

# COMPUTER-AIDED ENGINEERING

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.65: 621.7/.9

А.В. Петухов

### ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИНТЕЗА РАЦИОНАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Александр Владимирович Петухов, окончил Белорусский политехнический институт, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. Имеет статьи в области автоматизации технологической подготовки производства опытных образцов структурно-сложных изделий. [e-mail: Petukhov\_2000@gstu.by].*

#### Аннотация

В статье рассматривается исследование синтеза рациональных вариантов технологических операций. Областью исследования является проектирование технологических процессов производства опытных образцов структурно-сложных изделий. Целью исследования является формализация синтеза рациональных вариантов технологических операций при проектировании технологических процессов изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий. Исследование состоит из трех этапов. Первый этап – формализация синтеза рациональных вариантов технологических операций с использованием математического аппарата теории выбора и принятия решений. В результате его проведения получены конкретные модели порождения возможных типовых технологических решений. Второй этап – разработка математической модели формирования множества альтернатив при синтезе рациональных вариантов технологических операций. Выполнение этого этапа позволило реализовать на практике важнейший принцип создания систем автоматизированного проектирования – независимость программного обеспечения от нормативно-справочной базы – и, как следствие, обеспечить высокую адаптируемость системы к изменениям внешней среды, благодаря динамическому формированию критериев выбора. Третий этап – оптимизация выбора типовых технологических решений методом идеальной точки. В результате проведенного исследования разработана математическая модель синтеза рациональных вариантов технологических операций при изготовлении опытных образцов структурно-сложных изделий. Доказано, что поскольку выбор технологических решений производится по наилучшему сочетанию их свойств, то оптимизацию их выбора удобно выполнить методом идеальной точки. Получена формула определения «удаленности от идеальной точки», которая служит критерием оптимальности технологических решений.

Ключевые слова: синтез рациональных вариантов технологических операций, структурно-сложные изделия, моделирование принятия решений.

doi: 10.35752/1991-2927\_2023\_2\_72\_71

# FORMALIZATION OF THE SYNTHESIS OF RATIONAL OPTIONS FOR TECHNOLOGICAL OPERATIONS IN THE DESIGN OF TECHNOLOGICAL PROCESSES TO MANUFACTURE THE PROTOTYPES OF STRUCTURALLY COMPLEX PRODUCTS

*Aleksandr Vladimirovich Petukhov, graduated from Belarusian Polytechnic Institute; Senior Lecturer of the 'Technology of Mechanical Engineering' Department at the Sukhoi State Technical University of Gomel; an author of articles in the field of automated preparation of prototypes manufacturing for complex design products. e-mail: Petukhov\_2000@gstu.by.*

## Abstract

The article deals with the study of the rational options synthesis for technological operations. The scope of study is the design of technological processes to manufacture prototypes of structurally complex products. Formalization of the synthesis of rational options for technological operations in the design of technological processes for the manufacture of prototypes of structurally complex products is the goal of the study. The study consists of three stages. The first stage is the formalization of the rational options synthesis for technological operations using the mathematical apparatus of the theory of choice and decision making. As a result of its implementation, specific models for generating possible typical technological solutions were obtained. The second stage is the development of a mathematical model for the formation of a set of alternatives in the synthesis of rational options for technological operations. The implementation of this stage made it possible to put into practice the most important principle of creating computer-aided design systems, the independence of software from the regulatory and reference base and, as a result, ensure high adaptability of the system to changes in the external environment, by reason of dynamic formation of selection criteria. The third stage is the optimization of the choice of standard technological solutions by the ideal point method. As a result of the study, a mathematical model was developed for the synthesis of rational options for technological operations in the manufacture of prototypes of structurally complex products. It is proved that since the choice of technological solutions is made according to the best combination of their properties, it is convenient to optimize their choice by the ideal point method. A formula for determining the remoteness from the ideal point is obtained, which serves as a criterion for the optimality of technological solutions.

Keywords: synthesis of rational options for technological operations, structurally complex products, decision-making modelling.

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на все достижения информационных технологий в области динамики, прочности и аналитической надежности, изготовление и испытание опытного образца структурно-сложного изделия остается в итоге критерием истины.

Важным аспектом при автоматизации проектирования технологических процессов (ТП) изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий является формализация синтеза рациональных вариантов технологических операций. К сожалению, это направление не нашло достойного отражения в научных исследованиях. Хотя изготовление опытного образца находится на грани окончания конструкторского проектирования и начала постановки изделия на производство. А ведь при позаказном производстве структурно-сложных изделий многие технологические решения, найденные в экспериментальном производстве, могли бы успешно быть использованы и в основном производстве.

Целью исследования является формализация синтеза рациональных вариантов технологических операций при проектировании ТП изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий. Решение этой задачи

позволит разработать математическую модель синтеза рациональных вариантов технологических операций.

## 1 КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕМЕ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [1] при описании основных методов автоматизированного проектирования ТП, подчеркивается, что *метод индивидуального проектирования* заключается в «ручной» компоновке необходимой последовательности операций и переходов с использованием имеющейся в системе автоматизации проектирования ТП (САПР ТП) базы данных (БД). При описании *проектирования на основе группового ТП* подчеркивается, что оно базируется на предварительно выполненном группировании деталей и разработанных групповых ТП. При этом групповой ТП используется в качестве «шаблона», который настраивается на параметры конкретной детали. В характеристике *метода синтеза ТП* указано, что он состоит в алгоритмическом формировании ТП на основании имеющегося геометрического описания детали. Так как не существует строгих математических методов формирования структуры ТП на основании описания детали, то алгоритмы синтеза носят в основном

эвристический характер и являются действительными только в пределах некоторых (выбранных и оговариваемых заранее) групп или классов деталей. В работе [1] не формализован синтез рациональных вариантов технологических операций при проектировании ТП. Это обстоятельство указывает на актуальность проведения исследования, направленного на формализацию синтеза рациональных вариантов технологических операций при проектировании ТП изготовления вообще и опытных образцов структурно-сложных изделий в частности.

В работе [2] при характеристике метода прямого проектирования указано, что данным методом можно получить ТП на любое устройство, однако степень автоматизации проектирования при его использовании очень мала. Метод является трудоемким, что обусловлено тем, что практически вся работа выполняется вручную.

В работе [2] указано, что метод анализа широко применяется при автоматизации описаний групповых и типовых ТП. При его применении используются соответствующие текущей специализации процессы, что упрощает проектирование.

При описании метода синтеза указано, что он универсален и позволяет разрабатывать ТП для устройств различных классов, однако использование этого метода возможно только при наличии базы локальных типовых решений, поэтому системы автоматизированного проектирования, построенные по методу синтеза, в основном имеют узкую направленность.

В работе [2] не формализован синтез рациональных вариантов технологических операций при проектировании ТП.

Работа [3] посвящена рассмотрению задачи оптимизации технологического проектирования при изготовлении опытных образцов для современного сельскохозяйственного машиностроения. В этом источнике сформулировано понятие о процессе проектирования, приведена последовательность проектных процедур при автоматизированном технологическом проектировании. Однако работа также не содержит методики формализации синтеза рациональных вариантов технологических операций при проектировании ТП.

В третьей главе работы [4], озаглавленной «Проектирование ТП в автоматизированной системе технологической подготовки производства (АСТПП)», для сокращения количества рассматриваемых вариантов при максимальном приближении к оптимальному значению предлагается использовать типизацию (унификацию) технологических решений, вмешательство пользователя (режим диалога) или изменение стратегии поиска. При этом в работе [4] отсутствуют какие-либо указания по формализации синтеза рациональных вариантов технологических операций при проектировании ТП.

В работе [5] приводятся результаты исследований в области формализации задачи выбора автоматизированных систем для различных сфер деятельности. Цель исследования заключалась в разработке методик

качественной и количественной оценок при выборе автоматизированной системы, исходя из условий эксплуатации и требований заказчика. В основу методики качественной оценки положена теория выбора и принятия решений, которая исследует математические модели этого вида деятельности. Ввиду того, что в рассматриваемой проблеме известно много альтернатив, которые являются автоматизированными системами, это может быть связано с проблемой выбора. Особенность этого подхода заключается в том, что он не требует полного восстановления принципа оптимальности, но позволяет ограничиться информацией, достаточной для определения оптимального варианта. Количественная оценка основана на определении прогнозируемого годового экономического эффекта от внедрения автоматизированной системы.

В работе [6] проведен анализ существующего процесса формирования ТП для всех видов производств, используемых при изготовлении опытных образцов структурно-сложных изделий.

В работе [7] рассматривается формализация выбора метода автоматизации проектирования ТП изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий. Целью исследования является разработка математической модели процесса выбора метода автоматизации проектирования ТП. Установлены шесть основных факторов, определяющих выбор метода автоматизации проектирования ТП. Выявлены условия, определяющие выбор конкретного метода автоматизации проектирования в зависимости от значений установленных факторов. Сформирована рекомендуемая последовательность использования методов автоматизации проектирования ТП изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий.

В статье [8] представлены основные категории моделей. На конкретных примерах рассматриваются контексты моделей, их преимущества и ограничения. В работе описаны ключевые характеристики моделей процессов проектирования и разработки с учетом их практического применения и раскрываются возможности для проведения дальнейших исследований. В целом, статья призвана помочь исследователям определить новые модели и новые подходы к моделированию, соответствующие современному уровню развития техники. Статья может быть интересна проектировщикам и преподавателям, желающим ознакомиться с достижениями в области создания и практического использования моделей.

Статья [9] содержит обзор последних исследований в области проектирования для аддитивного производства, включая терминологию, тенденции, классификацию методов и программного обеспечения. Основное внимание уделяется роли инженера-проектировщика в процессе аддитивного производства. В статье описано исследование структурной оптимизации и связи между оптимизацией топологии и аддитивным производством.

## 2 ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИНТЕЗА РАЦИОНАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

В теории выбора и принятия решений формальное описание задачи принятия решений выражается набором

$$\langle \Omega_A, \text{ОП} \rangle, \quad (1)$$

где  $\Omega_A$  – множество вариантов решений (альтернатив);

ОП – принцип оптимальности, позволяющий выбрать лучшие решения.

Математическим выражением принципа оптимальности ОП служит функция выбора  $C_{\text{ОП}}$ , а решением задачи (1) является подмножество  $\Omega_{\text{ОП}}$  множества альтернатив  $\Omega_A$ , т.е.  $\Omega_{\text{ОП}} \subset \Omega_A$ ; при этом  $C_{\text{ОП}}(\Omega_A) = \Omega_{\text{ОП}}$ .

В работе [7] определение понятия «технологическое решение» для ТП обработки резанием формулируется следующим образом: технологическое решение, принимаемое при проектировании ТП для выполнения очередного этапа обработки, есть элемент декартова произведения множеств частных технологических решений, т. е.

$$r \in R_{\text{пов}} \cdot R_{\text{вп}} \cdot R_{\text{оп}} \cdot R_{\text{об}} \cdot R_{\text{сх}} \cdot R_{\text{п}} \cdot R_{\text{пр}} \cdot R_{\text{ри}} \cdot R_{\text{ми}} \cdot R_{\text{ви}}, \quad (2)$$

где  $R_{\text{пов}}$  – множество частных технологических решений, описывающих формируемые при обработке поверхности;

$R_{\text{вп}}$  – множество частных технологических решений, описывающих наименования видов производств (групп операций);

$R_{\text{оп}}$  – множество частных технологических решений, описывающих наименования технологических операций;

$R_{\text{об}}$  – множество частных технологических решений, описывающих наименования и модели оборудования;

$R_{\text{сх}}$  – множество частных технологических решений, описывающих схемы базирования и закрепления детали;

$R_{\text{п}}$  – множество частных технологических решений, описывающих содержательные формулировки предписания, т.е. тексты переходов;

$R_{\text{пр}}, R_{\text{ри}}, R_{\text{ми}}$  и  $R_{\text{ви}}$  – множество частных технологических решений, описывающих наименования и обозначения приспособлений, режущих, мерительных и вспомогательных инструментов соответственно.

Множество всех частных технологических решений можно представить в виде объединения двух множеств  $I_R$  и  $T_R$ :

$$R = I_R \cup T_R, \quad (3)$$

где  $I_R$  – множество частных индивидуальных технологических решений;

$T_R$  – множество частных типовых технологических решений.

Для применения задачи (1) и методов ее решения к выбору типовых технологических решений в зависимости от ранее принятых индивидуальных решений, прежде всего, необходимо определить множество альтернатив  $\Omega_A$ .

В общем случае на вход процесса принятия технологических решений подаются всевозможные полные технологические решения  $r$  с фиксированными, т. е. указанными технологическими индивидуальными технологическими решениями  $r'_I: r = (r'_I, r_T)$ . Для проектируемого ТП из всех решений  $r$ , поданных на вход процесса принятия технологических решений, отбираются только те, для которых выполняется условие  $r_T = f(r'_I)$ . Поскольку решения  $r'_I$  фиксированы для каждого проектируемого ТП, то фактически на вход процесса принятия технологических решений подаются именно эти решения, а множество типовых технологических решений  $R_T$  представляет собой множество альтернатив:  $\Omega_A = R_T$ .

Для обеспечения разрешимости и снижения сложности решения задачи (8), а также для сокращения времени поиска решений за счет поэтапного сужения области поиска на множестве  $\Omega_A$  выделяется множество возможных для заданного  $r'_I$  альтернатив  $\Omega_B$ , а на множестве  $\Omega_B$  выделяется множество допустимых альтернатив  $\Omega_D$ , которое и составляет искомое множество альтернатив. При этом  $\Omega_B \subset \Omega_A$ ,  $\Omega_D \subset \Omega_B$  последовательное выделение множеств  $\Omega_B$  и  $\Omega_D$  из множества альтернатив  $\Omega_A$  становится возможным после поступления на вход системы конкретного решения  $r'_I$ . При этом возникают две задачи выбора:

$$\langle \Omega_A, \text{ОП}_1 \rangle, \quad (4)$$

$$\langle \Omega_A, \text{ОП}_2 \rangle. \quad (5)$$

Решением задачи (4) служит множество  $\Omega_B$ , а решением задачи (5) – множество  $\Omega_D$  альтернатив, из которых в результате решения задачи

$$\langle \Omega_D, \text{ОП}_3 \rangle \quad (6)$$

определяется искомое типовое технологическое решение  $r'_T$ , удовлетворяющее условию  $f$  при заданном  $r'_I$ .

В общем случае решением задачи (6) может оказаться не одно, а целый ряд решений  $r'_T$ , которые составят множество  $\Omega_{r'_T}: C_{\text{ОП}_3}(\Omega_D) = \Omega_{r'_T}$ . Тогда для выявления одного (оптимального) решения  $r'_T$  необходимо решить задачу

$$\langle \Omega_{r'_T}, \text{ОП}_4 \rangle. \quad (7)$$

Так как в этом случае возможно предусмотреть все множества  $\Omega_{r'_T}$  (например, множества одноименных

сверл, измерителей и т. д.) и заранее сформулировать принцип оптимальности ОП<sub>4</sub> для всех  $r'_T \in \Omega_{r'_T}$ , то задача (7) будет представлять собой задачу оптимизации.

При решении задачи (6) может возникнуть одна из следующих ситуаций:

$$\Omega_{r'_T} = \emptyset, \quad (8)$$

$$\Omega_{r'_T} = r'_T, \quad (9)$$

$$\Omega_{r'_T} = \{r'_{T1}, r'_{T2}, \dots, r'_{Tn}\}. \quad (10)$$

В ситуации (8) решение задачи (1) отсутствует. Например, для обработки заданной поверхности в нормативно-справочной базе системы не подобран режущий инструмент. В этом случае при достаточно полной и достоверной нормативно-справочной базе необходимо сформировать заявку на проектирование требуемого инструмента.

В случае (9) задача (1) имеет единственное решение  $r'_T$ , и решать задачу (7), т. е. оптимизировать выбор, нет необходимости.

В случае (10) в качестве решения задачи (1) может быть использовано любое из  $n$  решений  $r'_{Tj}$ , и требуется произвести оптимизацию выбора, т. е. решить задачу (7) для получения единственного решения задачи (1).

Одной из особенностей САПР ТП, реализующей метод сочетания решений, является возможность непосредственного задания технологом типовых технологических решений, которые удобно называть директивными.

Необходимость задания директивных технологических решений может, например, возникнуть при разработке ТП, которые в отдельных операциях требуют применения специального инструмента, отсутствующего в нормативно-справочной базе системы.

Обозначим множество директивных технологических решений через  $R_D$ . Тогда задача (1) является задачей прямого выбора, если для рассматриваемого перехода (операции) типовое решение  $r'_T$  содержится в  $R_D$ , т. е.  $r'_T \in R_D$ . В этом случае решением задачи (1) является заданное технологом типовое решение  $r'_T$ :  $C_{\text{ОП}}(\Omega_A) = \{r'_T \mid \forall r'_T \in R_D\}$ . При этом нет необходимости решать задачи (4)–(7).

Элементы множеств  $R_{Иi}$  и  $R_{Tj}$  представляют собой соответственно частные индивидуальные и типовые технологические решения.

Если для заданного решения  $r'_И$  не существует решения  $r'_T$ , содержащегося в  $R_D$ , то задача (1) требует предварительного решения задач (4)–(6) и, при необходимости, (7).

Таким образом, условие необходимости решения указанных задач выглядит следующим образом:  $\neg \exists r'_T \in R_D$ .

Для автоматического решения задачи выделения  $\Omega_B$  из  $\Omega_A$  целесообразно построить модель порождения альтернатив, которую в системе алгоритмов следу-

ет использовать как генератор возможных для заданного  $r'_И$  альтернатив.

Ранее было отмечено, что множество всех альтернатив  $\Omega_A$  совпадает с множеством типовых технологических решений  $R_T$ :

$$\Omega_A = R_T. \quad (11)$$

Формулы (11), (6) и (7) дают возможность представить  $\Omega_A$  в виде:

$$\Omega_A = R_{\text{оп}} R_{\text{ри}} R_{\text{ви}} R_{\text{ми}} R_{\text{п}}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что каждая альтернатива, принадлежащая множеству  $\Omega_A$ , состоит из ряда компонент, а каждая компонента имеет ряд вариантов.

Множество  $R_{И}$  индивидуальных технологических решений имеет вид:

$$R_{И} = R_{\text{пов}} \cdot R_{\text{об}} \cdot R_{\text{сх}} \cdot R_{\text{пр}}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что любое индивидуальное технологическое решение  $r'_И$  также состоит из ряда многовариантных компонент. Последние утверждения непосредственно вытекают из множественного представления полных и частных индивидуальных и типовых технологических решений.

Компонентами альтернатив, принадлежащих множеству  $\Omega_A$  и решений  $r'_И$ , являются частные технологические решения, а вариантами компонент – значения частных технологических решений.

Из системных свойств процесса принятия технологических решений известно, что индивидуальные и типовые технологические решения не могут быть произвольными. Они должны являться элементами заранее обусловленных множеств, реально выраженных в справочниках системы (поверхностей, оборудования, инструмента и т. д.). Поэтому целесообразно на основе набора отношений на базовом множестве  $F$  математической модели процесса принятия технологических решений поставить в соответствие каждому варианту каждой компоненты  $R_{И}$  один или несколько возможных вариантов соответствующей компоненты  $\Omega_A$ . Для упрощения дальнейших рассуждений целесообразно предъявить к частному технологическому решению  $r'_{\text{пов}}$  (описание поверхности) требование отражать схему базирования и закрепления детали на данном оборудовании в данном приспособлении.

Наиболее общими свойствами частных технологических решений являются:  $E_{\phi}$  – форма обрабатываемой (контролируемой) поверхности;  $E_{\text{оп}}$  – технологическое назначение оборудования и сущность технологической операции;  $E_{\text{сп}}$  – способ обработки поверхности;  $E_{\text{со}}$  – возможность сопряжения с оборудованием режущего и вспомогательного инструмента;  $E_{\phi}$  – возможность взаимного сопряжения режущего и вспомогательного инструмента.

Каждому частному технологическому решению соответствует одно или несколько наиболее общих свойств, что формально выражается следующим образом:

$$\forall r_{\text{пов}} [E_{\text{ф}}(r_{\text{пов}}) \wedge E_{\text{сп}}(r_{\text{пов}})], \quad (14)$$

т. е. всякая поверхность имеет определенную форму и предполагает определенный способ обработки (точение, фрезерование и т. д.):

$$\forall r_{\text{об}} [E_{\text{оп}}(r_{\text{об}}) \wedge E_{\text{со}}(r_{\text{об}})], \quad (15)$$

т. е. всякое оборудование предназначено для выполнения определенных операций (токарных, фрезерных, шлифовальных и т. д.) и допускает сопряжение с определенным режущим (фрезы, протяжки и т. д.) и вспомогательным (втулки переходные, втулки эксцентриковые и т. д.) инструментом:

$$\forall r_{\text{об}} E_{\text{оп}}(r_{\text{оп}}), \quad (16)$$

т. е. всякое наименование технологической операции отражает ее сущность:

$$\forall r_{\text{ри}} [E_{\text{ф}}(r_{\text{ри}}) \wedge E_{\text{сп}}(r_{\text{ри}}) \wedge E_{\text{со}}(r_{\text{ри}}) \wedge E_{\text{си}}(r_{\text{ри}})], \quad (17)$$

т. е. всякий режущий инструмент предназначен для обработки поверхностей определенной формы (плоских поверхностей, отверстий, и т. д.) и допускает сопряжение с определенным инструментом:

$$\forall r_{\text{ви}} [E_{\text{со}}(r_{\text{ви}}) \wedge E_{\text{си}}(r_{\text{ви}})], \quad (18)$$

т. е. всякий вспомогательный инструмент допускает сопряжение с определенным оборудованием и режущим инструментом:

$$\forall r_{\text{ми}} E_{\text{ф}}(r_{\text{ми}}), \quad (19)$$

т. е. всякий мерительный инструмент предназначен для контроля размеров поверхностей определенной формы:

$$\forall r_{\text{п}} E_{\text{сп}}(r_{\text{п}}), \quad (20)$$

т. е. каждая формулировка (текст) перехода предписывает определенный способ обработки (точить, фрезеровать, сверлить и т. д.).

На основании соответствий между наименованиями частных технологических решений и их наиболее общими свойствами (формулы (14)–(20)), а также значениями наименований частных технологических решений, обозначенными через  $d_2$ , и значениями их свойств, обозначенными через  $\theta$ , можно установить формальное соответствие между вариантами компонент  $R_{\text{п}}$  и возможными для них вариантами компонент  $\Omega_A$ .

Для этого всякому решению, обозначенному через  $r_{\gamma}$ , следует поставить в соответствие решение, обозначенное через  $r_{\delta}$ , при условии совпадения значений их одноименных свойств:  $\forall r_{\gamma} \exists r_{\delta} (\theta_{\alpha}^{\gamma} = \theta_{\alpha}^{\delta})$ .

Если обозначить множество возможных альтернатив  $r_{\delta}$  для решения  $r_{\gamma}$  через  $\Omega_B^{r_{\delta}}$ , то условие принадлежности альтернативы  $r_{\delta}$  к  $\Omega_B^{r_{\delta}}$  имеет вид:  $\forall r_{\delta} (\theta_{\alpha}^{\delta} = \theta_{\alpha}^{\gamma}) \rightarrow r_{\delta} \in \Omega_B^{r_{\delta}}$ . Тогда конкретная модель порождения возможных решений  $r_{\delta}$  для решений  $r_{\gamma}$  определяется формулой:

$$\Omega_B^{r_{\delta}} = \left\{ \forall r_{\delta} \mid \theta_{\alpha}^{\delta} = \theta_{\alpha}^{\gamma} \right\}. \quad (21)$$

Анализ свойств причинно-следственных связей частных технологических решений, приведенный в работе [7], позволил записать ряд отношений  $H_i$ :

$$\begin{aligned} & r_{\text{пов}} H_1 r_{\text{оп}} & (r_{\text{пов}}, r_{\text{оп}}) H_4 r_{\text{п}} \\ & (r_{\text{пов}}, r_{\text{оп}}) H_2 r_{\text{сх}} & (r_{\text{пов}}, r_{\text{оп}}, r_{\text{п}}) H_5 r_{\text{ри}} \\ & (r_{\text{пов}}, r_{\text{оп}}, r_{\text{сх}}, r_{\text{об}}) H_3 r_{\text{пр}} & (r_{\text{пов}}, r_{\text{оп}}, r_{\text{п}}, r_{\text{об}}, r_{\text{ри}}) H_6 r_{\text{ви}} \\ & r_{\text{пов}} H_7 r_{\text{ми}} & \end{aligned}$$

Каждое из указанных отношений выделяет на базовом множестве  $F$ :

- $H_1$  – наименование операции,
- $H_2$  – схему базирования и закрепления,
- $H_3$  – приспособление,
- $H_4$  – текст перехода,
- $H_5$  – режущий инструмент,
- $H_6$  – вспомогательный инструмент,
- $H_7$  – измерительный инструмент.

Путем последовательного переименования переменных формулы (21) с учетом формул (14)–(20) и от-

ношений  $H_4, \dots, H_8$  получены конкретные модели порождения возможных типовых технологических решений:

$$\Omega_B^{r_{\text{оп}}} = \left\{ \forall r_{\text{оп}} \mid \theta_{\text{оп}}^{\text{оп}} = \theta_{\text{оп}}^{\text{об}} \right\}, \quad (22)$$

$$\Omega_B^{r_{\text{ри}}} = \left\{ \forall r_{\text{ри}} \mid \theta_{\text{ф}}^{\text{ри}} = \theta_{\text{ф}}^{\text{пов}} \right\} \cup \left\{ \forall r_{\text{ри}} \mid \theta_{\text{со}}^{\text{ри}} = \theta_{\text{со}}^{\text{об}} \right\}, \quad (23)$$

$$\Omega_B^{r_{\text{ви}}} = \left\{ \forall r_{\text{ви}} \mid \theta_{\text{си}}^{\text{ви}} = \theta_{\text{си}}^{\text{ри}} \right\} \cup \left\{ \forall r_{\text{ви}} \mid \theta_{\text{со}}^{\text{ви}} = \theta_{\text{со}}^{\text{об}} \right\}, \quad (24)$$

$$\Omega_B^{r_{\text{ми}}} = \left\{ \forall r_{\text{ми}} \left| \theta_{\text{ф}}^{r_{\text{ми}}} = \theta_{\text{ф}}^{r_{\text{пов}}} \right. \right\}, \quad (25)$$

$$\Omega_B^{r_{\text{п}}} = \left\{ \forall r_{\text{п}} \left| \theta_{\text{сп}}^{r_{\text{п}}} = \theta_{\text{сп}}^{r_{\text{пов}}} \right. \right\} \cup \left\{ \forall r_{\text{п}} \left| \theta_{\text{сп}}^{r_{\text{п}}} = \theta_{\text{сп}}^{r_{\text{ри}}} \right. \right\}. \quad (26)$$

С учетом формулы (7) решение задачи (9) можно записать в следующем виде:

$$C_{\text{ОП}_1}(\Omega_A) = \Omega_B^{r_{\text{об}}} \cup \Omega_B^{r_{\text{п}}} \cup \Omega_B^{r_{\text{ри}}} \cup \Omega_B^{r_{\text{ви}}} \cup \Omega_B^{r_{\text{ми}}}. \quad (27)$$

### 3 ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА АЛЬТЕРНАТИВ

Теперь рассмотрим ряд утверждений, вполне очевидных с технологической точки зрения для формирования множества альтернатив.

**Утверждение 1.** Допустимый вид оборудования соответствует наименованию станочной технологической операции, т. е.  $r_{\text{об}} \sim r_{\text{оп}}$ . Если обозначить множество допустимых видов оборудования, на которых выполняются операции  $r_{\text{оп}}$ , через  $\Omega_D^{r_{\text{об}}}$ , то можно записать

$$\Omega_D^{r_{\text{об}}} = \left\{ \forall r_{\text{об}} \in \Omega_B^{r_{\text{об}}} \left| \theta_{\text{об}}^{r_{\text{об}}} = \theta_{\text{об}}^{r_{\text{оп}}} \right. \right\}. \quad (28)$$

**Утверждение 2.** Для обработки в одном переходе комбинации поверхностей различной формы допустимыми являются такие виды режущего инструмента, которые предназначены для обработки каждой из заданных поверхностей и могут быть установлены на заданном оборудовании, т. е.  $\bigwedge_{i=1}^n (r_{\text{ри}} \sim r_{\text{пов}_i}) \wedge (r_{\text{ри}} \sim r_{\text{об}})$ . Обозначив множество допустимых для данного перехода решений  $r_{\text{ри}}$  через  $\Omega_D^{r_{\text{ри}}}$ , с учетом того, что всякая поверхность имеет определенную форму и предполагает определенный способ обработки (со), закрепленный за оборудованием (точение, фрезерование, строгание и т. д.), получаем

$$\Omega_D^{r_{\text{ри}}} = \left\{ \forall r_{\text{ри}} \in \Omega_B^{r_{\text{ри}}} \left| \bigwedge_{i=1}^n \left( \theta_{\text{ф}}^{r_{\text{пов}_i}} = \theta_{\text{ф}}^{r_{\text{ри}}} \right) \wedge \left( \theta_{\text{со}}^{r_{\text{об}}} = \theta_{\text{со}}^{r_{\text{ри}}} \right) \right. \right\}. \quad (29)$$

**Утверждение 3.** Для обеспечения установки режущего инструмента данного вида на заданное оборудование допустимым является такой вид вспомогательного инструмента, который может сопрягать режущий инструмент (ри) с заданным оборудованием, т. е.  $(r_{\text{ви}} \sim r_{\text{ри}}) \wedge (r_{\text{ви}} \sim r_{\text{об}})$ . Формальное описание множества  $\Omega_D^{r_{\text{ри}}}$  допустимых для выбранного  $r_{\text{ри}}$  и заданного  $r_{\text{об}}$  решений  $r_{\text{ви}}$  имеет вид:

$$\Omega_D^{r_{\text{ви}}} = \left\{ \forall r_{\text{ви}} \in \Omega_B^{r_{\text{ви}}} \left| \left( \theta_{\text{си}}^{r_{\text{ви}}} = \theta_{\text{си}}^{r_{\text{ри}}} \right) \wedge \left( \theta_{\text{со}}^{r_{\text{ви}}} = \theta_{\text{со}}^{r_{\text{об}}} \right) \right. \right\}. \quad (30)$$

**Утверждение 4.** Допустимый вид измерительного инструмента определяется по виду контролируемой поверхности, т. е.  $r_{\text{ми}} \sim r_{\text{пов}}$ . Обозначив через  $\Omega_D^{r_{\text{ми}}}$  множество допустимых для заданного решения  $r_{\text{пов}}$  решений  $r_{\text{ми}}$ , исходя из утверждения 4 будем иметь

$$\Omega_D^{r_{\text{ми}}} = \left\{ \forall r_{\text{ми}} \in \Omega_B^{r_{\text{ми}}} \left| \theta_{\text{ф}}^{r_{\text{ми}}} = \theta_{\text{ф}}^{r_{\text{пов}}} \right. \right\}. \quad (31)$$

Таким образом, решение задачи (5) – множество допустимых альтернатив можно представить в виде:

$$C_{\text{ОП}_2}(\Omega_B) = \Omega_D = \Omega_D^{r_{\text{об}}} \cup \Omega_D^{r_{\text{п}}} \cup \Omega_D^{r_{\text{ри}}} \cup \Omega_D^{r_{\text{ви}}} \cup \Omega_D^{r_{\text{ми}}}. \quad (32)$$

Для дальнейшего повествования необходимо дать некоторые пояснения относительно нормативно-справочной базы. В основу нормативно-справочной базы следует положить ряд справочников, записанных в память компьютера в виде файлов или наборов данных. Тогда в качестве имени справочного файла (набора данных) можно использовать наименование решения (т. е.  $d_1 \in D_1$ ).

Ключом записи файла (набора данных) будет являться значение наименования технологического решения (т. е.  $d_2 \in D_2$ ). Набор характеристик  $d_3 \in D_3$  решения определяет структуру записи, значения характеристик  $d_4 \in D_4$  составят содержание записи.

Подобная организация нормативно-справочной базы системы реально осуществляет однозначное соответствие (т. е. установление связей  $C_1, C_2, C_3$ ) между наименованием решения (именем справочника), значениями наименования (ключами записей), наборами характеристик (структурой записи) и значениями характеристик (содержимым записи).

Наличие определенного свойства  $\alpha$  у конкретного частного технологического решения  $r_{\gamma}$  можно выразить с помощью соответствующего предиката  $E_{\alpha}$ . Тогда утверждение «частное технологическое решение  $r_{\xi}$  обладает свойством  $\alpha$ » запишем следующим образом:

$$E_{\alpha}(r_{\xi}). \quad (33)$$

Наличие свойства  $\alpha$  у заданного решения  $r_{\gamma}$ , т. е. значение «истина» предиката  $E_{\alpha}(r_{\gamma})$  вполне определяется наличием соответствующей характеристики  $t_{\alpha}$  в наборе  $d_3$  рассматриваемого решения  $r_{\gamma}$ . Но так как каждая характеристика  $t_{\alpha}$  набора  $d_3$  принимает свои значения из  $d_4$ , то есть смысл предположить наличие у свойства  $\alpha$  ряда значений  $\theta_{\alpha}$ . Например, одной из характеристик частного технологического решения  $r_{\text{пов}}$  (обрабатываемая поверхность) является форма обрабатываемой поверхности  $t_{\text{ф}}$ . Характеристика  $t_{\text{ф}}$  определяет свойство  $E_{\text{ф}}$  решения  $r_{\text{пов}}$  иметь ту или иную форму.

Обозначив значение свойства  $\alpha$  решения  $r_{\gamma}$  через  $\theta_{\alpha}^{r_{\gamma}}$  и используя предикат (33), можно формализовать высказывание «частное технологическое решение  $r_{\gamma}$  обладает свойством  $\alpha$ , и значение этого свойства есть  $\theta_{\alpha}^{r_{\gamma}}$ » следующим образом:

$$E_{\alpha}(r_{\gamma}) \wedge \theta_{\alpha}^{r_{\gamma}}. \quad (34)$$

Теперь понятно, что в результате решения задач выбора (4) и (5) определяются типовые технологические решения с такими значениями  $d_2$  своих наименований, наиболее общие свойства которых соответствуют свойствам заданных или ранее определенных решений.

Каждому значению  $d_2$  наименования частного технологического решения (индивидуального или типового) соответствует один набор характеристик  $d_3$ , определяющий конкретные свойства частного технологического решения.

Каждой характеристике  $t_i$  из набора  $d_3$  характеристика частного технологического решения  $r_\gamma$  в силу аксиомы (34) соответствует конкретное свойство решения  $r_\gamma$ . Удобно считать, что значение конкретного свойства  $r_\gamma$  совпадает со значением характеристики, определяющей данное свойство.

Установленные соответствия между характеристиками частных решений и их конкретными свойствами при совпадении значений характеристик и свойств решений дают возможность рассмотреть отношения между характеристиками различных технологических решений вида:

$$\left( t_i^{r_\delta} h t_j^{r_\gamma} \right), \quad (35)$$

где  $t_i^{r_\delta}$  –  $i$ -я характеристика из набора  $d_3^{r_\delta}$  решения  $r_\delta$ ;

$t_j^{r_\gamma}$  –  $j$ -я характеристика из набора  $d_3^{r_\gamma}$  решения  $r_\gamma$ ;

$h$  – отношение вида «=», «>», «≥», «<», «≤».

Отношение (35) представляет собой двухместный предикат, в котором переменная  $t_i^{r_\delta}$  относится к искомому решению  $r_\delta$ , а переменная  $t_j^{r_\gamma}$  относится к переменному или ранее определенному решению  $r_\gamma$ . Если переменным предиката (35) придать конкретные значения, то он может либо выполняться, либо не выполняться.

Выполнение предиката означает, что решение  $r_\delta$  соответствует решению  $r_\gamma$ , и наоборот.

Если решение  $r_\delta$  необходимо принять в зависимости от ряда решений  $r_\gamma, \dots, r_\phi$ , то условие выбора решения в данном случае имеет вид:

$$\left[ \bigwedge_{i_1=1}^n \left( t_{i_1}^{r_\delta} h t_{i_1}^{r_\gamma} \right) \right] \wedge \dots \wedge \left[ \bigwedge_{i_p=1}^m \left( t_{i_p}^{r_\delta} h t_{i_p}^{r_\phi} \right) \right]. \quad (36)$$

Тогда на основании (36) можно записать решение задачи (11) для  $r_\delta$  в обобщенном виде:

$$\Omega_{r_\tau}^{r_\delta} = \left\{ \forall r_\delta \in \Omega_{\mathcal{D}}^{r_\delta} \left[ \bigwedge_{i_1=1}^n \left( t_{i_1}^{r_\delta} h t_{i_1}^{r_\gamma} \right) \right] \wedge \dots \wedge \left[ \bigwedge_{i_p=1}^m \left( t_{i_p}^{r_\delta} h t_{i_p}^{r_\phi} \right) \right] \right\}. \quad (37)$$

Задание условий выбора технологических решений посредством двухместных предикатов вида (35) реализует динамическое формирование критериев выбора. При этом переменным величинам предикатов вида (35) действительные значения присваиваются по ходу решения задачи (11) из набора исходных данных системы или ее нормативно-справочной базы. Таким образом, полностью исключается задание заранее оговоренных значений критериев выбора в алгоритмах решения задачи (6).

Динамическое формирование критериев выбора позволяет реализовывать на практике важнейший принцип создания САПР – независимость программного обеспечения от нормативно-справочной базы и, как следствие, обеспечить высокую адаптируемость системы к изменениям внешней среды.

Поскольку набор  $d_3$  характеристики решений  $r_{\text{оп}}$  содержит по одной характеристике – «наименование операций», то следует считать, что  $\Omega_{r_\tau}^{r_{\text{оп}}} = \Omega_{\mathcal{D}}^{r_{\text{оп}}}$ . Для остальных типовых технологических решений с учетом формулы (36) имеют место соотношения:

$$\Omega_{r_\tau}^{r_{\text{пр}}} = \left\{ \forall r_{\text{пр}} \in \Omega_{\mathcal{D}}^{r_{\text{пр}}} \left[ \bigwedge_{i_1=1}^n \left( t_{i_1}^{r_{\text{пр}}} h t_{i_1}^{r_{\text{пов}}} \right) \right] \wedge \left[ \bigwedge_{i_2=1}^m \left( t_{i_2}^{r_{\text{пр}}} h t_{i_2}^{r_{\text{об}}} \right) \right] \right\}, \quad (38)$$

$$\Omega_{r_\tau}^{r_{\text{ви}}} = \left\{ \forall r_{\text{ви}} \in \Omega_{\mathcal{D}}^{r_{\text{ви}}} \left[ \bigwedge_{i_1=1}^n \left( t_{i_1}^{r_{\text{ви}}} h t_{i_1}^{r_{\text{пр}}} \right) \right] \wedge \left[ \bigwedge_{i_2=1}^m \left( t_{i_2}^{r_{\text{ви}}} h t_{i_2}^{r_{\text{об}}} \right) \right] \right\}, \quad (39)$$

$$\Omega_{r_\tau}^{r_{\text{ми}}} = \left\{ \forall r_{\text{ми}} \in \Omega_{\mathcal{D}}^{r_{\text{ми}}} \left[ \bigwedge_{i=1}^n \left( t_i^{r_{\text{ми}}} h t_i^{r_{\text{пов}}} \right) \right] \right\}. \quad (40)$$

В целом решение задачи (11) имеет вид:

$$C_{\text{ОПЗ}}(\Omega_{\mathcal{D}}) = \Omega_{r_\tau} = \Omega_{r_\tau}^{r_{\text{оп}}} \cup \Omega_{r_\tau}^{r_{\text{пр}}} \cup \Omega_{r_\tau}^{r_{\text{ви}}} \cup \Omega_{r_\tau}^{r_{\text{ми}}}. \quad (41)$$

Если в результате решения задачи (11) для типового технологического решения  $r_\xi$  из множеств допустимых

решений  $\Omega_{\mathcal{D}}^{r_\gamma}$  выделено множество искомых решений  $\Omega_{r_\tau}^{r_\gamma}$ , содержащее более одного элемента, то необходимо решить задачу (7) определения одного наилучшего (оптимального) типового технологического решения.

#### 4 ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ МЕТОДОМ ИДЕАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Если в результате решения задачи (6) для типового технологического решения  $r_\gamma$  из множества допустимых решений  $\Omega_{\text{Д}}^{r_\gamma}$  выделено множество искомых решений  $\Omega_{r_\gamma}^{r_\gamma}$ , содержащее более одного элемента, то необходимо решить задачу (7) определения одного наилучшего (оптимального) типового технологического решения.

Поскольку выбор технологических решений производится по наилучшему сочетанию их свойств, то оптимизацию выбора типовых технологических решений удобно выполнить методом идеальной точки. Для этого каждому типовому технологическому решению следует поставить в соответствие набор из  $n$  критериев оптимальности  $K_1, K_2, \dots, K_n$ , а наборы  $d_3$  характеристик типовых технологических решений дополнить характеристиками  $t_{i_{\text{ОП}}}$ , каждая из которых одноименна с одним из установленных критериев оптимальности  $K_i$ . По каждому из  $K_i$  критериев оптимальности устанавливается максимально возможное значение  $A_{K_i}$  соответствующей характеристики  $t_{i_{\text{ОП}}}$ . Тогда при учете  $n$  критериев оптимальности в  $n$ -мерном критериальном пространстве можно определить идеальную для данного типового технологического решения точку, имеющую по осям  $K_i$  координаты, численно равные  $A_{K_i}$ .

Каждое решение  $r_\gamma$  изображается в том же пространстве точкой, которая по осям  $K_i$  имеет координаты, численно равные действительным значениям характеристик  $t_{i_{\text{ОП}}}$ , одноименных с критериями  $K_i$ . Функция выбора оптимального по идеальной точке решения  $r_\xi$  определяется формулой:

$$C_{T_{\text{И}}}(\Omega_{r_\gamma}^{r_\gamma}) = \text{Arg min } \rho(r_\gamma, T_{\text{И}}), \quad (42)$$

где  $T_{\text{И}}$  – идеальная точка;

$$\rho(r_\gamma, T_{\text{И}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (A_{K_i} - t_{i_{\text{ОП}}}^{r_\gamma})^2}. \quad (43)$$

Функция  $C_{T_{\text{И}}}(\Omega_{r_\gamma}^{r_\gamma})$  определяет такое решение  $r_\gamma$ , которое в  $n$ -мерном критериальном пространстве минимально удалено от идеальной точки. Графическая интерпретация задачи оптимизации выбора технологических решений представлена на рисунке. Поэтому функцию выбора  $C_{\text{ОП4}}(\Omega_{r_\gamma}^{r_\gamma})$ , т. е. решение задачи (7), для  $r_\gamma$  можно представить в виде:

$$C_{\text{ОП4}}(\Omega_{r_\gamma}^{r_\gamma}) = C_{T_{\text{И}}}(\Omega_{r_\gamma}^{r_\gamma}). \quad (44)$$

Для доказательства формулы (44) необходимо рассмотреть два решения  $r_{\gamma 1}$  и  $r_{\gamma 2}$  и установить для всех типовых технологических решений свойство  $E_y$  – «удаленность от идеальной точки», которое принимает значения, определяемые по формуле:

$$\theta_y = \frac{1}{\rho(r_\gamma, T_{\text{И}})}. \quad (45)$$

Пусть  $C_{T_{\text{И}}}(\Omega_{r_\gamma}^{r_\gamma}) = \text{Arg min } \rho(r_\gamma, T_{\text{И}}) = r_{\gamma 1}$ .

Тогда  $\rho(r_{\gamma 1}, T_{\text{И}}) < \rho(r_{\gamma 2}, T_{\text{И}})$ , откуда следует, что

$$\frac{1}{\rho(r_{\gamma 1}, T_{\text{И}})} > \frac{1}{\rho(r_{\gamma 2}, T_{\text{И}})}.$$

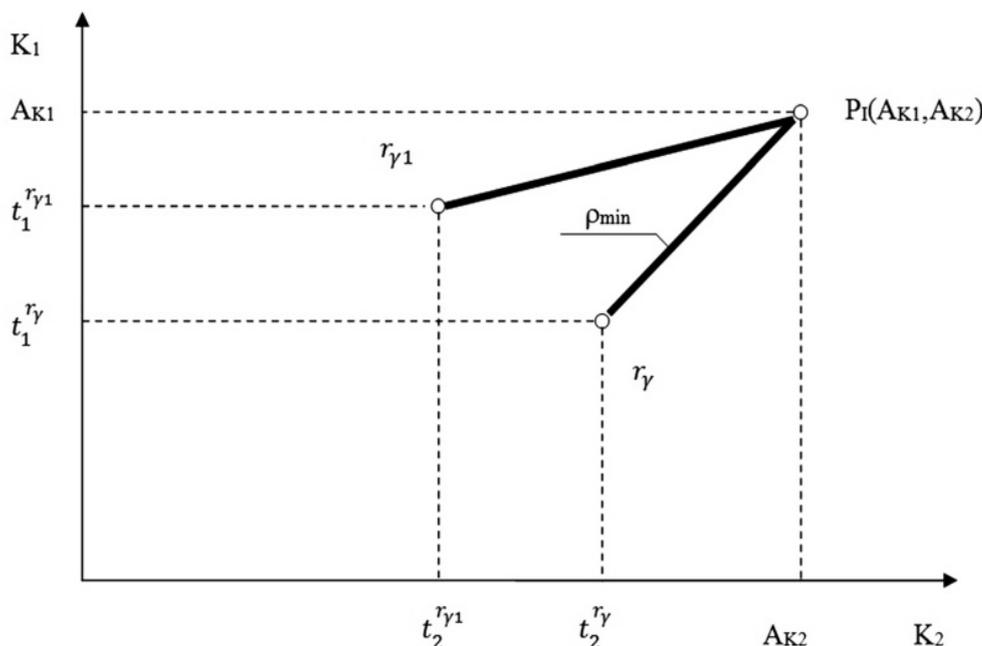


Рис. Графическая интерпретация задачи оптимизации выбора технологических решений

С учетом (39) можно записать  $E_y(r_{\gamma 1}) \wedge E_y(r_{\gamma 2}) \wedge (\theta_{y_1}^{r_{\gamma 1}} > \theta_{y_2}^{r_{\gamma 2}}) \rightarrow (r_{\gamma 1} < r_{\gamma 2})$ , т. е. в данном случае решение  $r_{\gamma 1}$  предшествует (предпочтительнее), решению  $r_{\gamma 2}$ , что и требовалось доказать.

Таким образом, в общем виде решение задачи (12) выражается формулой:

$$C_{\text{ОП}_4}(\Omega_{r_T}) = \Omega_{r_T}^{\text{ОП}} \cup C_{\text{ОП}_4}(\Omega_{r_T}^{\text{н}}) \cup C_{\text{ОП}_4}(\Omega_{r_T}^{\text{ри}}) \cup C_{\text{ОП}_4}(\Omega_{r_T}^{\text{ви}}) \cup C_{\text{ОП}_4}(\Omega_{r_T}^{\text{ми}}). \quad (46)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сделать вывод о том, что проведена формализация синтеза рациональных вариантов технологических операций при проектировании ТП изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий. Разработана математическая модель синтеза рациональных вариантов технологических операций при изготовлении опытных образцов структурно-сложных изделий. Доказано, что поскольку выбор технологических решений производится по наилучшему сочетанию их свойств, то оптимизацию их выбора удобно выполнить методом идеальной точки. Получена формула, по которой определяется «удаленность от идеальной точки», которая служит критерием оптимальности технологических решений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яблочников Е.И., Пирогов А.В., Андреев Ю.С. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении. СПб. : Университет ИТМО, 2018. 116 с. URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2427.pdf> (дата обращения: 29.01.2023).
2. Мельник М.А., Полубок В.А. Выбор метода проектирования технологических процессов // Матер. 55-й юбилейной науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск : БГУИР, 2019. С. 176. URL: [https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/36916/1/Melnik\\_Vybor.pdf](https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/36916/1/Melnik_Vybor.pdf) (дата обращения: 29.01.2023).
3. Соловьёва А.А. Автоматизация технологического проектирования при изготовлении сельскохозяйственной техники // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. пятой междунар. науч.-практ. конф. Гомель : Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2021. С. 165–166. URL: <https://gomselmash.by/o-kompanii/nttsk/nauchnaya-deyatelnost/sbornik-tezisev-dokladov-5-0j-konferenczii-2021.pdf> (дата обращения: 29.01.2023).
4. Кулик В.И. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении : учеб. пособие. СПб. : Балт. гос. техн. ун-т., 2018. 98 с. URL: <http://library.voennemeh.ru/cnau/kc5BPSvC7atbX2K.pdf> (дата обращения: 29.01.2023).
5. Петухов А.В. Формализация задачи выбора автоматизированной системы // Системный анализ и при-

кладная информатика. 2018. № 1. С. 16–20. URL: <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2018-1-16-20> (дата обращения: 29.01.2023).

6. Петухов А.В. Информационное обеспечение САПР технологических процессов опытных образцов структурно-сложных изделий // Информатика. 2022. Т. 19, № 4. С. 69–83. URL: <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-4-69-83> (дата обращения: 29.01.2023).

7. Петухов А.В. Выбор метода автоматизации проектирования технологических процессов изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий // Автоматизация процессов управления. 2023. № 1 (71). С. 112–122. URL: [http://apu.npomars.com/images/pdf/71\\_11.pdf](http://apu.npomars.com/images/pdf/71_11.pdf) (дата обращения: 09.04.2023).

8. Wynn D.C., Clarkson P.J. Process models in design and development // Res Eng Design. 2018. Vol. 29. pp. 161–202. URL: <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0262-7> (дата обращения: 09.04.2023).

9. Виберг А., Перссон Й., Эльвандер Й. Проектирование для аддитивного производства – обзор доступных методов проектирования и программного обеспечения // Журнал быстрого прототипирования. 2019. Т. 25, вып. 6. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-10-2018-0262/full/html> (дата обращения: 29.01.2023).

### REFERENCES

1. Iablochnikov E.I., Pirogov A.V., Andreev Iu.S. *Avtomatizatsiia tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva v priborostroenii* [Automation of Instrument Manufacturing Process Design]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2018. 116 p. Available at: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2427.pdf> (accessed 29.01.2023).
2. Melnik M.A., Polubok V.A. Vybora metoda projektirovaniia tekhnologicheskikh protsessov [A Choice of Method for Designing Technology Processes]. *Mater. 55-i iubileinoi nauch. konf. aspirantov, magistrantov i studentov BGUIR* [Proc. of 55th Anniversary Sci. Conf. for Postgraduates, Masters, and Students]. Minsk, BGUIR Publ., 2019, pp. 176. Available at: [https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/36916/1/Melnik\\_Vybor.pdf](https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/36916/1/Melnik_Vybor.pdf) (accessed 29.01.2023).
3. Soloveva A.A. Avtomatizatsiia tekhnologicheskogo projektirovaniia pri izgotovlenii selskokhoziaistvennoi tekhniki [Automation of Technological Design in the Manufacture of Agricultural Machinery]. *Innovatsionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse – segodnia i zavtra* [Proc. of 5th Int. Sci.- Pract. Conf. on Innovation Techniques Applied in Agricultural Sector: Present and Future]. Gomel, Research and Development Center for Combined Harvester JSC “Gomselmash” Publ., 2021, pp. 165–166. Available at: <https://gomselmash.by/o-kompanii/nttsk/nauchnaya-deyatelnost/sbornik-tezisev-dokladov-5-0j-konferenczii-2021.pdf> (accessed 29.01.2023).
4. Kulik V.I. *Avtomatizirovannye sistemy tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva v mashinostroenii*. Ucheb. posobie [Automated Systems

for Technological Preparation of Production in Mechanical Engineering]. St. Petersburg, Balt. State Tech. Uni. Publ., 2018. 98 p. Available at: <http://library.voenmeh.ru/cnau/kc5BPSvC7atbX2K.pdf> (accessed 29.01.2023).

5. Petukhov A.V. Formalizatsiia zadachi vybora avtomatizirovannoi sistemy [Formalization of the Problem of Selection of Automated System]. *Sistemnyi analiz i prikladnaia informatika* [System Analysis and Applied Information Science], 2018, no. 1, pp. 16–20. Available at: <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2018-1-16-20> (accessed 29.01.2023).

6. Petukhov A.V. Informatsionnoe obespechenie SAPR tekhnologicheskikh protsessov opytnykh obraztsov strukturno-slozhnykh izdelii [Information Support of CAD of Technological Processes of Structurally Complex Product Prototypes]. *Informatika* [Informatics], 2022, vol. 19, no. 4, pp. 69–83. Available at: <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-4-69-83> (accessed 29.01.2023).

7. Petukhov A.V. Vybor metoda avtomatizatsii proektirovaniia tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniia

opytnykh obraztsov strukturno-slozhnykh izdelii [Choosing the Method of Automated Design for Manufacturing the Prototypes of Products with Complex Design]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2023, no. 1 (71), pp. 112–122. Available at: [http://apu.npomars.com/images/pdf/71\\_11.pdf](http://apu.npomars.com/images/pdf/71_11.pdf) (accessed 09.04.2023).

8. Wynn D.C., Clarkson P.J. Process Models in Design and Development. *Res Eng Design*, 2018, vol. 29, pp. 161–202. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0262-7> (accessed 09.04.2023).

9. Viberg A., Persson Y., Elvander Y. Proektirovanie dlia additivnogo proizvodstva – obzor dostupnykh metodov proektirovaniia i programmnoho obespecheniia [Design for Additive Manufacturing – A Review of Available Design Methods and Software]. *Zhurnal bystrogo prototipirovaniia* [Rapid Prototyping Journal], 2019, vol. 25, iss. 6. Available at: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-10-2018-0262/full/html> (accessed 29.01.2023).