

УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

CONTROL, MODELING, AUTOMATION

Научная статья
УДК 62-519
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-2-7-20>
EDN YWJDNM

Иерархическая модель оптимизации технологических параметров комплекса рабочих переходов для процесса механической обработки

Я. Ю. Бровкина[✉], И. Н. Хрусталева, М. Б. Хрусталев, В. Н. Хохловский, В. П. Шкодырев

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, zoom87@list.ru[✉]*

Аннотация. Оптимизация параметров процесса изготовления изделия является одной из ключевых задач технологической подготовки производства. Технологический процесс механической обработки имеет сложную иерархическую структуру. Эффективность оптимизации процесса изготовления изделия напрямую зависит от уровня его детализации и оптимального выбора целевых показателей и параметров управления. В данном случае технологический процесс механической обработки как объект управления можно описать в виде иерархической модели. Таким образом, задача оптимизации технологического процесса механической обработки заключается в определении оптимальных значений параметров управления для каждого структурного элемента (промежуточного состояния объекта управления) иерархической модели управления. Целью работы является разработка иерархической модели оптимизации параметров комплекса рабочих переходов для операций механической обработки. Описана структура иерархической модели процесса изготовления изделия на металлорежущих станках. В рамках разработанной модели выделены пять уровней управления, определены параметры управления для отдельных структурных элементов модели, а также взаимосвязь между ними. Для промежуточных состояний объекта управления (структурных элементов) представлено описание единичных и векторных критериев оптимизации. Представлена практическая реализация разработанной модели управления на примере оптимизации технологических параметров для детали «Втулка». Применение разработанной модели управления позволит повысить эффективность технологического процесса изготовления изделия на металлорежущих станках за счет оптимизации технологических параметров на основе многокритериального анализа на этапе технологической подготовки производства.

Ключевые слова: технологический процесс, векторный критерий оптимизации, частный критерий оптимизации, иерархическая модель, структурные элементы, механическая обработка, технологический переход, технологическая операция

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

Для цитирования: Бровкина Я. Ю., Хрусталева И. Н., Хрусталев М. Б., Хохловский В. Н., Шкодырев В. П. Иерархическая модель оптимизации технологических параметров комплекса рабочих переходов для процесса механической обработки // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-2-7-20>. EDN YWJDNM.

Original article

A hierarchical model for optimizing the technological parameters of a complex of working transitions for the machining process

Ya. Yu. Brovkina[✉], I. N. Khrustaleva, M. B. Khrustalev, V. N. Khokhlovskiy, V. P. Shkodyrev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, zoom87@list.ru[✉]

Abstract. Optimization of the parameters of the product manufacturing process is one of the key tasks of technological preparation of production. The technological process of mechanical processing has a complex hierarchical structure. The effectiveness of optimizing the manufacturing process of a product directly depends on the level of its detail and the optimal choice of targets and control parameters. In this case, the technological process of mechanical processing, as an object of control, can be described in the form of a hierarchical model. Thus, the task of optimizing the technological process of mechanical processing is to determine the optimal values of control parameters for each structural element (intermediate state of the control object) of the hierarchical control model. The aim of the work is to develop a hierarchical model for optimizing the parameters of a complex of working transitions for machining operations. The structure of the hierarchical model of the product manufacturing process on metal-cutting machines is described. Within the framework of the developed model, five control levels are identified, control parameters for individual structural elements of the model are defined, as well as the relationship between them. For the intermediate states of the control object (structural elements), a description of single and vector optimization criteria is presented. The practical implementation of the developed control model is presented using the example of optimizing the technological parameters for the *Bushing* part. The application of the developed control model will increase the efficiency of the technological process of manufacturing products on metal-cutting machines by optimizing technological parameters based on a multi-criteria analysis at the stage of technological preparation of production.

Keywords: technological process, vector optimization criterion, particular optimization criterion, hierarchical model, structural elements, mechanical processing, technological transition, technological operation

Acknowledgements: the research was carried out with the support of the Russian Academy of Sciences grant No. 23-29-00551 dated 13.01.2023 “Methods and algorithms for building intelligent cyberphysical systems to ensure semantic interoperability”.

For citation: Brovkina Ya. Yu., Khrustaleva I. N., Khrustalev M. B., Khokhlovskiy V. N., Shkodyrev V. P. A hierarchical model for optimizing the technological parameters of a complex of working transitions for the machining process. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics.* 2024;2:7-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-2-7-20>. EDN YWJDNM.

Введение

Быстрые темпы развития производства и высокая конкуренция способствуют все более широкому внедрению цифровых технологий в производственный процесс. В современных экономических условиях цифровизация производственных процессов является одним из основных направлений развития промышленных предприятий [1]. Цифровые технологии позволяют значительно повысить эффективность хозяйственной деятельности предприятия за счет создания многоуровневой системы, позволяющей оптимизировать параметры производственных потоков на основе многокритериального анализа [2].

Проблеме оптимизации производственных процессов и внедрения цифровых технологий посвящено большое количество научных работ [3–12]. Современные цифровые технологии, такие как Интернет вещей, облачные вычисления, аналитика больших данных и искусственный интеллект, позволяют значительно повысить эффективность производственного процесса [13].

В основе оптимизации производственных процессов лежит аналитика большого объема данных,

включающая сбор данных, их обработку и анализ на основе разработанных методов и алгоритмов [14–16].

В настоящее время для решения задач оптимизации широко применяются графы знаний [17, 18]. Граф знаний представляет собой семантическую сеть, в которой содержится информация о структурных элементах объекта исследования и связях между ними. Применение графов знаний для решения практических производственных задач рассмотрено в работах [19–21].

Также широкое распространение для решения задач оптимизации получили методы, базирующиеся на генетических алгоритмах, основанных на естественном процессе отбора, имитирующем биологическую эволюцию [18]. Примеры решения задач оптимизации, в основе которых лежит генетический алгоритм, представлены в работах [22–24].

В научной литературе также представлены примеры решения задач оптимизации, основанные на методе прямого поиска [25–28]. Данная группа методов относится к методам нулевого порядка, которые предполагают использование только значения функции и неиспользование ее производной.

Одним из ключевых показателей эффективности работы предприятия является качество выпускаемой продукции. Для оптимизации данного целевого показателя применяется метод Тагути [29–31], который позволяет оценить показатели качества производимой продукции и потери, возникающие по мере отклонения значений технического параметра изделия от номинального, в том числе и в пределах допуска.

Целью исследования является разработка модели оптимизации технологических параметров процесса механической обработки для повышения ее эффективности.

Задачами исследования являются анализ факторов, влияющих на эффективность механической обработки; разработка иерархической модели процесса обработки изделий на металлорежущих станках; формирование векторных критериев оптимизации для структурных элементов модели.

Объектом управления является процесс обработки изделия на металлорежущих станках.

Изделие как объект управления

Переход объекта управления из состояния заготовки в состояние готового изделия происходит на основе реализации технологического процесса, содержащего четкую последовательность действий,

направленных на изменение структуры и свойств исходной заготовки, в результате выполнения которых получается изделие с заданными техническими параметрами, с применением специализированной оснастки и технологического оборудования. В рамках данной работы будет рассмотрен процесс изготовления изделия на металлорежущих станках.

Объект управления представляет собой описание четкой последовательности промежуточных состояний изделия в процессе его изготовления и средств, необходимых для перехода объекта управления из $(i - 1)$ -го состояния в (i) -е состояние.

Процесс изменения структуры и свойств изделия в процессе его изготовления можно представить в виде 5-уровневой иерархической модели, содержащей следующие уровни управления:

- уровень № 1 – технологический процесс;
- уровень № 2 – этап обработки;
- уровень № 3 – технологическая операция;
- уровень № 4 – технологический переход;
- уровень № 5 – рабочий ход.

На первом уровне объект управления имеет два состояния: $S_{\text{заг}}$ – состояние изделия до начала процесса обработки, $S_{\text{изд}}$ – состояние изделия после завершения выполнения всех технологических операций (рис. 1).

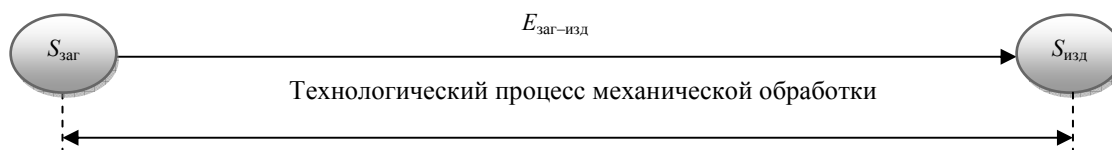


Рис. 1. Граф первого уровня управления объектом «Изделие»: $E_{\text{заг-изд}}$ – условия перехода объекта управления из состояния $S_{\text{заг}}$ в состояние $S_{\text{изд}}$

Fig. 1. Graph of the first level of control of the *Product* object: $E_{\text{заг-изд}}$ – conditions of control object transition from $S_{\text{заг}}$ to $S_{\text{изд}}$ state

Задачами данного уровня управления являются:

- оптимизация количества этапов обработки в рамках технологического процесса;
- оптимизация типов обработки в рамках каждого этапа.

Частными критериями оптимизации для данного уровня управления будут являться: $G_1^{\text{изд}}$ – трудоемкость изготовления изделия в рамках технологического процесса, ч; $G_2^{\text{изд}}$ – величина оператив-

ных затрат в рамках технологического процесса, руб.; $G_3^{\text{изд}}$ – индекс точности достижения заданных технических параметров в рамках технологического процесса; $G_4^{\text{изд}}$ – величина капитальных затрат, необходимых для изготовления изделия, руб.

Таким образом, векторный критерий оптимизации будет иметь вид

$$F^{\text{изд}}(U) = (G_1^{\text{изд}}(U), G_2^{\text{изд}}(U), G_3^{\text{изд}}(U), G_4^{\text{изд}}(U)),$$

где U – вектор параметров управления.

Параметрами управления в рамках данного уровня управления будут являться: $N_{\text{тр}}$ – количество этапов обработки, шт.; $\text{Type}_{\text{тр}}$ – тип обработки в рамках этапа обработки.

На втором уровне переход объекта управления из состояния $S_{2(k-1)}^{\text{ЭО}}$ в состояние $S_k^{\text{ЭО}}$ производится в рамках этапа обработки (рис. 2).

Бровкина Я. Ю., Хрусталева И. Н., Хрусталева М. Б., Шкодрев В. П. Иерархическая модель оптимизации технологических параметров комплекса рабочих переходов для процесса механической обработки

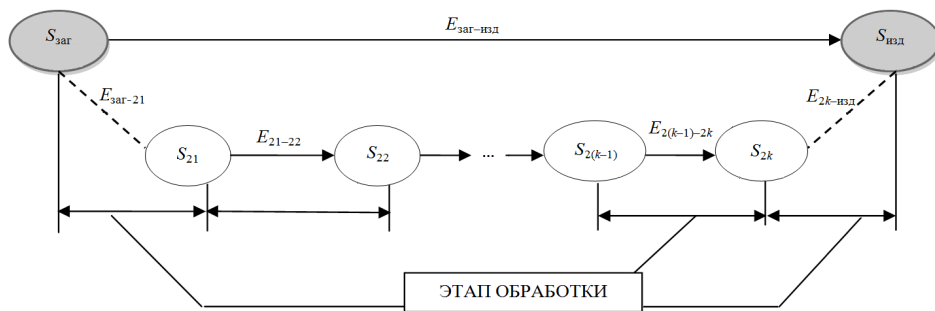


Рис. 2. Граф второго уровня управления объектом «Изделие»:

$S_{21}, S_{22}, S_{2(k-1)}, S_{2k}$ – $1-k$ -е промежуточные состояния объекта на втором уровне управления;
 $E_{zag-21}, E_{21-22}, E_{2(k-1)-2k}, E_{2k-изд}$ – условия изменения промежуточных состояний объекта управления $S_{zag} \Rightarrow S_{21}, S_{21} \Rightarrow S_{22}, S_{2(k-1)} \Rightarrow S_{2k}, S_{2k} \Rightarrow S_{изд}$; k – количество промежуточных состояний объекта на втором уровне управления

Fig. 2. Graph of the second level of control of the *Product* object:

$S_{21}, S_{22}, S_{2(k-1)}, S_{2k}$ – $1-k$ -th intermediate states of the object at the second control level;
 $E_{zag-21}, E_{21-22}, E_{2(k-1)-2k}, E_{2k-изд}$ – conditions of control object transition $S_{zag} \Rightarrow S_{21}, S_{21} \Rightarrow S_{22}, S_{2(k-1)} \Rightarrow S_{2k}, S_{2k} \Rightarrow S_{изд}$; k – number of intermediate object states in the second control level

Задачами второго уровня управления являются:
 – оптимизация технологического маршрута в рамках этапа обработки;
 – оптимизация количества технологических операций в рамках этапа обработки.

Частными критериями оптимизации для второго уровня управления будут являться: $(G_1^{\exists 0})_{2k}$ – трудоемкость изготовления изделия в рамках k -го этапа обработки, ч; $(G_2^{\exists 0})_{2k}$ – величина оперативных за-

трат в рамках k -го этапа обработки, руб.; $(G_3^{\exists 0})_{2k}$ – индекс точности достижения заданных технических параметров в рамках k -го этапа обработки; $(G_4^{\exists 0})_{2k}$ – величина капитальных затрат, необходимых для реализации k -го этапа обработки, руб.

Таким образом, векторный критерий оптимизации для k -го этапа обработки будет иметь вид

$$F_{2k}^{\exists 0}(U) = ((G_1^{\exists 0})_{2k}(U), (G_2^{\exists 0})_{2k}(U), (G_3^{\exists 0})_{2k}(U), (G_4^{\exists 0})_{2k}(U)).$$

Параметрами управления в рамках данного этапа будут являться: N_{op} – количество технологических операций в рамках этапа обработки, шт.; $Тур_{eq}$ – тип применяемого оборудования в рамках

этапа обработки.
 На третьем уровне объект управления имеет следующие промежуточные состояния:

$$S_{31}^{zag-21} \rightarrow \dots \rightarrow S_{3n}^{zag-21} \dots \rightarrow S_{31}^{2(k-1)-2k} \rightarrow \dots \rightarrow S_{3n}^{2(k-1)-2k},$$

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

Переход объекта управления из состояния $S_{3(n-1)}^{2(k-1)-2k}$ в состояние $S_{3n}^{2(k-1)-2k}$ производится в рамках выполнения технологической операции (рис. 3).

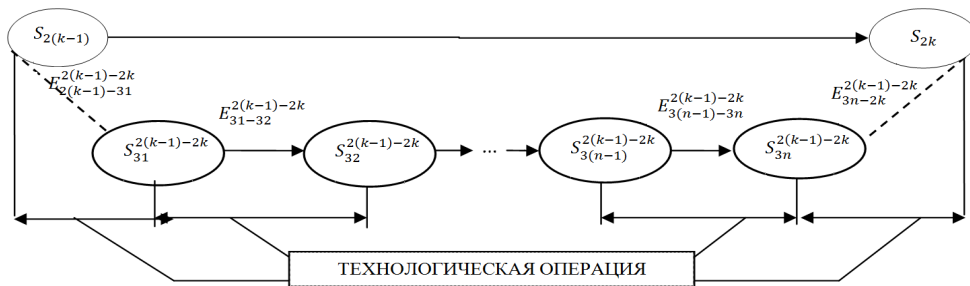


Рис. 3. Граф третьего уровня управления объектом «Изделие»

Fig. 3. Graph of the third level of control of the *Product* object

Задачами третьего уровня управления являются:

- оптимизация структуры технологических операций;
- оптимизация номенклатуры технологического оборудования и установочно-зажимных приспособлений для каждой технологической операции;
- оптимизация используемых методов формообразования в рамках технологической операции.

Частными критериями оптимизации для третьего уровня управления являются: $(G_1^{TO})_{3n}$ – трудоемкость

выполнения работ в рамках n -й технологической операции, ч; $(G_2^{TO})_{3n}$ – величина оперативных затрат в рамках n -й технологической операции, руб.; $(G_3^{TO})_{3n}$ – индекс точности достижения заданных технических параметров в рамках n -й технологической операции.

Таким образом, векторный критерий оптимизации для n -й технологической операции будет иметь вид

$$F_{3n}^{TO}(U) = ((G_1^{TO})_{3n}(U), (G_2^{TO})_{3n}(U), (G_3^{TO})_{3n}(U)).$$

Параметрами управления в рамках третьего этапа будут являться: N_n – 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; $(Type_{PrM})_{1, \dots, k}$ – методы формообразования, применяемые в рамках технологических переходов 1, ..., k.

Четвертый уровень управления в рамках технологической операции имеет следующие промежуточные состояния:

$$S_{41}^{3(n-1)-3n} \rightarrow S_{42}^{3(n-1)-3n} \rightarrow \dots \rightarrow S_{4(v-1)}^{3(n-1)-3n} \rightarrow S_{4v}^{3(n-1)-3n},$$

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

Переход объекта управления из состояния $S_{4(v-1)}^{3(n-1)-3n}$ в состояние $S_{4v}^{3(n-1)-3n}$ производится в рамках выполнения технологического перехода (рис. 4).

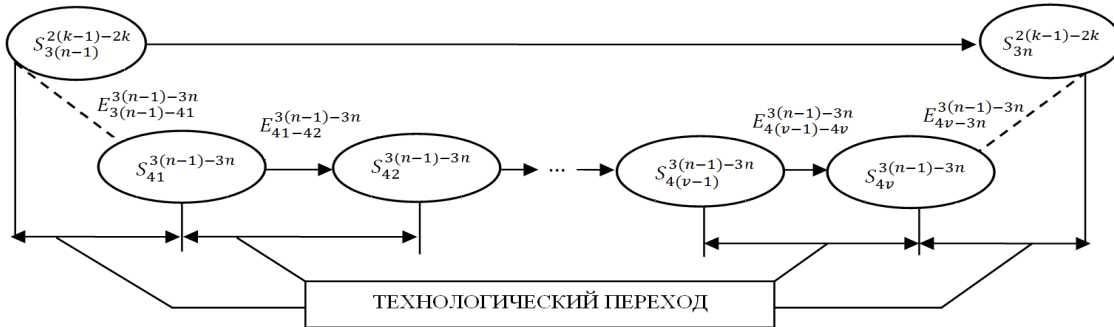


Рис. 4. Граф четвертого уровня управления объектом «Изделие»:

v – количество промежуточных состояний объекта управления в рамках технологической операции;
 $E_{3(n-1)-41}^{3(n-1)-3n}, E_{41-42}^{3(n-1)-3n}, E_{4(v-1)-4v}^{3(n-1)-3n}, E_{4v-3n}^{3(n-1)-3n}$ – условия изменения промежуточных состояний объекта управления

$$S_{3(n-1)-41}^{2(k-1)-2k} \Rightarrow S_{41}^{3(n-1)-3n}, S_{41}^{3(n-1)-3n} \Rightarrow S_{42}^{3(n-1)-3n}, S_{4(v-1)}^{3(n-1)-3n} \Rightarrow S_{4v}^{3(n-1)-3n}, S_{4v}^{3(n-1)-3n} \Rightarrow S_{3n}^{2(k-1)-2k}$$

Fig. 4. Graph of the fourth level of control of the *Product* object:

v – number of intermediate states of the control object within the technological operation;
 $E_{3(n-1)-41}^{3(n-1)-3n}, E_{41-42}^{3(n-1)-3n}, E_{4(v-1)-4v}^{3(n-1)-3n}, E_{4v-3n}^{3(n-1)-3n}$ – conditions of control object transition

$$S_{3(n-1)-41}^{2(k-1)-2k} \Rightarrow S_{41}^{3(n-1)-3n}, S_{41}^{3(n-1)-3n} \Rightarrow S_{42}^{3(n-1)-3n}, S_{4(v-1)}^{3(n-1)-3n} \Rightarrow S_{4v}^{3(n-1)-3n}, S_{4v}^{3(n-1)-3n} \Rightarrow S_{3n}^{2(k-1)-2k}$$

Задачами четвертого уровня управления являются:

- оптимизация номенклатуры режущего инструмента, используемого в рамках технологического перехода;
- оптимизация схем обработки (траектории движения режущего инструмента) в рамках технологического перехода.

Частными критериями оптимизации для четвер-

того уровня управления являются: $(G_1^{TO})_{4v}$ – трудоемкость выполнения работ в рамках v -го технологического перехода, ч; $(G_2^{TO})_{4v}$ – величина оперативных затрат в рамках v -го технологического перехода, руб.; $(G_3^{TO})_{4v}$ – индекс точности дости-

Бровкина Я. Ю., Хрусталева И. Н., Хрусталева М. Б., Шкодров В. П. Иерархическая модель оптимизации технологических параметров комплекса рабочих переходов для процесса механической обработки

жения заданных технических параметров в рамках v -го технологического перехода.

Таким образом, векторный критерий оптимизации

$$F_{4v}^{TO}(U) = \left((G_1^{TO})_{4v}(U), (G_2^{TO})_{4v}(U), (G_3^{TO})_{4v}(U) \right).$$

Параметрами управления в рамках четвертого этапа будут являться: $Type_{ct}$ – модель режущего инструмента, применяемого в рамках технологического перехода; $Type_{PrSh}$ – схема траектории движения режущего инструмента.

$$S_{51}^{4(m-1)-4m} \rightarrow S_{52}^{4(m-1)-4m} \rightarrow \dots \rightarrow S_{5(r-1)}^{4(m-1)-4m} \rightarrow S_{5r}^{4(m-1)-4m},$$

где r – количество промежуточных состояний объекта управления в рамках технологического пере-

хода для v -го технологического перехода будет иметь вид

На пятом уровне изменение промежуточного состояния объекта управления производится в результате выполнения рабочего хода. В рамках отдельного технологического перехода объект управления имеет следующие промежуточные состояния:

хода, шт. (рис. 5).

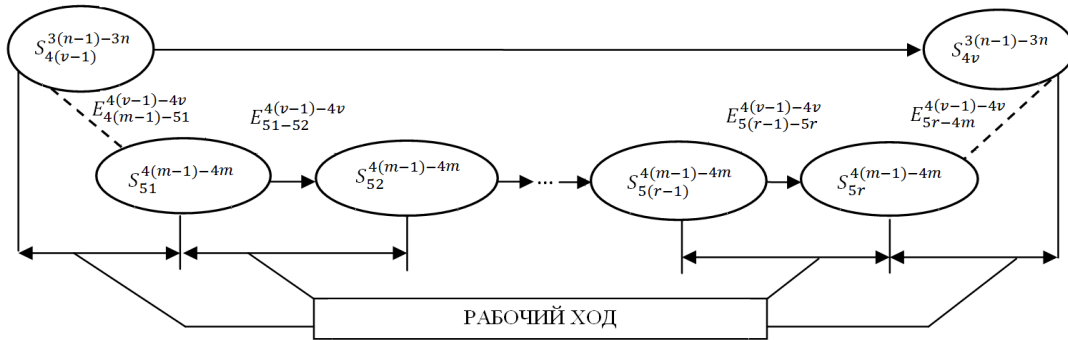


Рис. 5. Граф пятого уровня управления объектом «Изделие»:

r – количество промежуточных состояний объекта управления в рамках технологического перехода;
 $S_{51}^{4(m-1)-4m}, S_{52}^{4(m-1)-4m}, S_{5(r-1)}^{4(m-1)-4m}, S_{5r}^{4(m-1)-4m}$ – условия изменения промежуточных состояний объекта управления
 $S_{4(v-1)}^{3(n-1)-3n} \Rightarrow S_{51}^{4(m-1)-4m}, S_{51}^{4(m-1)-4m} \Rightarrow S_{52}^{4(m-1)-4m}, S_{5(r-1)}^{4(m-1)-4m} \Rightarrow S_{5r}^{4(m-1)-4m}, S_{5r}^{4(m-1)-4m} \Rightarrow S_{4v}^{3(n-1)-3n}$

Fig. 5. Graph of the fifth level of control of the *Product* object

r – number of intermediate states of the control object within the technological transition;
 $S_{51}^{4(m-1)-4m}, S_{52}^{4(m-1)-4m}, S_{5(r-1)}^{4(m-1)-4m}, S_{5r}^{4(m-1)-4m}$ – conditions of control object transition
 $S_{4(v-1)}^{3(n-1)-3n} \Rightarrow S_{51}^{4(m-1)-4m}, S_{51}^{4(m-1)-4m} \Rightarrow S_{52}^{4(m-1)-4m}, S_{5(r-1)}^{4(m-1)-4m} \Rightarrow S_{5r}^{4(m-1)-4m}, S_{5r}^{4(m-1)-4m} \Rightarrow S_{4v}^{3(n-1)-3n}$

На пятом уровне управления решается задача оптимизации значений параметров резания в рамках рабочего хода.

Частными критериями оптимизации для данного уровня управления являются: $(G_1^{PX})_{5r}$ – трудоемкость выполнения работ в рамках r -го рабочего хода, ч; $(G_2^{PX})_{5r}$ – величина оперативных затрат в рам-

ках r -го рабочего хода, руб.; $(G_3^{PX})_{5r}$ – индекс точности достижения заданных технических параметров в рамках r -го рабочего хода.

Таким образом, векторный критерий оптимизации для r -го рабочего хода будет иметь вид

$$F_{5r}^{PX}(U) = \left((G_1^{PX})_{5r}(U), (G_2^{PX})_{5r}(U), (G_3^{PX})_{5r}(U) \right).$$

Параметрами управления в рамках пятого уровня будут являться параметры резания, в частности S – величина подачи; V – величина скорости резания, м/мин; t – величина глубины резания, мм.

процесса изготовления детали «Втулка»

В рамках этапа технологической подготовки производства поставлена задача оптимизации параметров технологического процесса изготовления детали «Втулка» (рис. 6).

Оптимизация параметров технологического

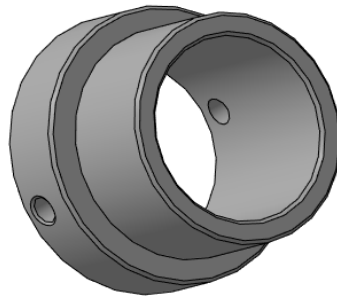


Рис. 6. Твердотельная модель детали «Втулка»

Fig. 6. Solid-state model of the *Bushing* part

На рис. 7 представлена последовательность изменения состояний изделия «Втулка» в рамках первого и третьего уровней управления.

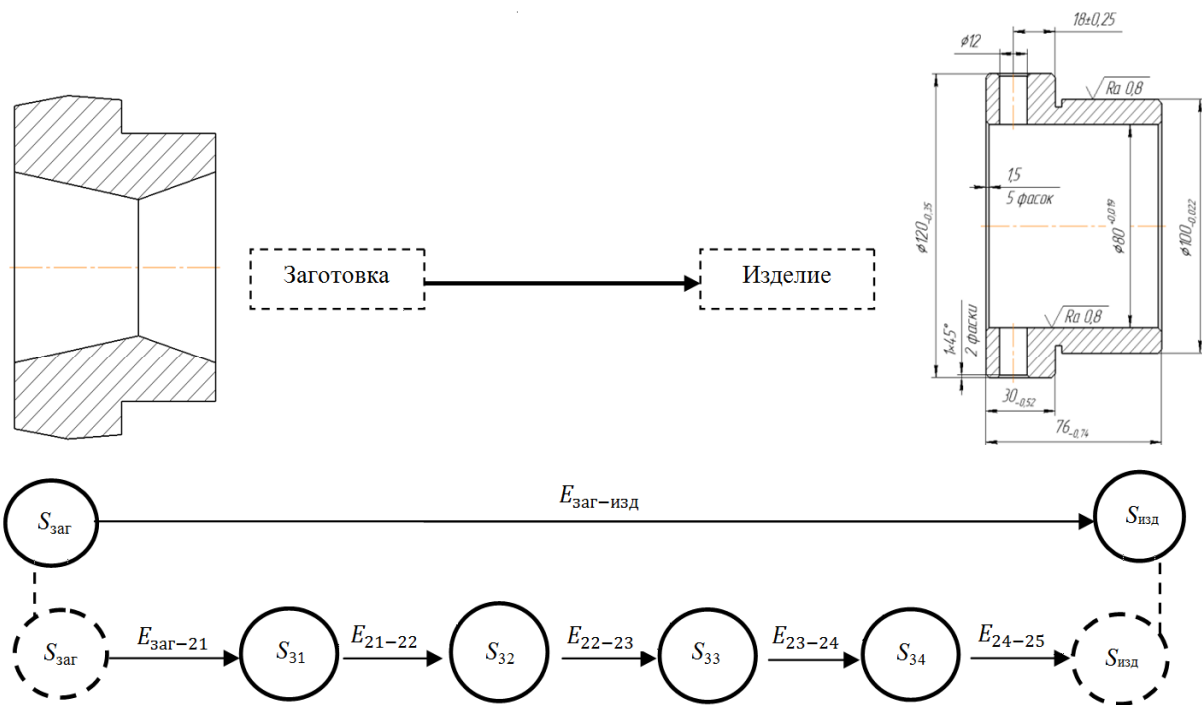


Рис. 7. Последовательность изменения состояний изделия «Втулка» в рамках первого и третьего уровней управления:
 $S_{31}, S_{32}, S_{33}, S_{34}$ – промежуточные состояния объекта на третьем уровне управления;
 $E_{заг-21}, E_{21-22}, E_{22-23}, E_{23-24}, E_{24-изд}$ – условия изменения промежуточных состояний объекта управления $S_{заг} \Rightarrow S_{31}$,
 $S_{31} \Rightarrow S_{32}, S_{32} \Rightarrow S_{33}, S_{33} \Rightarrow S_{34}, S_{34} \Rightarrow S_{изд}$

Fig. 7. The sequence of changing the states of the *Bushing* product within the first and third control levels:
 $S_{31}, S_{32}, S_{33}, S_{34}$ – intermediate states of the object at the third management level;
 $E_{заг-21}, E_{21-22}, E_{22-23}, E_{23-24}, E_{24-изд}$ – conditions of control object transition $S_{заг} \Rightarrow S_{31}$,
 $S_{31} \Rightarrow S_{32}, S_{32} \Rightarrow S_{33}, S_{33} \Rightarrow S_{34}, S_{34} \Rightarrow S_{изд}$

Изготовление изделия производится в рамках одного этапа обработки, поэтому граф измерения состояния объекта в рамках второго уровня управления идентичен графу первого уровня управления. На рис. 8 представлена последовательность про-

межуточных состояний изделия для четвертого и пятого уровней управления для технологической операции, в рамках которой производится переход изделия из состояния $S_{заг}$ в состояние S_{31} .

Бровкина Я. Ю., Хрусталева И. Н., Хрусталева М. Б., Хохловский В. Н., Шкодырев В. П. Иерархическая модель оптимизации технологических параметров комплекса рабочих переходов для процесса механической обработки

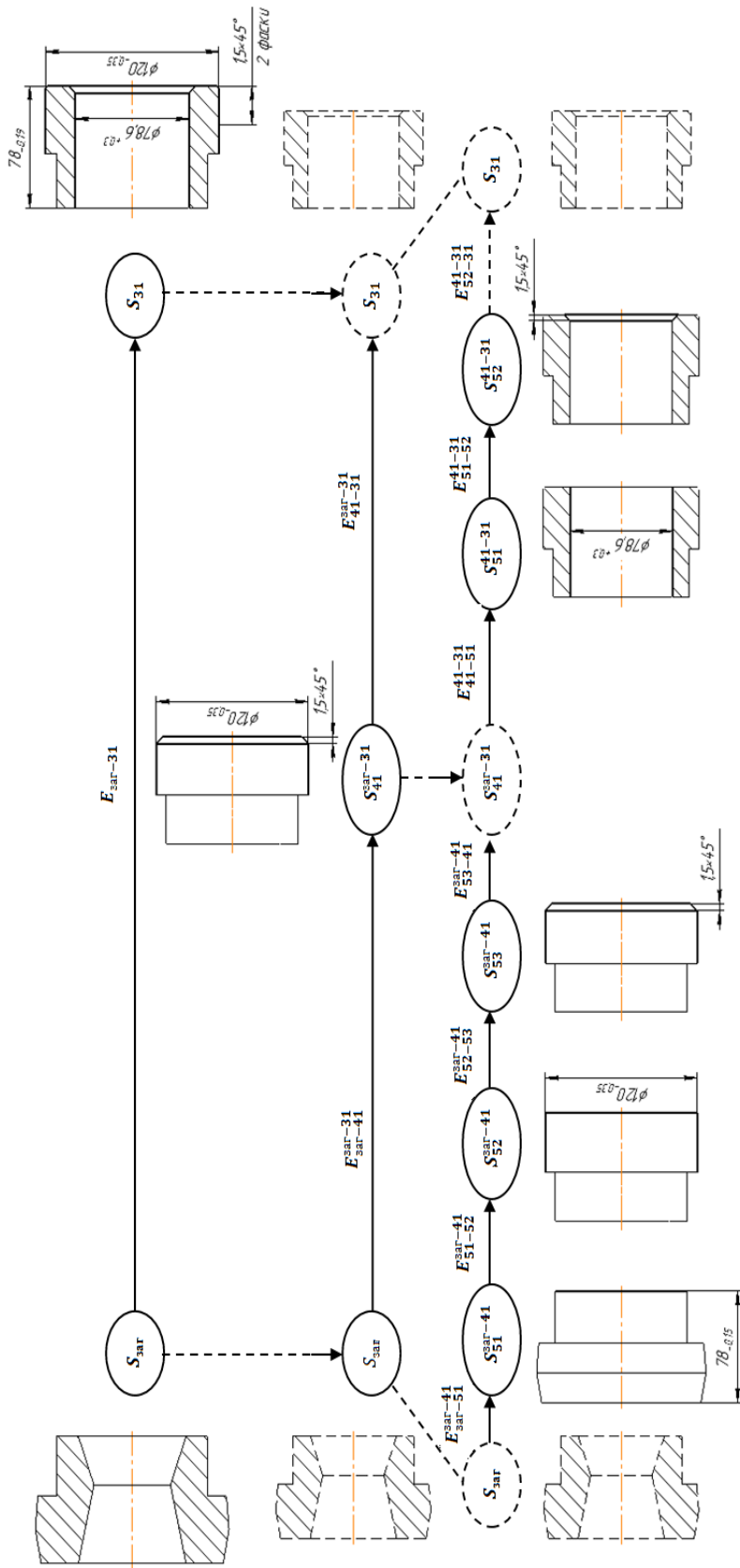


Рис. 8. Последовательность изменения состояний изделия «Втулка» при переходе изделия из состояния $S_{ар}$ в состояние S_{31} :
 $S_{ар-31}^{ар-31}$ – промежуточное состояние объекта на четвертом уровне управления; $S_{31}^{ар-31}$, $S_{52}^{ар-31}$, $S_{53}^{ар-31}$, $S_{51}^{ар-31}$ – промежуточные состояния объекта на пятом уровне управления;
 $E_{ар-31}^{ар-31}$, $E_{41-31}^{ар-31}$ – условия изменения промежуточных состояний объекта на четвертом уровне управления $S_{ар} \Rightarrow S_{41}^{ар-31}$, $S_{41}^{ар-31} \Rightarrow S_{31}^{ар-31}$, $E_{51-52}^{ар-31}$, $E_{52-53}^{ар-31}$, $E_{53-41}^{ар-31}$, $E_{41-51}^{ар-31}$, $E_{51-52}^{ар-31}$, $S_{ар-31}^{ар-31}$, $S_{52-31}^{ар-31}$ – условия изменения промежуточных состояний объекта на пятом уровне управления $S_{ар} \Rightarrow S_{51}^{ар-31}$, $S_{51}^{ар-31} \Rightarrow S_{52}^{ар-31}$, $S_{52}^{ар-31} \Rightarrow S_{53}^{ар-31}$, $S_{53}^{ар-31} \Rightarrow S_{41}^{ар-31}$, $S_{41}^{ар-31} \Rightarrow S_{51}^{ар-31}$, $S_{51}^{ар-31} \Rightarrow S_{52}^{ар-31}$, $S_{52}^{ар-31} \Rightarrow S_{53}^{ар-31}$, $S_{53}^{ар-31} \Rightarrow S_{41}^{ар-31}$

Fig. 8. The sequence of changes in the states of the Sleeve product during the transition of the product from the $S_{ар}$ state to the S_{31} state:
 $S_{ар-31}^{ар-31}$ – intermediate state of the object at the fourth management level; $S_{31}^{ар-31}$, $S_{52}^{ар-31}$, $S_{53}^{ар-31}$, $S_{51}^{ар-31}$ – intermediate states of the object at the fifth control level;
 $E_{ар-31}^{ар-31}$, $E_{41-31}^{ар-31}$ – conditions for changing the intermediate states of the object at the fourth control level $S_{ар} \Rightarrow S_{41}^{ар-31}$, $S_{41}^{ар-31} \Rightarrow S_{31}^{ар-31}$, $E_{51-52}^{ар-31}$, $E_{52-53}^{ар-31}$, $E_{53-41}^{ар-31}$, $E_{41-51}^{ар-31}$, $E_{51-52}^{ар-31}$, $S_{ар-31}^{ар-31}$, $S_{52-31}^{ар-31}$ – conditions for changing the intermediate states of an object at the fifth control level $S_{ар} \Rightarrow S_{51}^{ар-31}$, $S_{51}^{ар-31} \Rightarrow S_{52}^{ар-31}$, $S_{52}^{ар-31} \Rightarrow S_{53}^{ар-31}$, $S_{53}^{ар-31} \Rightarrow S_{41}^{ар-31}$, $S_{41}^{ар-31} \Rightarrow S_{51}^{ар-31}$, $S_{51}^{ар-31} \Rightarrow S_{52}^{ар-31}$, $S_{52}^{ар-31} \Rightarrow S_{53}^{ар-31}$, $S_{53}^{ар-31} \Rightarrow S_{41}^{ар-31}$

Целями оптимизации являются:

- состояние объекта управления S_{51}^{zar-41} : снижение значения целевого показателя $(G_1^{PX})_{51}$ не менее чем на 15 %, при этом увеличение значения целевого показателя $(G_3^{PX})_{51}$ не должно превышать 7 %;
- состояние объекта управления S_{51}^{41-31} : снижение значения целевого показателя $(G_3^{PX})_{51}$ не менее чем на 5,5 %, при этом увеличение целевого показателя $(G_2^{PX})_{51}$ не должно превышать 10 %.

В рамках исходного технологического процесса (до процесса оптимизации) параметры технологического процесса имели следующие значения:

Промежуточное состояние S_{51}^{zar-41} : $(G_1^{PX})_{51} = 59,693$ с; $(G_2^{PX})_{51} = 6,798$ руб.; $(G_3^{PX})_{51} = 0,202$.

Промежуточное состояние S_{51}^{41-31} : $(G_1^{PX})_{51} = 15,271$ с; $(G_2^{PX})_{51} = 1,739$ руб.; $(G_3^{PX})_{51} = 0,217$.

Графики зависимости значений частных критериев оптимизации от параметров управления для промежуточных состояний объекта управления S_{51}^{zar-41} (при фиксированной глубине резания $t_1 = 1,0$ мм) и S_{51}^{41-31} (при фиксированной глубине резания $t_1 = 0,6$ мм) представлены на рис. 9, 10.

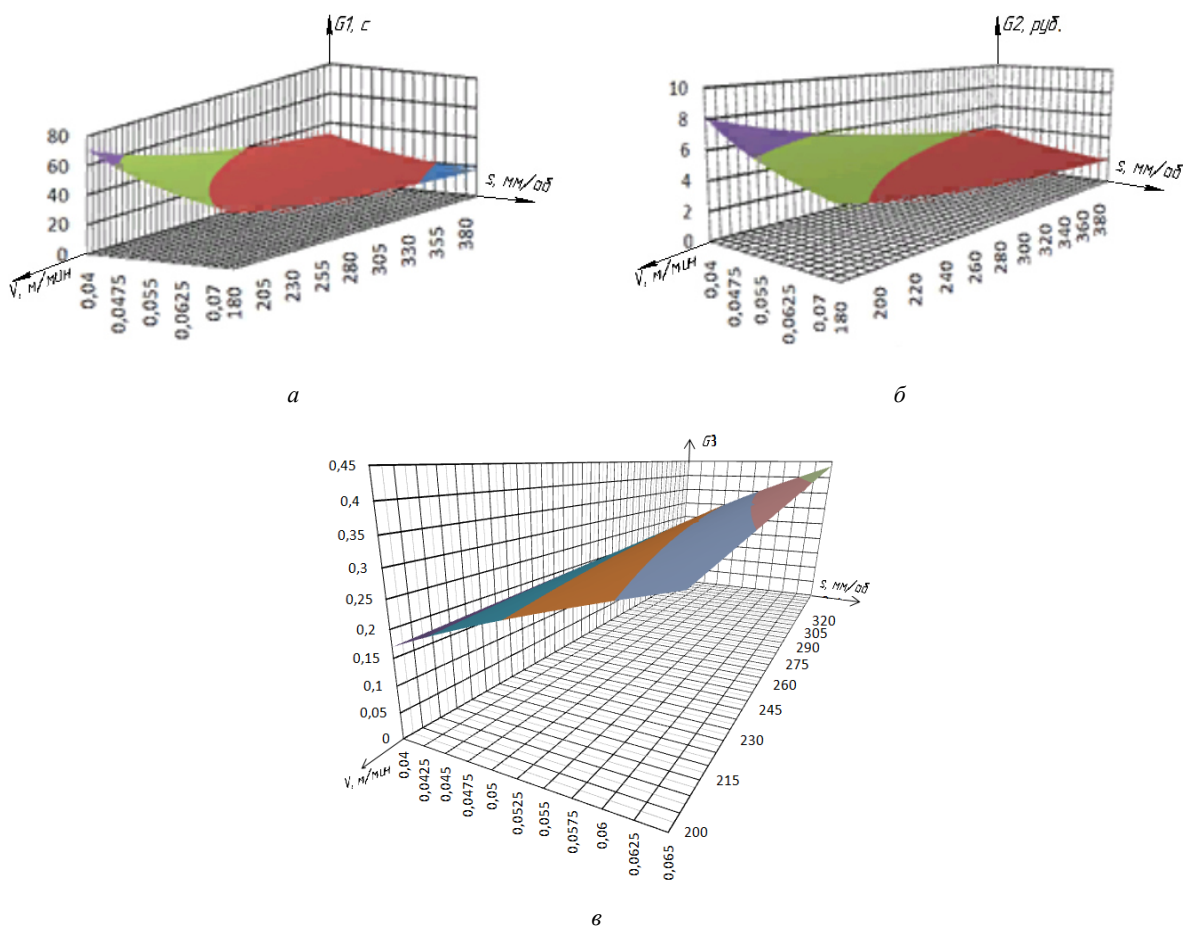


Рис. 9. Графики зависимости значений частных критериев оптимизации для промежуточного состояния объекта управления S_{51}^{zar-41} от подачи и скорости резания при глубине резания $t = 1,0$ мм:

- a – зависимость трудоемкости выполнения рабочего хода;
- $б$ – зависимость величины затрат на выполнение рабочего хода; $в$ – зависимость значения индекса точности

Fig. 9. Graphs of the dependence of the values of particular optimization criteria for the intermediate state of the control object S_{51}^{zar-41} on the feed and cutting speed at cutting depth $t = 1.0$ mm:

- a – dependence of the labor intensity of the stroke;
- $б$ – dependence of the cost of the stroke; $в$ – dependence of the accuracy index value

Бровкина Я. Ю., Хрусталева И. Н., Хрусталева М. Б., Хохловский В. Н., Шкодрев В. П. Иерархическая модель оптимизации технологических параметров комплекса рабочих переходов для процесса механической обработки

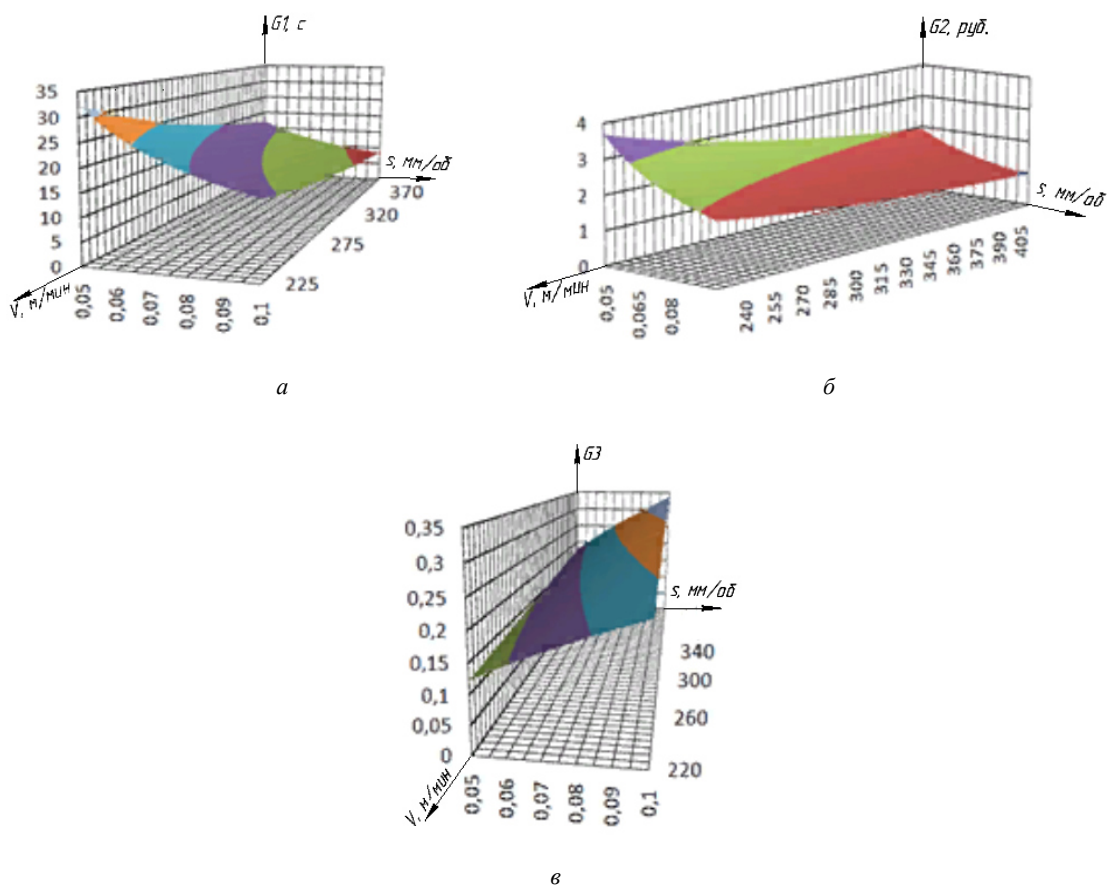


Рис. 10. Графики зависимости значений частых критериев оптимизации для промежуточного состояния объекта управления S_{51}^{41-31} от подачи и скорости резания при глубине резания $t = 0,6$ мм:

a – зависимость трудоемкости выполнения рабочего хода;
 $б$ – зависимость величины затрат на выполнение рабочего хода; $в$ – зависимость значения индекса точности

Fig. 10. Graphs of the dependence of the values of frequent optimization criteria for the intermediate state of the control object on S_{51}^{41-31} the feed and cutting speed at the cutting depth $t = 0.6$ mm:

a – dependence of the labor intensity of the stroke;
 $б$ – dependence of the cost of the stroke; $в$ – dependence of the accuracy index value

Параметры перехода объекта управления из состояния $S_{заг}$ в состояние $S_{51}^{заг-41}$, а также из состояния $S_{41}^{заг-31}$ в состояние S_{51}^{41-31} представлены в таблице.

Значения параметров резания в процессе изменения состояний объекта управления $S_{заг} \rightarrow S_{51}^{заг-41}$, $S_{41}^{заг-31} \rightarrow S_{51}^{41-31}$

Values of cutting parameters in the process of changing the states of the control object $S_{заг} \rightarrow S_{51}^{заг-41}$, $S_{41}^{заг-31} \rightarrow S_{51}^{41-31}$

Изменение состояния объекта управления	Значения параметров управления					
	До оптимизации			После оптимизации		
	t	s	v	t	s	v
$S_{заг} \rightarrow S_{51}^{заг-41}$	1,0	0,045	190	1,0	0,0525	220
$S_{41}^{заг-31} \rightarrow S_{51}^{41-31}$	0,6	0,075	310	0,6	0,07	305

В результате проведенной оптимизации промежуточные состояния имеют следующие значения целевых показателей:

Промежуточное состояние S_{51}^{3ar-41} : $(G_1^{PX})_{51} = 45,316$ с; $(G_2^{PX})_{51} = 5,161$ руб.; $(G_3^{PX})_{51} = 0,215$. Снижение значения целевого показателя $(G_1^{PX})_{51}$ составляет 24,8 %, при этом увеличение значения целевого показателя $(G_3^{PX})_{51} - 6,44$ %.

Промежуточное состояние S_{51}^{41-31} : $(G_1^{PX})_{51} = 16,649$ с; $(G_2^{PX})_{51} = 1,896$ руб.; $(G_3^{PX})_{51} = 0,203$. Снижение значения целевого показателя $(G_3^{PX})_{51}$ составляет 6,45 %, при этом увеличение целевого по-

казателя $(G_2^{PX})_{51} - 9,02$ %.

Заключение

Оптимизация целевых показателей технологического процесса является ключевым фактором повышения эффективности процесса изготовления изделия. Эффективность процесса оптимизации напрямую зависит от степени детализации объекта управления. Представленная в работе иерархическая модель технологического процесса механической обработки представляет собой структурную декомпозицию целей, которые должны быть достигнуты в рамках выделенных уровней управления. Данная иерархия целей позволяет повысить эффективность технологического процесса за счет детального анализа и оптимизации целевых показателей отдельных структурных элементов модели.

Список источников

1. Abe Zeid, Sarvesh Sundaram, Mohsen Moghaddam, Sagar Kamarthi, Tucker Marion. Interoperability in Smart Manufacturing: Research Challenges // *Machines*. 2019. V. 7 (2). P. 21. <https://doi.org/10.3390/machines7020021>.
2. Khrustaleva I. N., Larionova T. A., Lyubomudrov S. A., Chernykh L. G., Stepanov S. N. Automating production engineering for custom and small-batch production on the basis of simulation modeling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1753. P. 012047.
3. Kostenko D., Shkodryev V., Onufriev V. Solving Multicriteria Optimization Problem for an Oil Refinery Plant // *Proceedings of International Scientific Conference on Telecommunications, Computing and Control*. 2021. P. 131–140.
4. Kostenko D., Arseniev D., Shkodryev V., Onufriev V. Pareto optimization in oil refinery // *Data Mining and Big Data. Communications in Computer and Information Science*. 2020. P. 26–33.
5. Kudryavtsev E. Automation of optimization of discrete technological processes // *27th Russian-Polish-Slovak Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFOCE 2018 (Rostov-on-Don, 17–21 September 2018), MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 196. P. 04067. DOI: 10.1051/mateconf/201819604067.
6. Efimov A., Gorkavyu M., Egorova V., Gorkavyu A. Optimization of Technological Parameters of Robotized Mechanical Processing Processes of Aviation Products // *Current Problems And Ways Of Industry Development: Equipment And Technologies (Warsaw, 01 January – 31 December 2021)*. Warsaw: Springer, 2021. V. 200. P. 204–215. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_22.
7. Yong Xu, Ling Yuan, Khalifaoui R., Radulescu M., Mallek S., Xin Zhao. Making technological innovation greener: Does firm digital transformation work? // *Technological Forecasting and Social Change*. 2023. V. 197. P. 122928. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122928>.
8. Martyn Ye., Liaskovska S., Gregus M., Izonin I., Velyka O. Optimization of Technological's Processes Industry 4.0 Parameters for Details Manufacturing via Stamping: Rules of Queuing Systems // *Procedia Computer Science*. 2021. V. 191. P. 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.036>.
9. Levchenko E. Machine learning as a tool for optimization of technological processes // *World of petroleum products*. 2021. V. 02. P. 44–47. DOI: 10.32758/2782-3040-2021-1-1-44-47.
10. El Maraghy H., Schuh G., El Maraghy W., Piller F., Schönsleben P., Tseng M., Bernard A. Product variety management // *CIRP Annals*. 2013. V. 62. Iss. 2. P. 629–652. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.007>.
11. Tkach E., Semenov V., Shumilina Yu. Optimization of the composition and technological processes of dispersed cement systems with high performance properties // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1030. P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012024.
12. Shanin I. Methodology for the implementation of a technological solution, taking into account the optimization of production business processes based on simulation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1064 (1). P. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012037.
13. Tao Fei, Qi Qinglin, Wang Lihui, Nee Andrew. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison // *Engineering*. 2019. V. 5. P. 653–661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
14. Kai Kang, Ray Y. Zhong. A methodology for production analysis based on the RFID-collected manufacturing big data // *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. V. 68 (1). P. 628–634. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.014>.
15. Shuaiyin Ma, Yingfeng Zhang, Jingxiang Lv, Yuntian Ge, Haidong Yang, Lin Li. Big data driven predictive production planning for energy-intensive manufacturing industries // *Energy*. 2020. V. 211. P. 118320. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118320>.
16. Yongheng Zhang, Rui Zhang, Yizhong Wang, Hongfei Guo, Ray Y. Zhong, Ting Qu, Zhiwu Li. Big data driven decision-making for batch-based production systems // *Procedia CIRP*. 2019. V. 83. P. 814–818. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.05.023>.
17. Pan J., Vetere G., Manuel Gomez-Perez J., Wu H. Exploiting Linked Data and Knowledge Graphs in Large Organisations. Springer Cham, 2017. 266 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45654-6>.
18. Mst. Mim Akter, Md-Mizanur Rahoman. A Systematic Review on Knowledge Graphs Classification and Their

Various Usages // Artificial Intelligence Evolution. 2023. P. 187–215. DOI: 10.37256/aie.4220233605.

19. Fensel D., Şimşek U., Angele K., Huaman E., Kärle E., Panasiuk O., Toma I., Umbrich J., Wahler A. How to Use a Knowledge Graph // Knowledge Graphs. Springer, Cham, 2020. P. 69–93. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37439-6_3.

20. Jawad M. S., Chitra Dhawale, Azizul Azhar Bin Ramli, Hairulnizam Mahdin. Adoption of knowledge-graph best development practices for scalable and optimized manufacturing processes // MethodsX. 2023. V. 10. P. 102124. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102124>.

21. Xin-She Yang. Chapter 6 - Genetic Algorithms // Nature-Inspired Optimization Algorithms. Academic Press, 2021. P. 91–100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821986-7.00013-5>.

22. Shahram Ghadami, Hassan Biglarian, Hossein Beyrami, Mohsen Salimi. Optimization of multilateral well trajectories using pattern search and genetic algorithms // Results in Engineering. 2022. V. 16. P. 100722. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100722>.

23. Ricardo Fitas, Gonçalo das Neves Carneiro, Carlos Conceição António. Swarm intelligence hybridized with genetic search in multi-objective design optimization under constrained-Pareto dominance // Composite Structures. 2023. V. 319. P. 117155. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117155>.

24. Suresh P. V. S., Venkateswara Rao P., Deshmukh S. G. A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002. V. 42. Iss. 6. P. 675–680. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00005-6).

25. Kuo-Hao Chang. Stochastic Nelder–Mead simplex method – A new globally convergent direct search method for simulation optimization // European Journal of Opera-

tional Research. 2012. V. 220. Iss. 3. P. 684–694. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.02.028>.

26. Kuo-Hao Chang. A direct search method for unconstrained quantile-based simulation optimization // European Journal of Operational Research. 2015. V. 246. Iss. 2. P. 487–495. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.010>.

27. Abdel-Rahman Hedar, Masao Fukushima. Tabu Search directed by direct search methods for nonlinear global optimization // European Journal of Operational Research. 2006. V. 170. Iss. 2. P. 329–349. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.05.033>.

28. Paresh Kumar Panigrahi, Sukanta Nayak. Numerical approach to solve imprecisely defined systems using Inner Outer Direct Search optimization technique // Mathematics and Computers in Simulation. 2024. V. 215. P. 578–606. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2023.08.025>.

29. 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. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.298>.

30. Sidharthan S., Raajavignesh G., Nandeeshwaran R., Radhika N., Jojith R., Jeyaprakash N. Mechanical property analysis and tribological response optimization of SiC and MoS₂ reinforced hybrid aluminum functionally graded composite through Taguchi's DOE // Journal of Manufacturing Processes. 2023. V. 102. P. 965–984. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.013>.

31. Paramjit Singh Bilga, Sehijpal Singh, Raman Kumar. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method // Journal of Cleaner Production. 2016. V. 137. P. 1406–1417. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.220>.

References

1. Abe Zeid, Sarvesh Sundaram, Mohsen Moghaddam, Sagar Kamarthi, Tucker Marion. Interoperability in Smart Manufacturing: Research Challenges. *Machines*, 2019, vol. 7 (2), p. 21. <https://doi.org/10.3390/machines7020021>.

2. Khrustaleva I. N., Larionova T. A., Lyubomudrov S. A., Chernykh L. G., Stepanov S. N. Automating production engineering for custom and small-batch production on the basis of simulation modeling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1753, p. 012047.

3. Kostenko D., Shkodyrev V., Onufriev V. Solving Multicriteria Optimization Problem for an Oil Refinery Plant. *Proceedings of International Scientific Conference on Telecommunications, Computing and Control*, 2021, pp. 131-140.

4. Kostenko D., Arseniev D., Shkodyrev V., Onufriev V. Pareto optimization in oil refinery. Data Mining and Big Data. *Communications in Computer and Information Science*, 2020, pp. 26-33.

5. Kudryavtsev E. Automation of optimization of discrete technological processes. *27th Russian-Polish-Slovak Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFOCE 2018 (Rostov-on-Don, 17–21 September 2018), MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 196. P. 04067. DOI: 10.1051/mateconf/201819604067.

6. Efimov A., Gorkavyi M., Egorova V., Gorkavyi A. Optimization of Technological Parameters of Robotized Mechanical Processing Processes of Aviation Products. *Current Problems And Ways Of Industry Development: Equipment And Technologies (Warsaw, 01 January – 31 December 2021)*. Warsaw, Springer, 2021. Vol. 200. Pp. 204-215.

DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_22.

7. Yong Xu, Ling Yuan, Khalfaoui R., Radulescu M., Mallek S., Xin Zhao. Making technological innovation greener: Does firm digital transformation work? *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, vol. 197, p. 122928. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122928>.

8. Martyn Ye., Liaskovska S., Gregus M., Izonin I., Velyka O. Optimization of Technological's Processes Industry 4.0 Parameters for Details Manufacturing via Stamping: Rules of Queuing Systems. *Procedia Computer Science*, 2021, vol. 191, pp. 290-295. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.036>.

9. Levchenko E. Machine learning as a tool for optimization of technological processes. *World of petroleum products*, 2021, vol. 02, pp. 44-47. DOI: 10.32758/2782-3040-2021-1-1-44-47.

10. El Maraghy H., Schuh G., El Maraghy W., Piller F., Schönsleben P., Tseng M., Bernard A. Product variety management. *CIRP Annals*, 2013, vol. 62, iss. 2, pp. 629-652. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.007>.

11. Tkach E., Semenov V., Shumilina Yu. Optimization of the composition and technological processes of dispersed cement systems with high performance properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1030, p. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012024.

12. Shanin I. Methodology for the implementation of a technological solution, taking into account the optimization of production business processes based on simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,

2021, vol. 1064 (1), p. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012037.

13. Tao Fei, Qi Qinglin, Wang Lihui, Nee Andrew. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 2019, vol. 5, pp. 653-661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.

14. Kai Kang, Ray Y. Zhong. A methodology for production analysis based on the RFID-collected manufacturing big data. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, vol. 68 (1), pp. 628-634. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.014>.

15. Shuaiyin Ma, Yingfeng Zhang, Jingxiang Lv, Yuntian Ge, Haidong Yang, Lin Li. Big data driven predictive production planning for energy-intensive manufacturing industries. *Energy*, 2020, vol. 211, p. 118320. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118320>.

16. Yongheng Zhang, Rui Zhang, Yizhong Wang, Hongfei Guo, Ray Y. Zhong, Ting Qu, Zhiwu Li. Big data driven decision-making for batch-based production systems. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 83, pp. 814-818. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.05.023>.

17. Pan J., Vetere G., Manuel Gomez-Perez J., Wu H. *Exploiting Linked Data and Knowledge Graphs in Large Organisations*. Springer Cham, 2017. 266 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45654-6>.

18. Mst. Mim Akter, Md-Mizanur Rahoman. A Systematic Review on Knowledge Graphs Classification and Their Various Usages // *Artificial Intelligence Evolution*. 2023. P. 187–215. DOI: 10.37256/ai.e.4220233605.

19. Fensel D., Şimşek U., Angele K., Huaman E., Kärle E., Panasiuk O., Toma I., Umbrich J., Wahler A. How to Use a Knowledge Graph // *Knowledge Graphs*. Springer, Cham, 2020. P. 69–93. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37439-6_3.

20. Jawad M. S., Chitra Dhawale, Azizul Azhar Bin Ramli, Hairulnizam Mahdin. Adoption of knowledge-graph best development practices for scalable and optimized manufacturing processes. *MethodsX*, 2023, vol. 10, p. 102124. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102124>.

21. Xin-She Yang. *Chapter 6 - Genetic Algorithms. Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Academic Press, 2021. Pp. 91-100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821986-7.00013-5>.

22. Shahram Ghadami, Hassan Biglarian, Hossein Beyrami, Mohsen Salimi. Optimization of multilateral well trajectories using pattern search and genetic algorithms. *Results in Engineering*, 2022, vol. 16, p. 100722. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100722>.

23. Ricardo Fitas, Gonçalo das Neves Carneiro, Carlos Conceição António. Swarm intelligence hybridized with genetic search in multi-objective design optimization under constrained-Pareto dominance. *Composite Structures*, 2023, vol. 319, p. 117155. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117155>.

24. Suresh P. V. S., Venkateswara Rao P., Deshmukh S. G. A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, vol. 42, iss. 6, pp. 675-680. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00005-6).

25. Kuo-Hao Chang. Stochastic Nelder-Mead simplex method – A new globally convergent direct search method for simulation optimization. *European Journal of Operational Research*, 2012, vol. 220, iss. 3, pp. 684-694. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.02.028>.

26. Kuo-Hao Chang. A direct search method for unconstrained quantile-based simulation optimization. *European Journal of Operational Research*, 2015, vol. 246, iss. 2, pp. 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.010>.

27. Abdel-Rahman Hedar, Masao Fukushima. Tabu Search directed by direct search methods for nonlinear global optimization. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 170, iss. 2, pp. 329-349. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.05.033>.

28. Pareshe Kumar Panigrahi, Sukanta Nayak. Numerical approach to solve imprecisely defined systems using Inner Outer Direct Search optimization technique. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2024, vol. 215, pp. 578-606. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2023.08.025>.

29. 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. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.298>.

30. Sidharthan S., Raajavignesh G., Nandeeshwaran R., Radhika N., Jojith R., Jeyaparakash N. Mechanical property analysis and tribological response optimization of SiC and MoS2 reinforced hybrid aluminum functionally graded composite through Taguchi's DOE. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 102, pp. 965-984. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.013>.

31. Paramjit Singh Bilga, Sehijpal Singh, Raman Kumar. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 137, pp. 1406-1417. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.220>.

Статья поступила в редакцию 01.12.2023; одобрена после рецензирования 16.01.2024; принята к публикации 11.04.2024
The article was submitted 01.12.2023; approved after reviewing 16.01.2024; accepted for publication 11.04.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Яна Юрьевна Бровкина – старший преподаватель высшей школы машиностроения; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; zoom87@list.ru

Ирина Николаевна Хрусталева – кандидат технических наук; доцент высшей школы машиностроения; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; Irina.khrustaleva@mail.ru

Yana Yu. Brovkina – Senior Lecturer of the Higher School of Mechanical Engineering; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; zoom87@list.ru

Irina N. Khrustaleva – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Higher School of Mechanical Engineering; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Irina.khrustaleva@mail.ru

Михаил Борисович Хрусталева – аспирант высшей школы машиностроения; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; m320prk1@rambler.ru

Владимир Николаевич Хохловский – кандидат технических наук, доцент; доцент высшей школы управления киберфизическими системами; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; 78v.kh77@gmail.com

Вячеслав Петрович Шкодырев – доктор технических наук, профессор; профессор высшей школы управления киберфизическими системами; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; 2904180@mail.ru

Michail B. Khrustalev – Postgraduate Student of the Higher School of Mechanical Engineering; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; m320prk1@rambler.ru

Vladimir N. Khokhlovskiy – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Higher School of Cyberphysical Systems Management; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 78v.kh77@gmail.com

Vyacheslav P. Shkodyrev – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Higher School of Cyberphysical Systems Management; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2904180@mail.ru

