

На правах рукописи

Рахмилевич Евгений Георгиевич

**РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ
ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТРУКТУР С УЧЕТОМ
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

Специальность: 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

Научный руководитель: **Постникова Елена Сергеевна**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Баурова Наталья Ивановна**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет (МАДИ)», профессор кафедры
производства и ремонта автомобилей и
дорожных машин, декан факультета дорожных
и технологических машин

Кравченко Игорь Николаевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный университет – МСХА имени К.А.
Тимирязева»,
профессор кафедры технического сервиса
машин и оборудования

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт конструкторско-
технологической информатики Российской
академии наук»

Защита состоится 19 октября 2023 г. в _____ часов на заседании диссертационного
совета 24.2.331.18 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана) по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 7, ауд.
414мт.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим
выслать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на
сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Е.С. Постникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

С учетом ужесточения санкционной политики в отношении Российской Федерации актуальность исследования обусловлена потребностью в организации интегрированных производственных структур промышленности для выполнения портфеля заказов в условиях кратного увеличения гособоронзаказа, необходимости импортозамещения критических комплектующих, а также увеличения доли продукции двойного и гражданского назначения (к 2030 году - не менее чем до 50 %). Для обеспечения рационального выбора предприятий, которые требуют минимальных ресурсов (инвестиций) для подготовки производства рассматриваемого изделия, необходимо учитывать конструкторско-технологические ограничения (КТО), выявляемые в рамках оценки изделия на производственную технологичность. Различные машиностроительные предприятия имеют определенные производственно-технологические возможности (ПТВ), в связи с чем производственная технологичность одного и того же изделия на разных предприятиях-изготовителях будет отличаться. В этом случае отработку производственной технологичности целесообразно осуществлять на основе совместного управления конфигурацией производственной системы выбранных предприятий и конфигурацией конструкторско-технологического состава изделия.

В ракетно-космической промышленности (РКП) в условиях увеличения объемов производства изделий специального назначения, перехода к крупносерийному производству космических аппаратов, освоения новой номенклатуры гражданского назначения, реализации «Стратегии цифровой трансформации Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 года и перспективу до 2030 года» портфель заказов формируют с учетом заданий по освоению новой номенклатуры изделий, что требует изменения параметров производства. При этом значительную роль играет оценка производственной технологичности.

В настоящей диссертации рассмотрен вопрос создания интегрированных производственных структур для изготовления изделий РКП с учетом КТО на основе оценки производственной технологичности изделий.

Степень разработанности проблемы. Различные аспекты проблемы определения КТО, обеспечения и оценки производственной технологичности конструкции изделий (ТКИ) и их составных элементов нашли свое отражение в работах отечественных ученых В.И. Аверченкова, Ю.Д. Амирова, Б.М. Базрова, А.Н. Балабанова, Б.С. Балакшина, В.Ф. Безъязычного, М.В. Вартанова, А.А. Гусева, В.А. Долгова, Г.Х. Ирзаева, В.А. Исаченко, Б.И. Когана, И.М. Колесова, В.С. Корсакова, А.И. Кубарева, В.В. Кузьмина, В.Л. Михельсон-Ткача, М.П. Моисеева, Ю.М. Мокрушина, И.Н. Омельченко, В.В. Павлова, Э.А. Сателя, Г.П. Черкесова, Г.А. Яновского и других.

За рубежом получил распространение метод «Проектирование для изготовления и сборки» (Design for manufacturing and assembly - DFMA), цель которого – упрощение конструкций с целью облегчения их производства и снижения затрат, нашедший отражение в работах Джеффри Бутройда, Питера Дьюхерста, Уинстона Найта и других.

Необходимо отметить, что несмотря на достаточно большое количество научных работ, посвященных этой проблеме, до сих пор не существует методики, позволяющей осуществлять эффективное управление составом предприятий интегрированных производственных структур при комплексной отработке на ТКИ изменяющейся номенклатуры в портфеле заказов в условиях цифрового производства.

Цель работы заключается в разработке инструментов рационального выбора предприятий, участвующих в кооперации, для включения в состав интегрированной производственной структуры для выполнения портфеля заказов предприятиями РКП с учетом выявленных КТО.

Для достижения заданной цели в работе решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих подходов к формированию решений по организации производственных структур при переходе предприятий РКП на выпуск новой номенклатуры изделий.

2. Разработан метод рационального выбора предприятий-изготовителей при проектировании интегрированной производственной структуры для выполнения портфеля заказов предприятий РКП, позволяющий учесть конструкторско-технологические ограничения на основе оценки производственной технологичности изделий.

3. Разработаны семантические информационные модели конструкторско-технологических решений, производственно-технологических возможностей предприятия по изготовлению изделий РКП и классификация конструкторско-технологических ограничений, выявляемых при анализе и оценке изделия на производственную технологичность.

4. Разработано методическое обеспечение для оценки производственно-технологических возможностей предприятия по производству изделий РКП и вариантов модернизации производственно-технологической базы предприятия, а также вариантов интегрированной производственной структуры для изготовления базовых элементов конструкции новых изделий.

5. Разработан алгоритм рационального выбора конструкторско-технологических вариантов изготовления группы деталей и сборочных единиц на основе автоматизированной оценки производственной технологичности.

Объектом исследования являются процессы формирования, развития и трансформации интегрированных производственных структур предприятий ракетно-космической промышленности.

Предметом исследования являются методы формирования интегрированных производственных структур ракетно-космической промышленности с учетом различных ограничений.

Научную новизну работы представляют:

1) Научно обоснованный новый подход к описанию (классификации) и учету влияния конструкторско-технологических ограничений на организацию интегрированных производственных структур для выполнения портфеля заказов предприятий РКП в условиях изменяющейся номенклатуры изделий на основе оценки производственно-технологических возможностей.

2) Метод рационального выбора предприятий при проектировании интегрированной производственной структуры для выполнения портфеля заказов предприятий РКП, позволяющий учесть конструкторско-технологические ограничения на основе оценки производственной технологичности.

Теоретическая значимость заключается в развитии методов формирования интегрированных производственных структур для создания изделий РКП при обеспечении их производственной технологичности.

Практическую ценность представляют:

1) Методическое обеспечение для оценки производственно-технологических возможностей предприятия по производству изделий РКП и вариантов модернизации производственно-технологической базы предприятия, а также вариантов интегрированной производственной структуры для изготовления базовых элементов конструкции новых изделий.

2) Алгоритм определения состава предприятий-изготовителей при создании интегрированных производственных структур РКП на основе автоматизированной оценки производственной технологичности, включающей: автоматизированный расчет выбранных количественных показателей технологичности с использованием конструкторско-технологической параметризации; выбор конструктивно-технологических вариантов (КТВ), наиболее согласованных с условиями производства по результатам двухуровневой оптимизации. Для практической реализации предложенного алгоритма разработано программное обеспечение в части выбора оптимальных по заданным критериям (показателям технологичности) КТВ группы деталей, согласованных с условиями производства.

Предложенные в диссертационном исследовании методы и алгоритмы могут быть адаптированы для решения аналогичных задач в других отраслях, связанных с производством новых видов высокотехнологичной продукции.

Методы исследования. Теоретическую и методологическую базу составили методы системного анализа, структурного анализа, математического программирования, основные положения технологии машиностроения и организации производства. Информационно-эмпирическую основу составили нормативно-правовые акты, аналитические отчеты, работы отечественных и зарубежных авторов,

научные статьи и тезисы докладов автора, выполненные в процессе работы над диссертационным исследованием.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Научно обоснованный подход к описанию (классификации) и учету влияния конструкторско-технологических ограничений на формирование производственных структур для выполнения портфеля заказов предприятий РКП в условиях изменяющейся номенклатуры изделий на основе: разработанных семантических информационных моделей конструкторско-технологических решений и производственно-технологических возможностей предприятия по изготовлению изделий РКП; алгоритма оценки производственной технологичности изделия на различных предприятиях-изготовителях.

2. Метод рационального выбора предприятий при проектировании интегрированной производственной структуры для выполнения портфеля заказов предприятий РКП, позволяющий учесть конструкторско-технологические ограничения на основе оценки производственной технологичности.

3. Методическое обеспечение для оценки производственно-технологических возможностей предприятия по производству изделий РКП и вариантов модернизации производственно-технологической базы предприятия, а также вариантов интегрированной производственной структуры для изготовления базовых элементов конструкции новых изделий

4. Алгоритм определения состава и взаимодействия предприятий интегрированной структуры по производству изделий РКП на основе автоматизированной оценки производственной технологичности.

Обоснованность и достоверность полученных результатов исследований обеспечивается корректными процедурами валидации данных полученных из литературных источников и подтверждается актами внедрения результатов в головной научно-исследовательской организации Госкорпорации «Роскосмос» по технологиям производства – АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева», а также в одной из ведущих организаций ракетно-космической промышленности – АО «РКЦ «Прогресс».

Апробация результатов исследования.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 конференциях: XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства; Королёвские чтения, 2022; Конференция «Технологическое развитие России: ключевые проблемы и решения», 2014; Всероссийская молодежная научная школа "Инженерия знаний. Представление знаний: состояние и перспективы», 2012; VI Международная научно-практическая конференция «Техника и технология: новые перспективы развития», 2012; Всероссийская молодежная конференция «Автоматизация и информационные

технологии (АИТ-2012)»; II Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», 2012; X научно-практическая конференция «Применение ИПИ-технологий в производстве», 2012; IV Международная научно-практическая конференция «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании», 2012; XI Международная научно-практическая конференция «Технические науки от теории к практике», 2012.

Публикации результатов работы

Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 22 публикациях. Из них 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе цитирования Scopus, 8 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России. По результатам исследования получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа выбора оптимальных конструктивно-технологических вариантов машиностроительных деталей по критерию себестоимости производственной программы выпуска».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, основных результатов и выводов, списка литературы (175 наименований) и приложений. Работа содержит 135 страниц машинописного текста, 26 рисунков, 1 таблицу и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, определены направления и объект исследования, сформулированы цели и задачи исследования, а также основные положения, составляющие научную новизну и практическую значимость работы.

В первой главе проведен анализ существующих методов организации интегрированных производственных структур для выполнения портфеля заказов на основе выбора типа специализации производства, а также на основе оценки технологичности изделий новой номенклатуры.

В условиях диверсификации портфеля заказов в ряде случаев предпочтительным вариантом стратегического планирования интегрированных структур является не создание предметно-замкнутых производств полного цикла, а использование специализированных технологических возможностей предприятий. Для такого подхода особую важность приобретает оценка на производственную технологичность, на базе которой предлагается определять состав предприятий для производственной кооперации при изготовлении новых изделий с учетом выявленных КТО. Проблемой при создании интегрированных производственных структур РКП для изготовления новой номенклатуры является отсутствие аналитических зависимостей, полученных по результатам прогнозных исследований конструкторско-технологического состава изделий-аналогов вида:

$$C = \varphi (\cup N_{Ti}, \cup E_{Ti}), \quad (1)$$

$$Tr = \vartheta (UN_{Ti}, UE_{Ti}), \quad (2)$$

где C – стоимость производства изделия; Tr – трудоемкость производства изделия; N_{Ti} – количественный i -й показатель технологичности, E_{Ti} – качественный i -й показатель технологичности. Таким образом, при отсутствии прогнозных значений показателей производственной технологичности изделия-аналога (для рассматриваемых предприятий) расчет относительных значений показателей себестоимости, трудоемкости, производственных циклов, как правило, становится затруднительным, а зачастую невозможным на ранних стадиях технологического обеспечения процесса разработки и технологической подготовки производства. Это значительно затрудняет выбор предприятий-изготовителей и требует разработки новых подходов (методов) к выявлению КТО и оценки их влияния на параметры портфеля заказов (сроки и объем инвестиций в подготовку производства, стоимостные и временные показатели производства). На основании проведенного анализа определены цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены разработанные инструменты (метод и алгоритм) определения состава предприятий интегрированной производственной структуры для выполнения портфеля заказов на основе оценки производственной технологичности, выявления и дальнейшем анализе КТО, ограничивающих достижение требуемого уровня ТКИ новой номенклатуры.

Под КТО понимается требующее разрешения несоответствие между существующими ПТВ предприятия и необходимыми конструкторско-технологическими решениями (КТР) для обеспечения реализации заданных тактико-технических характеристик изделия.

Для формализации КТО проведена их классификация, в рамках которой выделены 4 группы:

1. Наличие КТР, для реализации которых отсутствуют технологические методы.
2. Наличие КТР, для реализации которых разработаны требуемые технологические методы, но имеющееся технологическое оборудование не соответствует необходимым техническим требованиям.
3. Наличие КТР, для реализации которых имеются требуемые технологические методы и технологическое оборудование, но себестоимость изготовления превышает заданные значения.
4. Наличие КТР, для реализации которых имеются требуемые технологические методы и технологическое оборудование, но недостаточно ресурсов для выполнения производственной программы.

Выявленные группы 1 и 2 определяют технологическую возможность изготовления изделия на рассматриваемом предприятии-изготовителе. Группы 3 и 4 КТО базируются на организационно-технологических возможностях изготовления изделия как собственными ресурсами, так и с привлечением внешних, на основе

выбора рациональных КТВ, которые определяются показателями технологичности и согласованы с условиями производства. Структуры данных разработанных семантических моделей ПТВ предприятия и КТР изготовления изделия полностью согласованы друг с другом. Это позволяет формализовать процедуры выявления КТО и обеспечить высокую степень автоматизации алгоритма оценки производственной технологичности.

Предложенный алгоритм (рисунок 1) позволяет на ранних этапах проектирования на основании анализа КТО и возможных вариантов их разрешения принимать решения о совместном управлении конфигурацией изделия и производственной системы предприятия для выбора предприятий-изготовителей в составе интегрированных производственных структур. В работе рассмотрен частный случай реализации предложенного метода, когда у рассматриваемых изделий есть аналог (на примере изделие «ракета-носитель»).

В результате исследования разработано методическое обеспечение оценки ПТВ предприятия по производству новых изделий и вариантов изготовления базовых элементов конструкции, которое позволяет получить комплексную оценку технологической реализуемости программ создания перспективных изделий РКП, выполнить объективное сравнение результатов оценки с учетом дестабилизирующих факторов для поиска рационального варианта технологического обеспечения отраслевых программ производства, а также выстроить эффективную систему внутриотраслевой кооперации.

В третьей главе разработаны инструменты (метод и алгоритм), включающие взаимоувязанные процедуры выбора рациональных КТВ на основе оценки ТКИ (рисунок 2). Для повышения уровня автоматизации расчетов показателей технологичности была использована схема конструкторско-технологической параметризации, которая является важной составляющей системы управления данными об изделии (Product Data Management – PDM).

Сущность этой схемы заключается в том, что в пределах заданной структуры КТВ при изменении конструкторских параметров изготавливаемой детали автоматически меняются технологические параметры (в технологических процессах и управляющих программах станков с числовым программным управлением). Такой подход был апробирован на деталях типа «стакан» в рамках разработанного автором модуля расчета трудоемкости обработки на базе платформы T-FLEX (рисунок 3).

Также с участием автора было создано приложение «Система автоматизации подготовки управляющих программ для фрезерования на станке СВО 25 ячеек «вафельного фона» на базе Creo Parametric. Разработанная система осуществляет автоматизированную подготовку программы обработки по входным данным конструкции детали, представленным в табличном виде (рисунок 4). По заданным пользователем переменным и указанным поверхностям в автоматическом режиме строится управляющая программа, на основании которой рассчитывается время

обработки обечайки на специализированном станке СВО-25. Полученные значения трудоемкости попадают в модуль «Технологическая себестоимость» (разработанный на базе системы автоматизированного проектирования технологических процессов «СИТЕП МО» и интегрируемый с системой T-FLEX), где с использованием переменных производственной системы производится расчет технологической себестоимости. Можно сказать, что в рамках концепции PDM речь идет об установлении функциональной связи f между технологическими параметрами pt и конструкторскими параметрами pk вида $pt = f(pk)$ в некоторой области определения параметров pk , которые не влияют на изменение структуры технологического процесса.

Использование количественных показателей технологичности в качестве критериев оптимальности связано с большими сложностями в силу того, что указанные показатели находятся между собой в сложной системе отношений согласования и противоречия. Выбор КТВ изготовления деталей является сложной многокритериальной задачей на стадии технологической подготовки производства. Каждый из них включает множество технологических и конструкторских решений изготовления детали. К технологическим решениям относятся: метод получения заготовки, выбор технологических баз, планы и последовательность обработки поверхностей, выбор оборудования и технологического оснащения, выбор режимов резания, определение межпереходных припусков и др. К конструкторским решениям относятся: добавление технологических элементов в конструкцию детали или в заготовку, изменение размеров и допусков на чертеже по результатам технологического размерного анализа и др.

Сущность проблемы заключается в том, что уровень технологичности конструкции детали невозможно оценить каким-либо показателем технологичности в силу их противоречивости. К примеру, отношение противоречия между временными и стоимостными критериями оптимальности характеризуется тем, что при варьировании параметрами КТВ "улучшение" временных показателей одновременно может сопровождаться "ухудшением" стоимостных. Аналогично в отношении противоречия находятся количественные показатели технологичности: технологическая себестоимость $C_{\text{тех}}$, трудоемкость T , металлоемкость M (или коэффициент использования металла КИМ). Поэтому уровень технологичности как комплексный показатель может определяться на основе многокритериальной оптимизации КТВ детали, где в качестве частных критериев оптимизации используются количественные показатели технологичности.

Алгоритм оптимизации содержит два этапа:

1. Моделирование множества КТВ и построение множества Парето.
2. Выбор оптимального варианта из множества Парето, который наилучшим образом согласован с задачей оптимизации верхнего уровня иерархии.

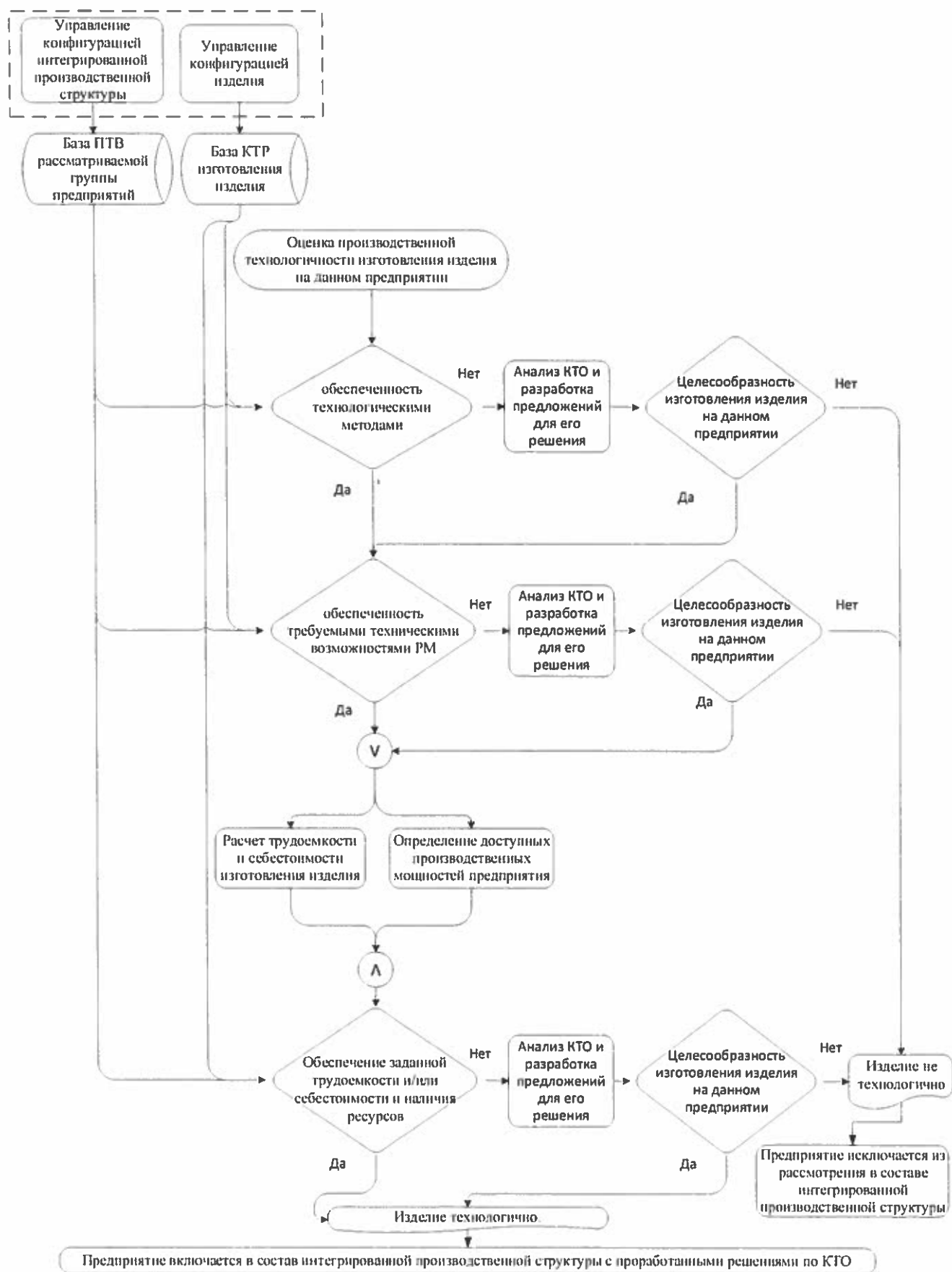


Рисунок 1 – Алгоритм оценки производственной ТКИ на различных предприятиях-изготовителях



Рисунок 2 – Алгоритм оценки производственной ТКИ и выбора рациональных КТВ

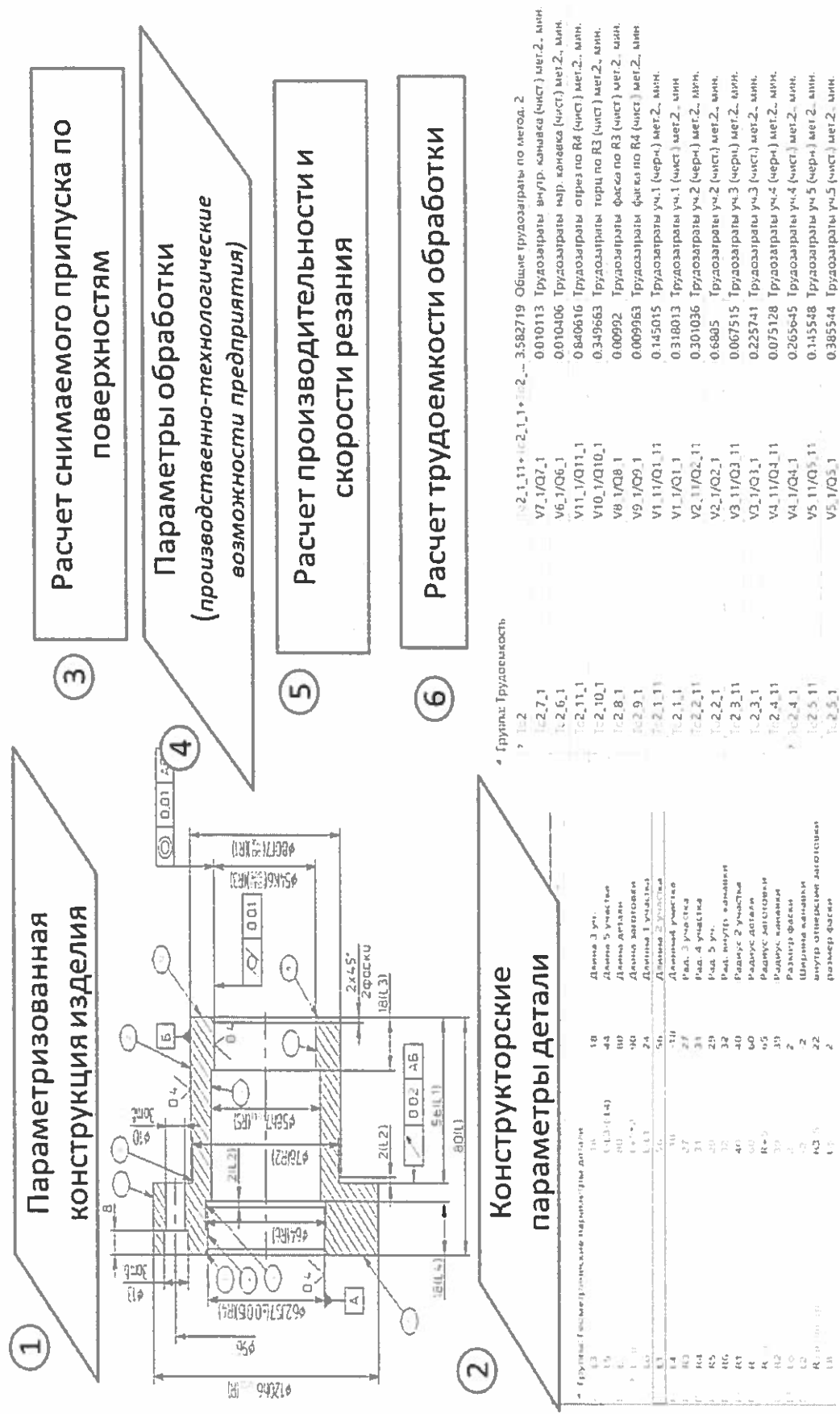


Рисунок 3 – Этапы расчета трудоемкости обработки деталей типа «станкан» с использованием конструкторско-технологической параметризации

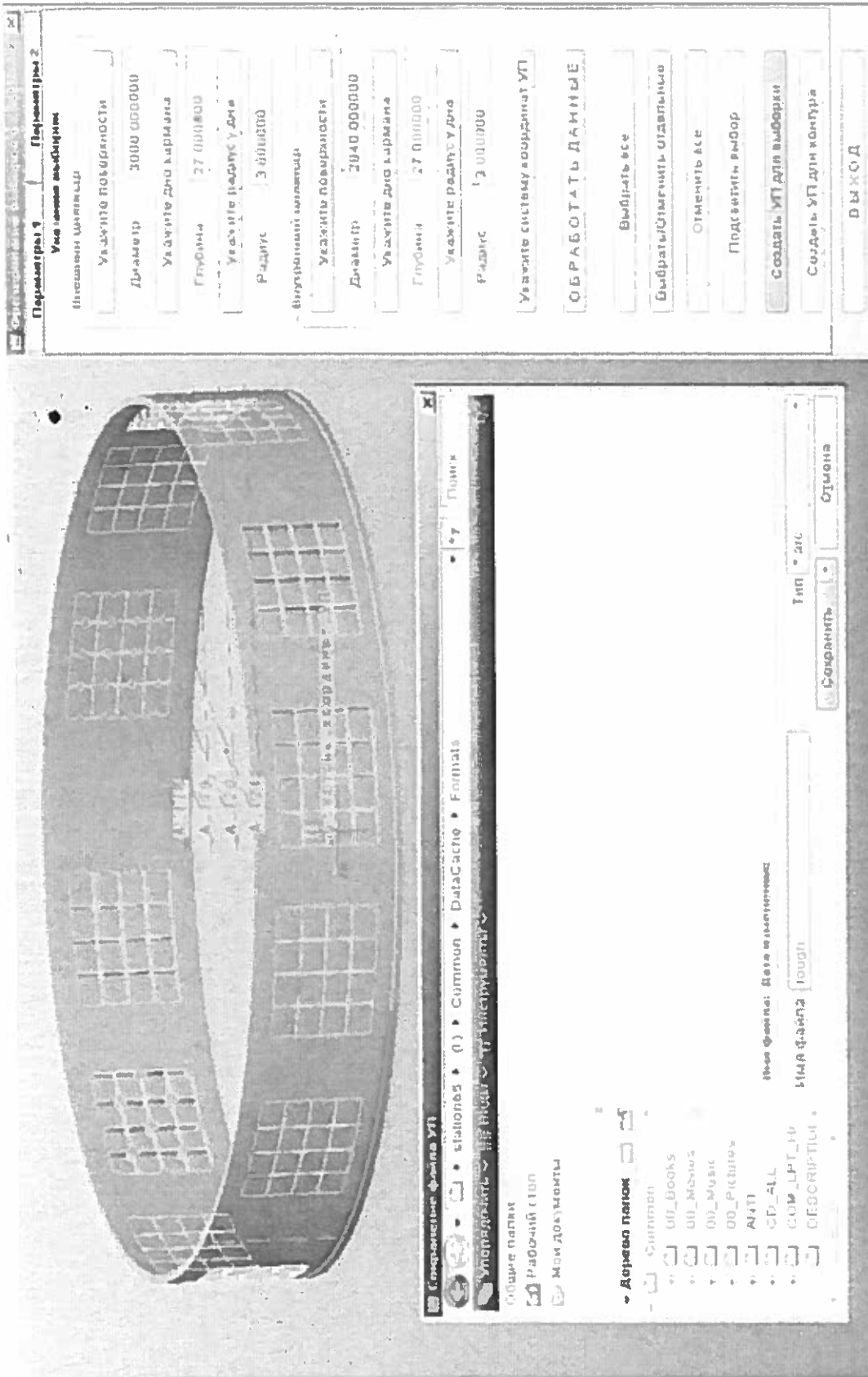


Рисунок 4 – Интерфейс приложения для расчета трудоемкости обработки с использованием конструкторско-технологической параметризации

Если каждый вариант ω_i множества КТВ измеряется набором количественных показателей $W_k(\omega_i)$, $k=1 \dots m$, то множеством Парето $M_{\text{пар}}$ по минимизации будем называть:

$$M_{\text{пар}} = \{\omega_i : \forall j \neq i \exists k : W_k(\omega_i) < W_k(\omega_j)\}, \quad (3)$$

где ω_j – множество КТВ, не принадлежащих множеству Парето.

Для выбора критериев оптимизации необходимо рассматривать двухуровневую систему «проектирование КТВ – управление производством», которая характеризуется совокупностью задач:

- проектирование КТВ изготовления деталей d_i производственной программы выпуска (локальные задачи первого уровня);
- управление производством на участке (задача верхнего уровня).

Если КТВ изготовления детали производственной программы участка оценивается двумя противоречивыми критериями «время – затраты», то весовые коэффициенты значимости не могут быть одинаковыми для всех деталей. На своевременное поступление этих деталей на участок (цех) сборки влияние оказывает цикл (трудоемкость), и это влияние для различных деталей различно. Таким образом, для одних деталей производственной программы необходимо использовать критерии временного типа (цикл, трудоемкость), а для других деталей – критерии стоимостного типа (технологическая себестоимость).

Для каждой детали d_i , $i=1, \dots, n$ производственной программы участка разработано множество КТВ и рассчитаны значения технологической себестоимости C_i и трудоемкости T_i . Результаты расчетов представлены в виде множества точек в координатной плоскости C_i и T_i (рисунок 5).

Требуется найти множество вариантов j изготовления детали d_i , для которых для любого T_i :

$$C_i = \min C_{is} \{s: t_{is} \leq T_i\}. \quad (4)$$

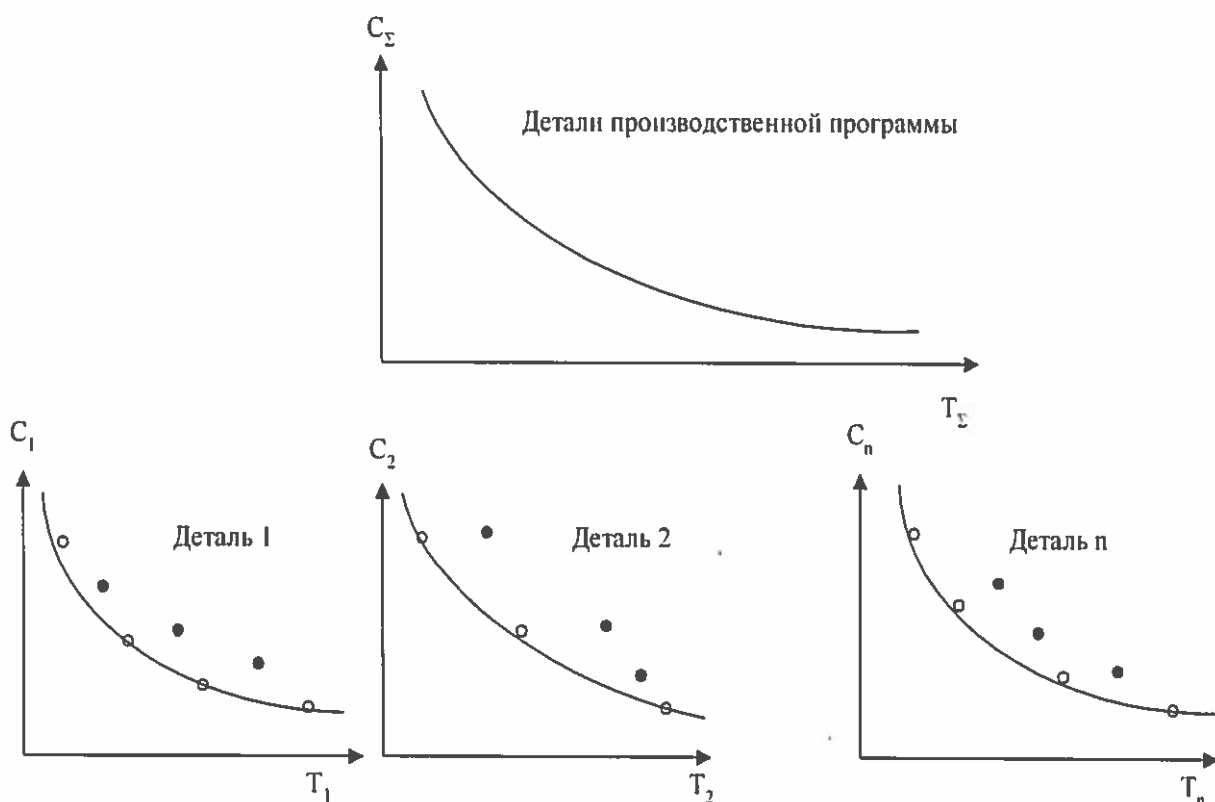
В формуле (4) индексы i и s обозначают соответственно номер детали и номер КТВ, а C_{is} и t_{is} – технологическую себестоимость и трудоемкость варианта.

Множество $\Pi_i = \{j\}$, обладающее свойством (4), является множеством Парето. Множество Π_i содержит КТВ, которые не могут быть улучшены одновременно по двум критериям C и T . Множество Π_i определяет зависимость $C_i = C_i(T_i)$, которая проходит через точки множества Π_i .

В качестве задачи верхнего уровня иерархии может использоваться задача минимизации производственного цикла сборочной единицы, куда входит рассматриваемая деталь. Решение задачи второго этапа оптимизации для одной рассматриваемой детали принципиально невозможно.

Для заданного срока выпуска деталей T^* необходимо найти вектор $t = [T_1, T_2, \dots, T_n]$ продолжительностей изготовления деталей d_i так, чтобы выполнить производственную программу с минимальными затратами:

$$C_{\Sigma} = \sum C_i(T_i) = \min \sum C_i(T_i). \quad (5)$$



- варианты не конкурентные
- варианты множества Парето

Рисунок 5 – Двухуровневая схема оптимизации «проектирование КТВ – управление производством»

Сущность двухуровневой оптимизации заключается в том, что на первом уровне путем решения задачи (4) формируется исходная информация для задачи верхнего уровня (5). После решения задачи (5) определяются значения критериев C_i , T_i для каждой детали d_i , которым соответствует оптимальный вариант технологического процесса и уровень производственной технологичности КТВ.

Для автоматизации процесса определения по заданным критериям набора КТВ группы деталей, согласованного с условиями производства, разработано специальное программное обеспечение.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Анализ существующих подходов к формированию решений по организации производственных структур при переходе предприятий РКП на выпуск новой номенклатуры изделий показал целесообразность использования специализированных технологических возможностей предприятий. Существующие методы не учитывают в достаточной мере наличие конструкторско-технологических ограничений при формировании интегрированных производственных структур, а также не используют возможности цифрового производства. В результате анализа сделан вывод об

актуальности разработки инструментов рационального выбора предприятий, участвующих в кооперации, при проектировании интегрированных производственных структур для выполнения портфеля заказов в условиях изменяющейся номенклатуры изделий РКП с учетом выявленных конструкторско-технологических ограничений.

2. Разработан метод рационального выбора предприятий-изготовителей при проектировании интегрированной производственной структуры для выполнения портфеля заказов предприятий РКП, позволяющий учесть КТО на основе оценки производственной технологичности изделий. Данный метод позволяет на ранних этапах на основании анализа КТО и возможных вариантов их решения принимать комплексные управленческие решения о совместном управлении конфигурацией изделия и производственной системы предприятия в процессе выбора предприятий-изготовителей для создания интегрированных производственных структур.

3. Разработаны семантические информационные модели конструкторско-технологических решений и производственно-технологических возможностей предприятия по изготовлению изделий РКП, которые включают блоки данных, предназначенных для машинной обработки и обработки человеком. Модели позволяют формализовать состав данных для использования их в разработанном методе, а также в отраслевой системе планирования ресурсов предприятия (enterprise resource planning – ERP).

4. Разработана классификация КТО, выявляемых при анализе и оценке изделия на производственную технологичность, позволяющая повысить эффективность выбора предприятий-изготовителей за счет типизации процедур анализа и выбора организационно-технологических решений по выполнению портфеля заказов.

5. Разработано методическое обеспечение для оценки производственно-технологических возможностей предприятия по производству изделий РКП и вариантов модернизации производственно-технологической базы предприятия, а также вариантов интегрированной производственной структуры для изготовления базовых элементов конструкции новых изделий. Разработанное методическое обеспечение позволяет принимать обоснованные решения по выбору предприятий-изготовителей на ранних стадиях жизненного цикла изделия, повысить эффективность использования инвестиционных средств на реализацию перспективных проектов, а также обеспечить оптимальную загрузку предприятий, входящих в интегрируемую производственную структуру.

6. Разработан алгоритм рационального выбора конструкторско-технологических вариантов изготовления группы деталей и сборочных единиц на основе автоматизированной оценки производственной технологичности. Данный алгоритм содержит комплекс взаимоувязанных процедур. Следующие процедуры реализованы в виде программного обеспечения (модули на базе систем автоматизированного проектирования или в виде отдельных приложений):

6.1 Программные модули автоматизированного расчета показателей технологичности на базе конструкторско-технологической параметризации: трудоемкости обработки на примере деталей типа «стакан»; трудоемкости обработки на примере обечайки «вафельного фона» с построением цифровой модели и управляющей программы на базе конструкторских и технологических переменных; технологической себестоимости.

6.2 Программное обеспечение выбора оптимальных по заданным критериям (показателям технологичности) КТВ группы деталей, согласованных с условиями производства.

7. Результаты диссертационной работы могут быть использованы: при совершенствовании отраслевой системы технологической подготовки производства и технологического обеспечения создания изделий РКП (в том числе в разработке отраслевых стандартов цифровой технологической подготовки производства); при совершенствовании системы управления портфелем заказов Госкорпорации «Роскосмос»; для обеспечения технологичности и создания интегрированной производственной структуры по автоматизированному серийному производству космических аппаратов; в создании и внедрении базы знаний КТР РКП для поддержки технологически ориентированного проектирования и технологического обеспечения изделий РКП.

8. Предложенные в диссертационном исследовании методы и алгоритмы могут быть адаптированы для решения аналогичных задач в других отраслях, связанных с производством новых видов высокотехнологичной продукции.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.5.22

1. Рахмилевич Е.Г. Производственная кооперация на основе конструктивно-технологических вариантов продукции // Инновации в менеджменте. 2023. № 1(35). С. 50-57. (0,5 п.л.)

2. Разработка метода оценки надежности многоканальных систем по параметрам производительности / Е.Г. Рахмилевич, Е.С. Постникова [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №4. С. 405-411. (0,65 п.л./0,2 п.л.)

3. Рахмилевич Е.Г. Многокритериальная оптимизация конструктивно-технологических вариантов детали на основе количественных показателей технологичности // Технология машиностроения. 2014. № 1. С. 59-62. (0,3 п.л.)

4. Рахмилевич Е.Г. Автоматизация расчетов количественных показателей технологичности с использованием конструкторско-технологической параметризации // Технология машиностроения. 2013. № 1. С. 53-56. (0,4 п.л.)

Научные статьи других журналах, рекомендованных ВАК

5. Рахмилевич Е.Г., Григорьев С.Н., Долгов В.А. Метод оценки производственной технологичности изделий на основе применения семантических моделей в условиях цифрового производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 12. С. 16-25. (0,6 п.л./0,3 п.л.)

6. Рахмилевич Е.Г., Захаров В.А. Определение производственно-технологических возможностей предприятия по производству новых изделий и оценка вариантов изготовления базовых элементов конструкции // Инновации в менеджменте. 2020. № 2(24). С. 54-61. (0,5 п.л./0,4 п.л.)

7. Отработка изделий на производственную технологичность при диверсификации машиностроительных предприятий ОПК в условиях развития цифрового производства / Рахмилевич Е.Г. [и др.] // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. № 4(47). С. 8-12. (0,45 п.л./0,25 п.л.)

8. Рахмилевич Е.Г., Кузьмин В.В. Автоматизация оценки производственной технологичности деталей машиностроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. № 3(22). С. 37-41. (0,4 п.л./0,3 п.л.)

Публикации по теме в других изданиях - всего 14, из них основные:

9. Рахмилевич Е.Г. Оценка эффективности технологических вариантов изготовления деталей при техническом перевооружении машиностроительного предприятия // Научные труды II Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». Москва. 2012. С. 369-372. (0,3 п.л.)

10. Рахмилевич Е.Г. Технологический аудит предприятий ракетно-космической промышленности // Материалы VII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. (0,3 п.л.)

11. Rakhmilevich E.G., Grigoriev S.N. and Dolgov V.A. and Evaluation of Production Processability of Products Based on Application of Semantic Models of Production and Technological Capabilities. In: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Far East Con), Vladivostok, 2020, pp. 1-6 (0,5 п.л./0,3 п.л.)

12. Рахмилевич Е.Г. Программа выбора оптимальных конструктивно-технологических вариантов машиностроительных деталей по критерию себестоимости производственной программы выпуска // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614764 Российская Федерация. № 2014611976. заявл. 11.03.2014. опубл. 20.06.2014.

13. Автоматизированная система «Оценка технического уровня предприятия по видам производства» / Е.Г. Рахмилевич [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611996 Российская Федерация. № 2014663826. заявл. 26.12.2014. опубл. 20.03.2015.