм



Зависимость величины затрат от подачи и скорости резания при глубине резания $t=0.5$ мм



Зависимость значения индекса точности от скорости резания и подачи при глубине резания $t=0.5$ мм

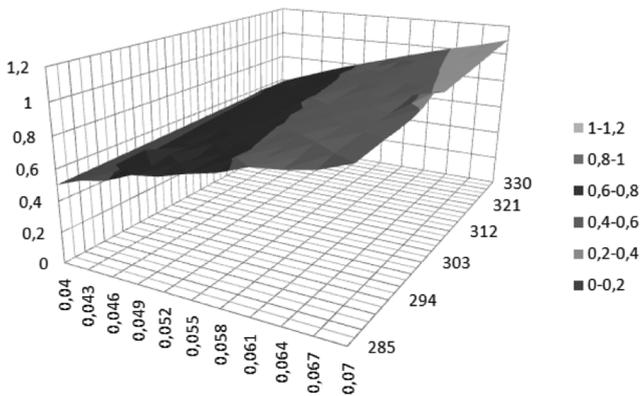


Рис. 4. Графики зависимости значений частых критериев оптимизации для промежуточного состояния объекта управления S_{55}^{31-41} при глубине резания $t = 0,5$ мм

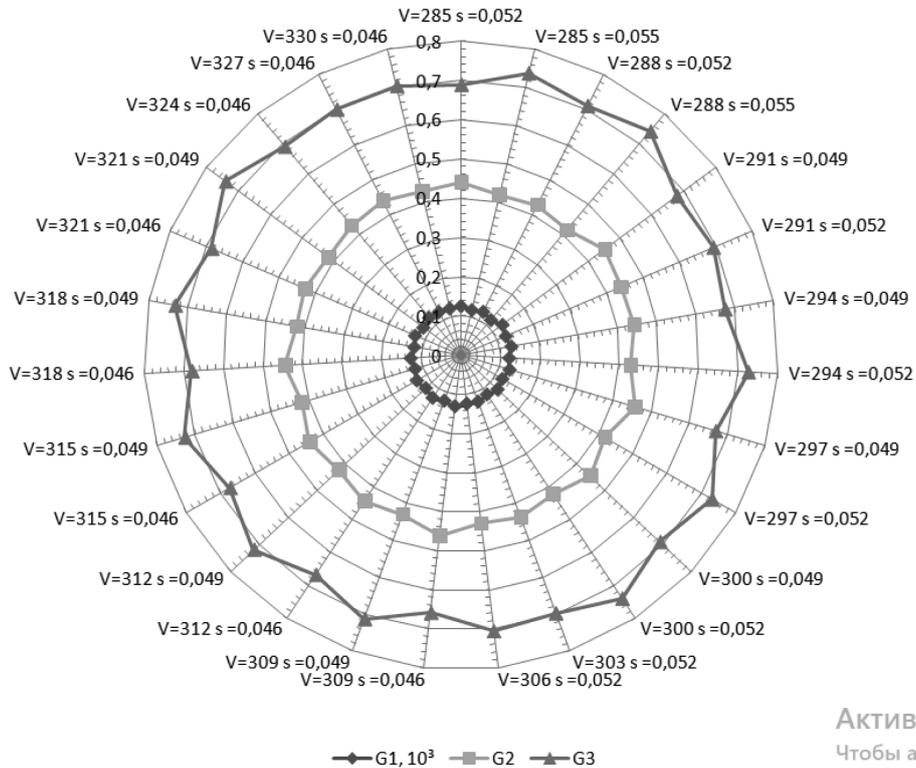


Рис. 5. Допустимые варианты комбинаций параметров резания, удовлетворяющих условиям оптимизации

Актив:
Чтобы а1

$$(G_3^{PX})_{55} \rightarrow \min \quad (15)$$

С учетом условия (14) были установлены следующие оптимальные значения параметров резания: $V = 309, s = 0,046$

Выводы

В результате многокритериальной оптимизации для промежуточного состояния объекта управления S_{55}^{41-31} в качестве оптимальных были установлены следующие значения целевых показателей (частных критериев оптимизации): частный критерий оптимизации $(G_1^{PX})_{55} = 1,313$; частный критерий оптимизации

$$(G_2^{PX})_{55} = 0,463264; \text{ частный критерий оптимизации} \\ (G_3^{PX})_{55} = 0,658613.$$

Снижение значения целевого показателя $(G_3^{PX})_{55}$ составляет 18,98 %, при этом увеличение целевого показателя $(G_1^{PX})_{55}$ — 19,96 %, что удовлетворяет условиям поставленной задачи.

Таким образом, многокритериальная оптимизация позволяет повысить эффективность процесса изготовления изделия на металлорежущих станках в условиях ограничения ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

- Mingxu Fan, Xiaoqin Zhou, Jinzhou Song, Experimental investigation on cutting force and machining parameters optimization in in-situ laser-assisted machining of glass-ceramic, *Optics & Laser Technology*, Volume 169, 2024, 110109, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110109>.
- Weiyi Li, Songping He, Xinyong Mao, Bin Li, Chaochao Qiu, Jinwen Yu, Fangyu Peng, Xin Tan, Multi-agent evolution reinforcement learning method for machining parameters optimization based on bootstrap aggregating graph attention network simulated environment, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 67, 2023, Pages 424–438, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.015>.
- Fatlume Zhujani, Georgi Todorov, Konstantin Kamberov, Fitore Abdullahu, Mathematical modeling and optimization of machining parameters in CNC turning process of Inconel 718 using the Taguchi method, *Journal of Engineering Research*, 2023, ISSN 2307-1877, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.029>.
- Weiyi Li, Bin Li, Songping He, Xinyong Mao, Chaochao Qiu, Yue Qiu, Xin Tan, A novel milling parameter optimization method based on improved deep reinforcement learning considering machining cost, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 84, 2022, Pages 1362–1375, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.11.015>.
- I.N. Khrustaleva, TA Larionova, S.A. Lyubomudrov, LG Chernykh, S N Stepanov Automating production engineering for custom and small-batch production on the basis of simulation modeling. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1753. paper № 012047.
- Dmitri Kostenko, Vyacheslav Shkodyrev, Vadim Onufriev Solving Multicriteria Optimization Problem for an Oil Refinery Plant // *roceedings of International Scientific Conference on Telecommunications, Computing and Control*. 2021, pp/ 131–140
- Kostenko, D., Arseniev, D., Shkodyrev, V., Onufriev, V. Pareto optimization in oil refinery // *Communications in Computer and Information Science*. 2020, pp. 26–33.
- Kudryavtsev, Evgeniy. (2018). Automation of optimization of discrete technological processes. *MATEC Web of Conferences*. 196. 04067. 10.1051/mateconf/201819604067.
- Efimov, Alexey & Gorkavyy, Mikhail & Egorova, Valeria & Gorkavyy, Alexander. (2021). Optimization of Technological Parameters of Robotized Mechanical Processing Processes of Aviation Products. 10.1007/978-3-030-69421-0_22.
- Xingsen Li, Defa Liu, Junwen Sun, Zhengxiang Zhu, Challenges of Industrial Engineering in Big Data Environment and Its new Directions on Extension Intelligence, *Procedia Computer Science*, Volume 214, 2022, Pages 1561–1567, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.344>.
- Youliang Zhou, Integrated development of industrial and regional economy using big data technology, *Computers and Electrical Engineering*, Volume 109, Part A, 2023, 108764, ISSN 0045-7906, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108764>.
- Bo Yang, Research on Vehicle Detection and Recognition Technology Based on Artificial Intelligence, *Microprocessors and Microsystems*, 2023, 104937, ISSN 0141-9331, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104937>.
- Zhen Bi, Siyuan Cheng, Jing Chen, Xiaozhuan Liang, Feiyu Xiong, Ningyu Zhang, Relphormer: Relational Graph Transformer for Knowledge Graph Representations, *Neurocomputing*, Volume 566, 2024, 127044, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.127044>.
- Youzi Xiao, Shuai Zheng, Jiancheng Shi, Xiaodong Du, Jun Hong, Knowledge graph-based manufacturing process planning: A state-of-the-art review, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 70, 2023, Pages 417–435, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.08.006>.
- Jin Li, Jinpeng Xiang, Jianhua Cheng, EARR: Using rules to enhance the embedding of knowledge graph, *Expert Systems with Applications*, Volume 232, 2023, 120831, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120831>.
- Gurinder Kaur, Fei Liu, Yi-Ping Phoebe Chen, A deep learning knowledge graph neural network for recommender systems, *Machine Learning with Applications*, Volume 14, 2023, 100507, ISSN 2666-8270, <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2023.100507>.
- Umesh Khandey, Vedpal Arya, Optimization of multiple surface roughness characteristics of mild steel turned product using weighted principal component and Taguchi method, *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.298>.
- Paramjit Singh Bilga, Sehijpal Singh, Raman Kumar, Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method, *Journal of Cleaner Production*, Volume 137, 2016, Pages 1406–1417, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.220>.
- Erhan Cetin, Chamberlain Tagni Fossi, Experimental investigation on mechanical strength of adhesively bonded 3D-printed joints under hygrothermal conditions using Taguchi method, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 126, 2023, 103472, ISSN 0143-7496, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103472>.

20. Cristian Pérez-Salinas, Christian Castro-Miniguano, Edwin Moya-Moya, Leonardo Goyos, Analysis of surface roughness and delamination factor applied to the drilling of hybrid polymeric composite materials by the Taguchi method, *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.437>.
21. Shuai Liu, Xu Meng, Zhipeng Yuan, Limin Ren, Liheng Chen, Optimization design of space radiation cooler based on response surface method and genetic algorithm, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 50, 2023, 103437, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103437>.
22. Liqiang Yang, Pan Wang, Jie Wang, Research on evaluation model for vehicle interior sound quality based on an optimized BiLSTM using genetic algorithm, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 204, 2023, 110827, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110827>.
23. Giovanni Acampora, Angela Chiatto, Autilia Vitiello, Genetic algorithms as classical optimizer for the Quantum Approximate Optimization Algorithm, *Applied Soft Computing*, Volume 142, 2023, 110296, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110296>.
24. Nicolas Kirchner-Bossi, Fernando Porté-Agel, Wind farm power density optimization according to the area size using a novel self-adaptive genetic algorithm, *Renewable Energy*, Volume 220, 2024, 119524, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119524>.
25. Chenglong Li, Tianqi Yang, Hao Luo, Liang Tong, Pierre Bénard, Richard Chahine, Jinsheng Xiao, Multi-objective optimization of breakthrough times for hydrogen purification through layered bed pressure swing adsorption based on genetic algorithm and artificial neural network model, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.357>.

© Хрусталева Ирина Николаевна (Irina.khrustaleva@mail.ru); Хрусталева Михаил Борисович (m320prk1@rambler.ru);

Хохловский Владимир Николаевич (78v.kh77@gmail.com); Шкодырев Вячеслав Петрович (shkodyrev@mail.ru);

Черных Лариса Георгиевна (2904180@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»