

# COMPUTER-AIDED ENGINEERING

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 658.512.011.56

А.В. Петухов

### ВЫБОР МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ 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 формализация выбора метода автоматизации проектирования технологических процессов изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий. Целью исследования является разработка математической модели процесса выбора метода автоматизации проектирования технологических процессов. Установлены шесть основных факторов, определяющих выбор метода автоматизации проектирования технологических процессов. Выявлены условия, определяющие выбор конкретного метода автоматизации проектирования в зависимости от значений установленных факторов. Сформирована рекомендуемая последовательность использования методов автоматизации проектирования технологических процессов изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий. Доказано, что для предприятий, обрабатывающих широкую номенклатуру сложных деталей, наиболее перспективным является внедрение системы автоматизированного проектирования технологических процессов, основанной на методе синтеза. Эта система должна сочетать индивидуальные технологические решения, принимаемые технологом на творческих этапах проектирования, таких как синтез маршрута обработки, с типовыми технологическими решениями, принимаемыми автоматически. По мере накопления единичных технологических процессов в базе готовых технологических решений, можно переходить к методу повторного их использования. После разработки достаточного для обобщения количества технологических процессов можно перейти к формированию унифицированных технологических процессов.

Ключевые слова: технологическая подготовка изготовления опытных образцов, структурно-сложные изделия, моделирование принятия решений.

doi: 10.35752/1991-2927\_2023\_1\_71\_112

### CHOOSING THE METHOD OF AUTOMATED DESIGN FOR MANUFACTURING THE PROTOTYPES OF COMPLEX DESIGN PRODUCTS

*Aleksandr Vladimirovich Petukhov, graduated from the Belarusian Polytechnic Institute; Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering Technology of 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 formalization of choosing the automated design method for manufacturing prototypes of complex design products. The aim of the study is to develop a mathematical model of choosing a method of automated design. Six main factors determining the choice of this method have been established. Conditions determining the choice of a specific method based on the values of these factors are defined. The recommended sequence of using methods for automated design is described. For enterprises processing a wide range of parts with complex design, it has been proven that the most promising method of automated design is the one based on the synthesis. This system should combine individual process solutions made by a manufacturing engineer at the creative stages of design, such as the synthesis of a processing route with standard process solutions made automatically. As the single production processes are accumulated in the base of ready-made process solutions, the next step is to move on to the method of their reuse. After a sufficient number of production processes is accumulated for generalization, it is possible to form the unified ones.

**Keywords:** processes of preparing the prototype manufacture, complex design products, modeling of decision-making.

#### ВВЕДЕНИЕ

При жестких сроках проектирования и освоения производства структурно-сложных изделий особое место в их жизненном цикле занимает изготовление опытных образцов. С одной стороны, этот процесс венчает конструкторскую разработку, а с другой – предваряет технологическую подготовку основного производства. Несмотря на важность вопросов разработки научно-обоснованной модели технологической подготовки производства (ТПП) опытных образцов, они до сих пор не нашли достойного отражения в научных исследованиях. Отчасти это объясняется тем, что информация по этой теме является закрытой, потому что может быть использована в конкурентной борьбе производителей.

Цель общего исследования заключалась в автоматизации проектирования при технологической подготовке изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий. Формализация выбора метода автоматизации проектирования технологических процессов (ТП) – это часть общего исследования, проводимая для решения следующих задач:

1. Установить факторы, определяющие выбор метода автоматизации проектирования ТП изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий.
2. Установить условия, определяющие выбор конкретного метода автоматизации проектирования ТП изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий, в зависимости от значений, определенных при решении предыдущей задачи.
3. Сформулировать рекомендуемую последовательность использования методов автоматизации проектирования ТП изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий.

#### 1 КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕМЕ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [1] описаны три основных метода автоматизированного проектирования ТП: индивидуальное

проектирование, проектирование на основе группового ТП и проектирование ТП методом синтеза. В работе [1] не определены факторы и условия, определяющие выбор метода автоматизации проектирования ТП. Это обстоятельство указывает на актуальность проведения исследования, направленного на разработку методики выбора метода автоматизации проектирования ТП изготовления вообще и опытных образцов структурно-сложных изделий в частности.

В работе [2] приводится сравнение методов проектирования ТП. Дается описание применения методов прямого проектирования, анализа и синтеза. Указано, что метод анализа широко применяется при автоматизации описаний групповых и типовых ТП. При его применении используются соответствующие текущей специализации процессы, что упрощает проектирование. В работе [2] не описаны факторы и условия, определяющие выбор метода автоматизации проектирования 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 факторов и условий, определяющих выбор метода автоматизации проектирования ТП.

В третьей главе работы [4], озаглавленной «Проектирование ТП в автоматизированной системе технологической подготовки производства (АСТПП)», наряду с описанием методов автоматизированного проектирования ТП, таких как метод адресации и метод синтеза, содержится информация об оптимизации технологических решений при автоматизированном проектировании. В работе рассматривается общая постановка задачи выбора оптимального ТП из множества рассматриваемых. В качестве критерия оптимальности выбрана себестоимость изготовления детали.

В работе [5] приводятся результаты многолетних исследований в области формализации задачи выбора автоматизированных систем для различных сфер проектировочной и офисной деятельности. Цель исследования заключалась в разработке методик качественной и количественной оценок при выборе автоматизированной системы, исходя из условий эксплуатации и требований заказчика.

В работе [6] определены три основных направления, по которым должна и будет развиваться цифровая трансформация проектирования ТП. Первое направление связано с внедрением программных продуктов, автоматизирующих выполнение функций управления проектами и документооборотом. Второе направление – расширение использования автоматизированных систем для получения управляющих программ для станков с ЧПУ. Третье направление связано с использованием 3D-моделей для выполнения прочностных расчетов.

Статья [7] 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.

В статье [8] рассмотрено большинство современных зарубежных и отечественных систем автоматизированного проектирования ТП (САПР ТП), решающих многие задачи ТПП. Однако в большинстве систем остается непонятным применяемый метод автоматизированного проектирования ТП, не учитывается существующая организационная структура подготовки производства, корректировка фактических данных (режимы резания, нормы времени) не отвечает требованиям современного производства. В статье предлагается активно использовать метод комплексного проектирования в САПР ТП.

В работе [9] проведен анализ существующего процесса формирования ТП заготовительно-штамповочного производства и предложен алгоритм автоматизированного формирования ТП на основе анализа заготовки и электронной модели детали.

Аналогичный подход не только для заготовительно-штамповочного производства, но и для всех видов производств, используемых при изготовлении опытных образцов структурно-сложных изделий, описан в работе [10].

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫБОРА МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТП

Перед оформлением результатов проектирования технологом выполняется комплекс интеллектуальных действий, состоящий из принятия полных технологических решений. Они представляют собой законченные предписания изменения состояния деталей и сборочных единиц.

Анализ состава полных технологических решений при проектировании процессов механической обработки  $r$  показывает, что они состоят из следующих частных технологических решений:

$\{r_{\text{пов}}\}$  – описание формируемых при обработке поверхностей,

$\{r_{\text{вп}}\}$  – наименование вида машиностроительного производства (группы операций),

$\{r_{\text{оп}}\}$  – наименование технологической операции,

$\{r_{\text{об}}\}$  – наименование и модель оборудования,

$\{r_{\text{сх}}\}$  – схема базирования и закрепления детали,

$\{r_{\text{п}}\}$  – содержательная формулировка предписания, то есть тексты переходов,

$\{r_{\text{пр}}\}$ ,  $\{r_{\text{ви}}\}$ ,  $\{r_{\text{ри}}\}$  и  $\{r_{\text{ми}}\}$  – наименование и обозначение приспособления, вспомогательных, режущих и измерительных инструментов соответственно.

Тогда полное технологическое решение можно представить в следующем виде:

$$r = \{r_{\text{пов}}, r_{\text{вп}}, r_{\text{оп}}, r_{\text{об}}, r_{\text{сх}}, r_{\text{п}}, r_{\text{пр}}, r_{\text{ви}}, r_{\text{ри}}, r_{\text{ми}}\} \quad (1)$$

Полное технологическое решение, аналитически представленное множеством (1), можно отобразить графически (рис. 1).

Каждый элемент, входящий в выражение (1), является элементом соответствующего одноименного с ним множества частных технологических решений  $R_{\text{пов}}, R_{\text{вп}}, R_{\text{оп}}, R_{\text{об}}, R_{\text{сх}}, R_{\text{пр}}, R_{\text{п}}, R_{\text{ри}}, R_{\text{ми}}, R_{\text{ви}}$ . Базовое множество  $F$  модели процесса принятия технологических решений  $M$  выражается формулой

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

На основании изложенного 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, то есть

$$r \in R_{\text{пов}} \cdot R_{\text{вп}} \cdot R_{\text{оп}} \cdot R_{\text{об}} \cdot R_{\text{сх}} \cdot R_{\text{пр}} \cdot R_{\text{п}} \cdot R_{\text{ри}} \cdot R_{\text{ми}} \cdot R_{\text{ви}} \quad (3)$$

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

$$R = I_R \cup T_R, \quad (4)$$

где  $I_R$  – множество частных индивидуальных технологических решений;  $T_R$  – множество частных типовых технологических решений.

Индивидуальные частные технологические решения  $I_R$  ввиду сложности и многообразия форм деталей, способов задания размеров, технических требований

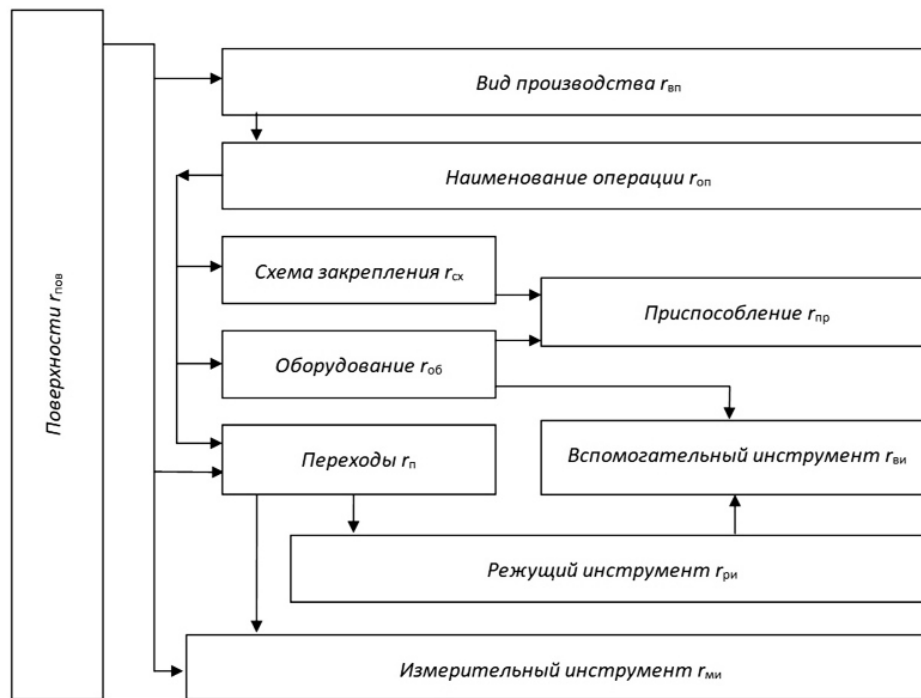


Рис. 1. Множество частных технологических решений и граф зависимостей их принятия

и отсутствия однозначности законов построения ТП носят эвристический характер и трудно предсказуемы. Наибольшая степень эвристичности свойственна следующим технологическим решениям: последующее состояние детали, схема базирования и закрепления и другим. Данные решения относятся к индивидуальным, а остальные – к типовым. По условию (4) множества  $I_R$  и  $T_R$  таковы, что

$$I_R \cap T_R = \emptyset. \quad (5)$$

Одноименные частные индивидуальные технологические решения образуют соответствующие непересекающиеся подмножества множеств  $I_R$  и  $T_R$ , т. е.

$$I_R = R_{Ипов} \cup R_{Иоп} \cup R_{Исх} \cup R_{Ипр} \cup R_{Ип}, \quad (6)$$

$$T_R = T_{Тоб} \cup T_{Три} \cup T_{Тви} \cup T_{Тми}, \quad (7)$$

где  $R_{Иi} \subset I_R$  – множество одноименных частных индивидуальных решений;  $R_{Тj} \subset T_R$  – множество одноименных частных типовых решений;  $R_{Ипов}$  – множество одноименных частных индивидуальных решений при описании поверхностей, формируемых при обработке;  $R_{Иоп}$  – множество одноименных частных индивидуальных решений при выборе наименований технологических операций;  $T_{Тоб}$  – множество одноименных частных типовых решений при выборе наименований и моделей оборудования;  $R_{Исх}$  – множество одноименных частных индивидуальных решений при выборе схем базирования и закрепления детали;  $R_{Ип}$  – множество одноименных частных индивидуальных решений при выборе содержательных формулировок предписа-

ний, т. е. текстов переходов;  $R_{Ипр}$  – множество одноименных частных индивидуальных решений при выборе наименований и обозначений приспособлений;  $T_{Иви}$ ,  $T_{Три}$  и  $T_{Тми}$  – множество одноименных частных типовых решений при выборе наименований и обозначений вспомогательных, режущих и измерительных инструментов соответственно.

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

При проектировании конкретного ТП на множестве  $R_{Ипов}$  выделяется  $R'_{Ипов}$  индивидуальных решений, определяющих этапы изменения состояния обрабатываемой детали, т. е.  $R'_{Иi} \subset \{r'_{Иi}\}$

$$R'_{Иi} \subset R_{Иi}, \quad (8)$$

$$R'_{Иi} \subset \{r'_{Иi}\}, \quad (9)$$

где  $r'_{Иj}$  – индивидуальные технологические решения для данного ТП.

В процессе проектирования технологии каждому элементу  $r'_{Иi}$  множества  $R'_{Иi}$  необходимо поставить в соответствие один (оптимальный) элемент  $r_{Тj}$  множества  $R_{Тj}$ , т. е. произвести отображение  $R'_{Иi}$  в  $R_{Тj}$ :

$$f: R'_{Иi} \rightarrow R_{Тj}, \quad (10)$$

где  $f$  – функция отображения  $R'_{Иi}$  в  $R_{Тj}$ , устанавливающая соответствие между элементами  $r'_{Иi} \in R'_{Иi}$  и  $r_{Тj} \in R_{Тj}$ :

$$r_{Тj} = f(r'_{Иi}). \quad (11)$$

Установление соответствия между элементами  $r'_{Ii}$  и  $r'_{Tj}$  в технологической интерпретации означает определение необходимого оборудования и инструментов для обработки заданных поверхностей с расчетом режимов.

Можно считать, что на вход процесса принятия технологического решения подается множество всех упорядоченных пар  $(r'_{Ii}, r'_{Tj})$ , и по условию  $f$  из них отбираются только те, для которых выполняется условие (11).

Все элементы  $r'_{Tj}$  множества  $R_{Tj}$ , удовлетворяющие (11), образуют подмножество  $R'_{Tj}$  множества  $R_{Tj}$ , т. е.

$$R'_{Tj} \subset R_{Tj}, \quad (12)$$

$$R'_{Tj} = \{r'_{Tj}\}, \quad (13)$$

где  $r'_{Tj}$  – типовые технологические решения для проектируемого ТП.

Входным воздействием процесса принятия технологических решений являются элементы множества

$$V = R'_{Ii} \cdot R_{Tj}, \quad (14)$$

а выходной величиной – элементы множества  $W \subset V$ ,

$$W = \{(r'_{Ii}, r'_{Tj})\}, \quad (15)$$

т. е. все пары  $(r'_{Ii}, r'_{Tj})$ , удовлетворяющие (11).

Множество  $V$  состоит из заданных технологом индивидуальных решений. Множество  $W$  состоит из заданных технологом индивидуальных решений и соответствующих им комплектов типовых решений. Индивидуальные и типовые технологические решения должны принадлежать заранее заданным множествам  $R_{Ii} = \{r_{Ii}\}$  и  $R_{Ti} = \{r_{Ti}\}$ .

Для дальнейших рассуждений имеет смысл разделить понятия «технологическое решение» и «значение технологического решения», предположив, что каждое технологическое решение может принимать ряд конкретных значений. Например, частное технологическое решение с наименованием «токарно-винторезный станок» принимает значения, выражаемые конкретной его моделью.

Вся совокупность значений  $q_{Ii}$  технологических решений  $r_{Ii}$  образует множество  $Q_{Ii} = \{q_{Ii}\}$ . Аналогично совокупность значений  $q_{Tj}$  технологических решений  $r_{Tj}$  образует некоторое множество  $Q_{Tj} = \{q_{Tj}\}$ . Учитывая (14), можно сделать вывод о том, что входные воздействия процесса принятия технологических решений принимают свои значения на множестве

$$Q_V = Q'_{Ii} \cdot Q'_{Tj}, \quad (16)$$

где  $Q'_{Ii} \subset Q_{Ii}$  – множество значений индивидуальных технологических решений для конкретного ТП.

Аналогично выходные величины принимают свои значения на множестве

$$Q_W \subset Q_V, \quad (17)$$

$$Q_W = Q'_{Ii} \cdot Q'_{Tj}, \quad (18)$$

что соответствует конечной цели процесса принятия технологических решений.

Характерным свойством процесса принятия технологических решений в условия ТПП опытных образцов является периодичность поступления входных воздействий. Процесс начинается в некоторый момент времени  $t_0$  – момент подачи на вход начального воздействия – и возобновляется с получением каждого следующего воздействия в момент времени  $t$ . Все моменты подачи воздействий на вход процесса принятия технологических решений образуют множество  $T = \{t\}$ .

Набор обработанных входных воздействий и принятых технологических решений в каждый момент времени  $t$  может служить характеристикой текущего состояния  $S$  рассматриваемого процесса. Совокупность текущих состояний  $S$  процесса принятия решений образует множество состояний процесса, т. е.  $S = \{s\}$ .

Опыт проектирования технологий показывает, что на принятие некоторых частных типовых технологических решений, например, на выбор вспомогательного инструмента, влияют и ранее принятые частные типовые технологические решения, в частности, выбранный режущий инструмент. Поэтому целесообразно считать, что существует определенная функциональная связь между очередным индивидуальным и типовым решением и предшествующим состоянием процесса

$$r_{Tj} = \eta(r_{Ik}, S_{k-1}). \quad (19)$$

Формула (19) дает основание полагать, что текущее состояние  $S_k$  процесса принятия технологических решений есть некоторая функция от предыдущего состояния  $S_{k-1}$  и очередного индивидуального решения  $r_{Ik}$

$$S_k = \varphi(r_{Ik}, S_{k-1}). \quad (20)$$

Таким образом, процесс принятия технологических решений имеет свойства системы и описывается восьмью параметрами

$$P = \{T, S, V, Q_V, W, Q_W, \eta, \varphi\}, \quad (21)$$

где  $T$  – множество моментов подачи воздействия на вход процесса принятия технологических решений;  $S$  – множество состояний процесса принятия технологических решений;  $V, W$  – множество входных воздействия и выходных величин процесса принятия технологических решений;  $Q_V, Q_W$  – множество значений входных воздействия и выходных величин процесса принятия технологических решений;  $\eta$  – функция связи текущего состояния процесса принятия технологических решений и предшествующего состояния;  $\varphi$  – функция связи текущего состояния процесса принятия технологических решений и очередного состояния.

Следовательно, к изучению процесса принятия технологических решений можно применить системный подход. Он позволяет построить математическую модель данного процесса с учетом его многоаспектности

и противоречивости, выделить его существенные свойства, представить процесс принятия технологических решений в виде множества его элементов и отношений, заданных в этом множестве.

Математическая модель  $M$  процесса принятия типовых технологических решений предполагает наличие некоторого множества  $F$  с заданным на нем набором отношений  $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , определяющих выбор типовых решений

$$M = \langle F, \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \rangle. \quad (22)$$

Основу построения отношений  $\{a\}$  составляет некоторое множество аксиом  $\{A\}$ , ограничивающих количество всех возможных отношений на множестве  $F$ . При этом необходимо иметь в виду следующее:

- множество  $F$  – это множество всех технологических решений,
- множество аксиом  $\{A\}$  – это совокупность основных закономерностей построения ТП,
- набор отношений  $\{a\}$  – это совокупность правил построения ТП, разработанных на основе закономерностей их построения.

Учитывая сказанное, следуют искать математическую модель процесса принятия технологических решений в виде:

$$M = \langle F, \{a\}, \{A\} \rangle. \quad (23)$$

Формально задача построения математической модели процесса принятия технологических решений состоит из следующих этапов:

- формирование базового множества  $F$  модели  $M$  при создании автоматизированной системы проектирования,
- построение множества аксиом  $\{A\}$  принятия типовых технологических решений,
- определение набора отношений  $\{a\}$  на базовом множестве  $F$  процесса принятия типовых решений.

Формальное описание базового множества определяет порядок его реального формирования. При этом необходимо выполнить следующие действия:

- определить состав базового множества, т. е. перечень всех частных решений, предназначенных для системной обработки,
- разделить все частные технологические решения на индивидуальные и типовые,
- отнести каждое решение к конкретному наименованию и присвоить ему значение наименования,
- определить набор характеристик каждого решения, их наименования и численные значения,
- установить однозначное соответствие между наименованиями решений, значениями наименований, наборами характеристик и значениями характеристик.

Частные технологические решения, отнесенные к индивидуальным, необходимо включить в состав исходных данных для САПР ТП, а отнесенные к типовым – в состав нормативно-справочной базы САПР ТП. С це-

лью уменьшения объема исходных данных для САПР ТП, которые формируются технологом, целесообразно наборы характеристик индивидуальных решений и их численные значения также включить в состав нормативно-справочной базы САПР ТП.

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  $r_\xi$  можно выразить с помощью соответствующего предиката  $E_\alpha$ . Тогда утверждение «частное технологическое решение  $r_\xi$  обладает свойством  $\alpha$ » запишем следующим образом:

$$E_\alpha(r_\xi). \quad (24)$$

Наличие свойства  $\alpha$  у заданного решения  $r_\xi$ , т. е. значение «истина» предиката  $E_\alpha(r_\xi)$  вполне определяется наличием соответствующей характеристики  $t_\alpha$  в наборе  $d_3$  рассматриваемого решения  $r_\xi$ . 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  $r_{пов}$  (обрабатываемая поверхность) является форма обрабатываемой поверхности  $t_\phi$ . Характеристика  $t_\phi$  определяет свойство  $E_\phi$  решения  $r_{пов}$  иметь ту или иную форму.

Обозначив значение свойства  $\alpha$  решения  $r_\xi$  через  $\theta_\alpha^{r_\xi}$  и используя предикат (24), можно формализовать высказывание «частное технологическое решение  $r_\xi$  обладает свойством  $\alpha$ , и значение этого свойства есть  $\theta_\alpha^{r_\xi}$ » следующим образом:

$$E_\alpha(r_\xi) \wedge \theta_\alpha^{r_\xi}. \quad (25)$$

Предикат (24) позволяет выбирать частные технологические решения с заданными свойствами для последующего отбора с помощью формулы (25) из всех  $r_\xi$ , обладающих этими свойствами и только таких, которые имеют определенные значения этих свойств.

Формально содержание высказывания «если набор характеристик  $d_3$  решения  $r_\xi$  содержит характеристику  $t_\phi$ , то решение  $r_\xi$  обладает свойством  $E_\phi$ » можно записать в виде:

$$(t_f \in d_3^{r_\xi}) \rightarrow E_f(r_\xi). \tag{26}$$

Надстрочный индекс  $r_\xi$  показывает, что набор  $d_3$  относится к решению  $r_\xi$ .

Отношение, задаваемое на множестве

$$F = R_{II} \cdot R_T, \tag{27}$$

выделяет на нем некоторое подмножество, в которое входят только такие  $r$ , элементы  $r_{II}$  и  $r_T$  наборов которых находятся в данном отношении. Таким образом, под отношением на  $F$  следует понимать некоторое ус-

ловие, выполнение которого выделяет на  $F$  заранее обусловленное подмножество.

Анализ свойств причинно-следственных связей частных технологических решений, выполненный на основе принятой системы аксиом, дает возможность построить матрицу, приведенную в таблице 1.

В каждой строке матрицы, соответствующей частному технологическому решению  $r_\xi$ , отмечены единицей такие решения  $r_\delta$ , которые принимаются на основе  $r_\xi$ . Тогда в каждом столбце данной матрицы, соотнесенном с частным технологическим решением  $r_\delta$ , единицей отмечены такие решения  $r_\xi$ , в зависимости от которых принимаются  $r_\delta$ . Нулем помечены решения, взаимно не влияющие друг на друга.

Матрица позволяет записать ряд отношений  $H_i$ :

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

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.

Окончательный набор отношений на  $F$  имеет вид:

$$(H_0 C^{H_0}, H_1 C^{H_1}, \dots, H_7 C^{H_7}). \tag{28}$$

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫБОРА МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТП

Для подведения итогов введем следующие обозначения:

$c_p$  – описание обрабатываемых в данной операции поверхностей детали, характеризующее состояние детали после выполнения этой операции;

Таблица 1

Матрица причинно-следственных связей

	$r_{пов}$	$r_{оп}$	$r_{об}$	$r_{сх}$	$r_{пр}$	$r_{п}$	$r_{ри}$	$r_{вс}$	$r_{ми}$
$r_{пов}$	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1
$r_{оп}$	1	0	-1	-1	0	-1	0	0	0
$r_{об}$	0	1	0	0	-1	0	0	-1	0
$r_{сх}$	0	1	0	0	-1	0	0	0	0
$r_{пр}$	0	0	1	1	0	0	0	0	0
$r_{п}$	0	1	0	0	0	0	-1	0	0
$r_{ри}$	0	0	0	0	0	1	0	-1	0
$r_{вс}$	0	0	1	0	0	0	1	0	0
$r_{ми}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0

$c_{p-1}^\alpha A_p c_p^\alpha$  – операция процесса-аналога, выполнение которой переводит деталь-аналог в состояние  $c_p$ ;

$c_{q-1}^\alpha A_q c_q^\alpha$  – переход операции процесса-аналога, выполнение которого переводит деталь-аналог в состояние  $c_q$ ;

$c_{r-1}^\alpha A_r c_r^\alpha$  – переход, который необходимо включить в соответствующую операцию процесса-аналога.

Используя логический символ отрицания  $\neg$ , высказывание «переход  $c_{q-1}^\alpha A_q c_q^\alpha$  исключить» можно записать следующим образом:  $\neg c_{q-1}^\alpha A_q c_q^\alpha$ . Тогда для операции полное технологическое решение «перевести в состояние  $c_p$ , выполнив операцию  $c_{p-1}^\alpha A_p c_p^\alpha$ , в которой исключен переход  $c_{q-1}^\alpha A_q c_q^\alpha$  и добавлен переход  $c_{r-1}^\alpha A_r c_r^\alpha$ », можно представить в виде  $r^o = (c_p, c_{p-1}^\alpha A_p c_p^\alpha, \neg c_{q-1}^\alpha A_q c_q^\alpha, c_{r-1}^\alpha A_r c_r^\alpha)$ . Полное технологическое решение для перехода имеет вид:

$$r = \begin{cases} (r_{\text{пов}} \in c_p, c_{q-1}^\alpha A_q c_q^\alpha) \\ (r_{\text{пов}} \in c_p, c_{r-1}^\alpha A_r c_r^\alpha) \end{cases} \quad (29)$$

Выражение (29) описывает  $r$ , если в данной операции используется переход-аналог, а выражение (30) – если в данную операцию вводится оригинальный переход. Поскольку аналоговый переход включает фиксированные аналоговые частные технологические решения, т. е.  $c_{q-1}^\alpha A_q c_q^\alpha = (r_{\text{оп}}^\alpha, r_{\text{об}}^\alpha, r_{\text{сх}}^\alpha, r_{\text{пр}}^\alpha, r_{\text{п}}^\alpha, r_{\text{ри}}^\alpha, r_{\text{ви}}^\alpha, r_{\text{ми}}^\alpha)$ , и каждое из них есть элемент соответствующего множества  $r_\gamma^\alpha \in R_\gamma$ , то базовое множество  $F$  содержит все технологические решения, принимаемые при проектировании ТП, и на нем сохраняется весь набор отношений  $H_i$ . При этом аналоговый переход  $c_{q-1}^\alpha A_q c_q^\alpha$  включается в проектируемый ТП, если для всех решений  $r_\xi^\alpha$  выполняются отношения  $H_p$ , а если для аналогового перехода  $c_{q-1}^\alpha A_q c_q^\alpha$  не выполняется хотя бы одно из отношений  $H_p$ , то он не включается в проектируемый ТП.

Как правило, в условиях метода повторного использования единичных ТП, основанного на готовых технологических решениях, на всех этапах проектирования технологий, проектировщик принимает решения об очередности обработки поверхностей детали; о включении, доработке или не включении в разрабатываемый ТП аналогового перехода; о введении в разрабатываемый ТП нового перехода.

Таким образом, указанный метод характеризуется отсутствием типовых решений, принимаемых системой (а если таковые есть, то имеет место метод сочетания решений); реализацией всех функций выбора технологом; областью задания функций выбора  $C^{H_i}$  по всему базовому множеству  $F$  решений.

Так как в данном случае  $R_T = \emptyset$ , то с учетом (27) метод повторного использования единичных ТП является частным случаем метода сочетания решений.

Характерной особенностью использования унифицированного ТП (УТП) является ограничение множеств частных технологических решений применительно к конкретной комплексной детали, поэтому

$$r_\xi^{\text{к.д.}} \in R_\xi^{\text{к.д.}}, R_\xi^{\text{к.д.}} \subset R_\xi. \quad (31)$$

Надстрочный индекс «к.д.» означает, что данное решение или множество решений относится к конкретной комплексной детали.

В силу (31) можно считать, что базовое множество  $F^{\text{к.д.}}$  решений при использовании УТП является ограничением множества  $F$  на данную комплексную деталь.

Реализация всех функций выбора, в том числе и функции  $C^{H_0}$  определения порядка обработки поверхностей детали, производится системой, т. е. в методе использования УТП отсутствуют индивидуальные решения ( $R_{\text{И}} = \emptyset$ ), но сохраняется справедливость формулы (27). Таким образом, метод использования УТП также является частным случаем метода сочетания решений.

Проектирование ТП на основе метода синтеза отличается тем, что частные решения ограничиваются применительно к конкретной группе деталей, например, длинных валов, втулок и т. д.:  $R_{\text{об}}^{\text{г.д.}} \subset R_{\text{об}}, R_{\text{сх}}^{\text{г.д.}} \subset R_{\text{сх}}, \dots, R_{\text{п}}^{\text{г.д.}} \subset R_{\text{п}}$ , но сохраняется произвольная конфигурация детали, относящейся к данной группе:

$$R_{\text{пов}}^{\text{г.д.}} \subset R_{\text{пов}}, \quad (32)$$

поэтому базовым множеством решений  $F^{\text{г.д.}}$  метода синтеза ТП является подмножество множества  $F$ . Надстрочный индекс «г.д.» указывает, что данные решения относятся к конкретной группе деталей. На множестве  $F^{\text{г.д.}}$  сохраняется весь набор отношений с областью задания функций выбора  $C^{H_i}$  в силу (32) по всему множеству  $F$ .

Реализация всех функций выбора осуществляется системой, т. е. метод синтеза ТП характерен отсутствием индивидуальных решений  $R_{\text{И}} = \emptyset$ , что не нарушает справедливости формулы (27). Из этого следует, что рассмотренный метод также является частным случаем метода сочетания решений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из описанного выше можно сделать вывод о том, что существует шесть основных факторов, определяющих выбор метода автоматизации проектирования ТП:

1. базовое множество решений;
2. характер множества индивидуальных решений;
3. характер множества типовых решений;
4. область задания функций выбора;
5. набор функций выбора, реализуемых технологом;
6. набор функций выбора, реализуемых системой.

Условия, определяющие выбор конкретного метода автоматизации проектирования в зависимости от значенных перечисленных факторов, приведены в таблице 2.



Условия, определяющие метод автоматизации проектирования ТП

Базовое множество	Характер множества		Область задания функций выбора	Набор функций выбора, реализуемых системой		Метод автоматизации проектирования ТП
	Индивидуальных решений	Типовых решений		технологом	системой	
$F$	$R_{И} \neq \emptyset$	$R_{Т} = \emptyset$	$F$	$C^{H_i}$ ( $i = 1, \dots, n$ )	-	Повторное использование единичных ТП
$F^{к.д.} \subset F$	$R_{И} = \emptyset$	$R_{Т} \neq \emptyset$	$F^{к.д.}$	-	$C^{H_i}$ ( $i = 1, \dots, n$ )	Использование УТП
$F^{г.д.} \subset F$	$R_{И} = \emptyset$	$R_{Т} \neq \emptyset$	$F$	-	$C^{H_i}$ ( $i = 1, \dots, n$ )	Синтез ТП
$F$	$R_{И} = \emptyset$	$R_{Т} \neq \emptyset$	$F$	$C^{H_i}$ ( $i = 1, \dots, n$ )	$C^{H_i}$ ( $i = 1, \dots, n$ )	Сочетание технологических решений

На начальной стадии внедрения САПР ТП, когда архив ТП практически не заполнен, невозможно применять методы повторного использования единичных ТП и проектирования на базе УТП. Доминирующим методом, который можно использовать на этой стадии, является метод синтеза.

По мере наполнения архива ТП появляется возможность использования метода повторного использования единичных ТП. При этом перед началом проектирования нового ТП выполняется проверка по обозначению детали или сборочной единицы его наличия в архиве. При положительном результате поиска выполняется корректировка размера партии деталей или сборочных единиц и, при необходимости, параметров и количества заготовок. Последнее характерно для случаев, когда из одной заготовки можно получить несколько деталей.

При накоплении в архиве значительного количества ТП целесообразно использовать подсистему поиска и заимствования аналога. В качестве параметров поискового описания в созданной САПР ТП использовались следующие:

1. наименование детали (сборочной единицы),
2. технологическая последовательность (маршрут) ее обработки (сборки),
3. набор конструктивных параметров.

После обнаружения аналога, используя элементы метода синтеза, проводится корректировка элементов ТП и сохранение результатов в архиве.

Метод, основанный на использовании УТП, рекомендуется применять в случае накопления в архиве значительного количества ТП на технологически подобные детали.

Предложенный подход использован при создании САПР ТП изготовления опытных образцов зерноуборочной и кормоуборочной техники, информационное обеспечение которой описано в работе [10]. Преимущество приведенного подхода заключается в том, что он послужил

теоретической основой разработки информационного обеспечения САПР ТП опытных образцов структурно-сложных изделий.

Перед вводом системы в эксплуатацию были сформированы базы данных технологического проектирования (групп операций, операций, оборудования, текстов переходов, приспособлений, вспомогательных, режущих и измерительных инструментов). Созданные базы данных были взаимосвязаны, а также был создан архив результатов технологического проектирования. Поэтому даже самый первый ТП был разработан с использованием метода сочетания технологических решений, когда выбор операции и состав переходов реализовывался технологом, а модели оборудования, приспособление, вспомогательные, режущие и измерительные инструменты выбирались автоматизированно. Результаты проектирования записывались в архив. Повторное использование единичных ТП было организовано через подсистему поиска и заимствования аналога.

В дальнейшем для конкретной комплексной детали использовался УТП, а для конкретной группы деталей – синтез ТП, при котором системой реализовывался полный набор функций выбора.

Создание указанной САПР ТП велось параллельно с выполнением научно-исследовательской работы (НИР), включающей следующие этапы:

- исследование функциональной структуры системы ТПП опытных образцов [11];
- моделирование принятия решений при выборе методов автоматизации ТПП опытных образцов кормоуборочной и зерноуборочной техники [12];
- разработка модели принятия решений при проектировании ТП изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий [13].

Внедрение созданной в результате проведенной НИР САПР ТП в производственный цикл изготовления

опытных образцов кормоуборочной и зерноуборочной техники обеспечило повышение производительности проектирования в 7,8 раза. К недостаткам не самого подхода, а его практической реализации, можно отнести отсутствие обратной связи с системой проектирования конструкции, а именно, создание базы данных графических элементов, которые могут быть изготовлены экспериментальным производством.

## 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://libeloc.bsuir.by/bitstream/123456789/36916/1/Melnik\\_Vybor.pdf](https://libeloc.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. Гомель : Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2021. С. 165–166. URL: <https://gomselmash.by/o-kompanii/nttsk/nauchnaya-deyatelnost/sbornik-tezisev-dokladov-5-oj-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.voenmeh.ru/snau/kc5BPSvC7atbX2K.pdf> (дата обращения: 29.01.2023).

5. Петухов А.В. Формализация задачи выбора автоматизированной системы // Системный анализ и прикладная 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. Цифровая трансформация проектирования технологических процессов при подготовке инженеров-проектировщиков: история и перспективы // Цифровая трансформация. 2020. № 1. С. 57–72. URL: <https://doi.org/10.38086/2522-9613-2020-1-57-72> (дата обращения: 29.01.2023).

7. 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).

8. Автоматизация проектирования технологических процессов / Д. Головин, С. Беляева, Н. Жидких, А. Мисаилов // ИНТЕРАГРОМАШ 2022 E3S Web of Conferences 363, 04006 (2022). URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236304006> (дата обращения: 29.01.2023).

9. Автоматизированное формирование технологического процесса на основе анализа заготовки и геометрии детали по электронной модели / А.И. Сидорова, Ю.В. Полянский, О.В. Железнов, М.Н. Ярдаева // Автоматизация процессов управления. 2022. № 3 (69). С. 127–137. URL: [http://apu.npomars.com/images/pdf/69\\_14.pdf](http://apu.npomars.com/images/pdf/69_14.pdf) (дата обращения: 29.01.2023).

10. 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).

11. Петухов А.В. Исследование функциональной структуры системы технологической подготовки производства опытных образцов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1993. № 6. С. 26–29. URL: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/15228/%d0%a4%d0%b0%d0%b9%d0%bb%2002.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 29.01.2023).

12. Петухов А.В. Моделирование принятия решений при выборе методов автоматизации технологической подготовки производства опытных образцов кормоуборочной и зерноуборочной техники // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (научные чтения, посвящ. П.О. Сухому). Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2000. С. 70–73. URL: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/15242/%d0%a4%d0%b0%d0%b9%d0%bb%2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 29.01.2023).

13. Петухов А.В. Модель принятия решений при проектировании технологических процессов изготовления опытных образцов // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. (научн. чтения, посвящ. П. О. Сухому). Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2006. С. 85–86. URL: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/12231/%d0%9f%d0%b5%d1%82%d1%83%d1%85%d0%be%d0%b2%2c%20d0%90.%20%d0%92.%20d0%9c%d0%be%d0%b4%d0%b5%d0%bb%d1%8c....pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 29.01.2023).

## REFERENCES

1. Yablochnikov E.I., Pirogov A.V., Andreev Yu.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. *Vybor metoda proektirovaniia 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 Scientific Conference for Postgraduate, Candidates for a Master's Degree and Students of BSUIR]. Minsk, BSUIR Publ., 2019, p. 176. Available at: [https://libeloc.bsuir.by/bitstream/123456789/36916/1/Melnik\\_Vybor.pdf](https://libeloc.bsuir.by/bitstream/123456789/36916/1/Melnik_Vybor.pdf) (accessed 29.01.2023).

3. Soloveva A.A. Avtomatizatsiia tekhnologicheskogo proektirovaniia pri izgotovlenii selskokhoziaistvennoi tekhniki [Automation of Technological Design in the Manufacture of Agricultural Machinery]. *Innovatsionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse – segodnia i zavtra* [Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex – Today and Tomorrow]. Gomel, Scientific and Technical Center of Combine Building JSC 'Gomselmash' Publ., 2021, pp. 165–166. URL: <https://gomselmash.by/o-kompanii/nttsk/nauchnaya-deyatelnost/sbornik-tezisev-dokladov-5-oj-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. Textbook]. 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. Tsifrovaia transformatsiia proektirovaniia tekhnologicheskikh protsessov pri podgotovke inzhenerov-proektirovshchikov: istoriia i perspektivy [Digital Transformation of Technological Design in the Preparation of Design Engineers: History and Prospects]. *Tsifrovaia transformatsiia* [Digital Transformations], 2020, no. 1, pp. 57–72. Available at: <https://doi.org/10.38086/2522-9613-2020-1-57-72> (accessed 29.01.2023).
7. 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).
8. Golovin D., Beliaeva S., Zhidkikh N., Misailov A. Avtomatizatsiia proektirovaniia tekhnologicheskikh protsessov [Automation of Design of Technological Processes]. *INTERAGROMASH 2022 E3S Web of Conferences 363, 04006* (2022). Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236304006> (accessed 29.01.2023).
9. Sidorova A.I., Polyanskov Iu.V., Zheleznov O.V., Yardaeva M.N. Avtomatizirovannoe formirovanie tekhnologicheskogo protsesssa na osnove analiza zagotovki i geometrii detali po elektronnoy modeli [Automated Formation of the Technological Process Based on the Analysis of the Workpiece and the Geometry of the Part According to the Electronic Model]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2022, no. 3 (69), pp. 127–137. Available at: [http://apu.npomars.com/images/pdf/69\\_14.pdf](http://apu.npomars.com/images/pdf/69_14.pdf) (accessed 29.01.2023).
10. 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).
11. Petukhov A.V. Issledovanie funktsionalnoi struktury sistemy tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva opytnykh obraztsov [Study of the Functional Structure of the System of Technological Preparation for the Production of Prototypes]. *Traktory i selskokhoziaistvennye mashiny* [Tractors and Agricultural Machines], 1993, no. 6, pp. 26–29. Available at: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/15228/%d0%a4%d0%b0%d0%b9%d0%bb%2002.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed 29.01.2023).
12. Petukhov A.V. Modelirovanie priniatiia reshenii pri vybore metodov avtomatizatsii tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva opytnykh obraztsov kormouborochnoi i zernouborochnoi tekhniki [Modeling Decision-Making when Choosing Methods for Automating the Technological Preparation for the Production of Prototypes of Forage Harvesting and Grain Harvesting Equipment]. *Sovremennye problemy mashinovedeniia. Tez. dokl. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (nauchnye chteniia, posvyashch. P.O. Sukhomu)* [Modern Problems of Machine Science: Abstracts of the Reports of the International Scientific and Technical Conference (Scientific Readings Dedicated to P. O. Sukhoi)]. Gomel, Sukhoi State Tech. Uni of Gomel Publ., 2000, pp. 70–73. Available at: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/15242/%d0%a4%d0%b0%d0%b9%d0%bb%2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed 29.01.2023).
13. Petukhov A.V. Model priniatiia reshenii pri proektirovanii tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniia opytnykh obraztsov [Decision-Making Model in the Design of Technological Processes for the Manufacture of Prototypes]. *Sovremennye problemy mashinovedeniia. Tez. dokl. VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (nauch. chteniia, posviashch. P.O. Sukhomu)* [Modern Problems of Machine Science: Abstracts of the Reports of the International Scientific and Technical Conference (Scientific Readings Dedicated to P.O. Sukhoi)]. Gomel, Sukhoi State Tech. Uni of Gomel Publ., 2006, pp. 85–86. Available at: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/12231/%d0%9f%d0%b5%d1%82%d1%83%d1%85%d0%be%d0%b2%2c%20%d0%90.%20%d0%92.%20%d0%9c%d0%be%d0%b4%d0%b5%d0%bb%d1%8c...pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed 29.01.2023).