

На правах рукописи

ЮРЦЕВ ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ
ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность 05.02.22 – Организация производства (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва –2022

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное объединение «Техномаш» (с 30 декабря 2021 года преобразовано в Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Техномаш» имени С.А. Афанасьева») Госкорпорации «Роскосмос» .

Научный руководитель:

Рагуткин Александр Викторович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА»

Официальные оппоненты:

Азаров Владимир Николаевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Менеджмент качества», ФГАОУ высшего образования «Российский университет транспорта»

Одинокоев Сергей Анатольевич
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Управление качеством и сертификации» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук

Защита диссертации состоится « 16 » июня 2022 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.23 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.141.23 по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1

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

Телефон для справок 8 (499) 267-09-01

Автореферат разослан «___»_____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета к.т.н., доцент



Е.С. Постникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Техническое перевооружение предприятий ракетно-космической промышленности (РКП) является стратегической государственной задачей, требующей проведения комплекса взаимосвязанных мероприятий не только по оснащению современным оборудованием, но, в первую очередь, в части организации производства – по созданию эффективной системы подготовки производства, управления показателями качества изделий ракетно-космической техники (РКТ), достижения плановых показателей производственной системы (ПС) предприятий РКП при минимальных затратах ресурсов.

В условиях ужесточения мировой конкуренции стал критическим фактор цифровизации как инструмент повышения эффективности организации производства предприятий РКП, позволяющий существенно сократить сроки подготовки производства изделий РКТ, обеспечить координацию взаимодействия конструкторов и технологов, упорядочить, унифицировать и формализовать основные процедуры управления.

В 2019 году утверждена «Стратегия цифровой трансформации Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 года и перспективу до 2030 года» (далее – Стратегии ГК «Роскосмос»). Представленные результаты исследований выполнены автором в рамках комплекса работ по реализации Стратегии ГК «Роскосмос», включающего последовательно выполняемые мероприятия:

- технологического аудита (ТА) с оценкой технического и цифрового уровня предприятий РКП для выявления структурных проблем и обоснованию задач организации цифрового производства;
- создания эффективных технологических систем (ТС) и элементов систем организации цифрового производства на уровне ERP и MES-систем.

Актуальность темы исследований подтверждена в документах, регламентирующих деятельность предприятий ГК «Роскосмос».

Объектом исследования являются модели и методы организации цифрового производства изделий РКТ, определенные в обеспечение реализации Стратегии ГК «Роскосмос».

Предметом исследования являются алгоритмы процессов организации деятельности предприятий РКП по созданию и использованию цифровых технологий в производстве изделий РКТ.

Целью работы является создание научно обоснованных методов и решений по цифровизации процессов организации производства изделий РКТ в обеспечение мероприятий Стратегии ГК «Роскосмос».

Для достижения поставленной в работе цели решена следующая совокупность взаимосвязанных комплексов **задач**:

- Анализ методов решения целевых задач формирования решений по организации цифрового производства в РКП, поставленных на основе данных технологического аудита предприятий;
- Разработка цифровых моделей надежности выполнения заданий ПС с начальных стадий жизненного цикла (ЖЦ) изделий РКТ;
- Разработка методов контроля состояния технологических систем на основе предиктивных технологий управления ЖЦ оборудования;
- Алгоритмизация и внедрение результатов исследований по проекту АО «НПО «Техномаш» на тему: «Разработка информационно-программных средств автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового производства».

Методы исследования основаны на корректном применении законов математической логики, методов и методик исследований системного анализа и параметрической надежности, применении методов кластерного анализа, математической лингвистики и математического моделирования.

Научная новизна работы состоит в научном обосновании решений по созданию элементов цифрового облика производственных систем предприятий ГК «Роскосмос», включающем:

1. Установление взаимосвязи процессов технологического аудита и способов его реализации, осуществляемых посредством:
 - масштабных проектов модернизации производственных систем отрасли;
 - локальных решений по оценке работоспособности оборудования на основе применения методов его проактивного обслуживания.
2. Метод решения слабоструктурированной задачи управления надежностью элементов изделий РКТ на основе структурной декомпозиции технологических систем, обеспечивающий представление решения в виде проектов работ по модернизации производств.
3. Унифицированный механизм контроля и регулирования параметров оборудования на основе предиктивных технологий, обеспечивающий снижения затрат на его обслуживание.
4. Разработанные решения по поддержке проектно-производственных процессов управления созданием и модернизацией изделий РКТ:
 - механизм включения проектов модернизации (включая цифровизацию) ПС в общий план (поток) работ предприятия, обеспечивающий планирование работ на едином объеме трудовых и материальных ресурсов предприятия;
 - алгоритмы, унифицирующие процессы диспетчеризации при использовании универсального и автоматизированного оборудования в системе управления производством.

Практическая значимость работы состоит в разработке методических материалов по управлению показателями надежности ТС и формированию рациональных планов мероприятий опережающего обеспечения организации цифрового производства на всех стадиях ЖЦ изделий РКТ. При непосредственном участии автора разработан комплекс средств управления производством, состоящий из подсистем: диспетчеризации производства и выдачи производственных заданий; мониторинга работы автоматизированного технологического оборудования цифрового машиностроительного производства; модулей сопряжения с системами управления предприятием (ERP) и жизненным циклом изделия (PLM); программно-аппаратных средств АРМ оператора, диспетчера, руководителя и администратора. Экспериментальный образец данного комплекса реализован и функционирует на АО «НПО «Техномаш».

Достоверность результатов, полученных автором в процессе исследований, обеспечивается использованием современного лицензионного программного обеспечения, корректными процедурами валидации данных, полученных из литературных источников и в натуральных экспериментах.

Личный вклад. Получение основных научных результатов, постановка задач, определение методов их решения, изложение выводов и рекомендаций, указанных в диссертации, принадлежит автору. Во всех случаях использования заимствованных результатов, полученных другими авторами, в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Положения, выносимые на защиту: научное обоснование, методическое сопровождение, модели и результаты их апробации в рамках технологического аудита предприятий РКП по:

- методике оценки технического и цифрового уровня предприятий.
- структурной декомпозиции ТС с учетом условий слабоструктурированной задачи управления надежностью создаваемых элементов изделий, контроля и регулирования ТС в условиях множественности критериев и ограничений.
- алгоритмам формирования рациональных планов мероприятий опережающего технологического обеспечения организации производства образцов элементов изделий РКТ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 5-й Международной научно-технической конференции «Качество в производственных и социально-экономических системах», Курск, 2017 г., 7-ой Международной научно-практической конференции «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях» Курск, 2017г., Восемнадцатой Международной научно-практической конференции "Управление качеством" ФГБОУ ВО НИУ МАИ (ТУ), Москва, 2019 г., XII мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2019) Геленджик, 2019 г.

Публикации. Основное содержание работы изложено в монографии, 32 научных публикациях, в т.ч. 10 - в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК. По результатам работ получено 3 свидетельства о регистрации результатов интеллектуальной деятельности.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 112 наименований; изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, отмечена практическая ценность работы, обоснована достоверность полученных данных, представлена информация о структуре, объеме диссертационного исследования и апробации работы.

В главе 1 представлен анализ задач, поставленных в «Стратегии ГК «Роскосмос», обоснована необходимость разработки общепромышленного системного подхода к формированию цифрового облика ПС с ранних стадий ЖЦ изделий РКТ на базе методологии проектно-операционного управления (ПОУ). Анализ выполнен по работам Капустина Н.М., Колобова А.А., Омельченко И.Н., Орлова А.И., Павлова В.В., Фалько С.Г., Ставровского М.Е., Цыркова А.В., Утенкова В.М., Ключко В.Н., Лопоты А.В., Савинова Ю.И., Пантелеева К.Д.

На сегодня цифровизация производства в РКП сдерживается следующими факторами: разнородность оборудования по техническому уровню, слабая методическая обеспеченность и координация мероприятий по цифровизации ПС.

Проведение технологического аудита предприятий с оценкой технического и цифрового уровня позволяет определить наиболее подготовленные к внедрению решения «Индустрии 4.0» предприятий РКП, выявить структуру проблем и обосновать цели и задачи организации цифрового производства для принятия управленческих решений.

Задача повышения эффективности мероприятий по внедрению технологий «цифрового производства» в обеспечение Стратегии ГК «Роскосмос» диктует необходимость разработки общепромышленного системного подхода к формированию и сопровождению цифрового облика производственных систем с начальных стадий создания изделий РКТ.

Анализ отраслевого, отечественного и мирового опыта по внедрению новых элементов «Индустрии 4.0» показал, что для реализации единого отраслевого подхода по цифровизации процессов организации производства в РКП наиболее перспективным представляется комплекс решений на основе методологии проектно-операционного управления (ПОУ) (Рис. 1).

В основе алгоритмов ПОУ по управлению и балансировке ресурсов предприятия лежит единый подход синхронного планирования и оптимизации (СПО),

обобщающий методы APS (Advanced Planning and Scheduling). Рассматриваемая система реализует методические решения по управлению ЖЦ изделий РКТ, обеспечивая взаимодействие PLM и ERP комплексов.

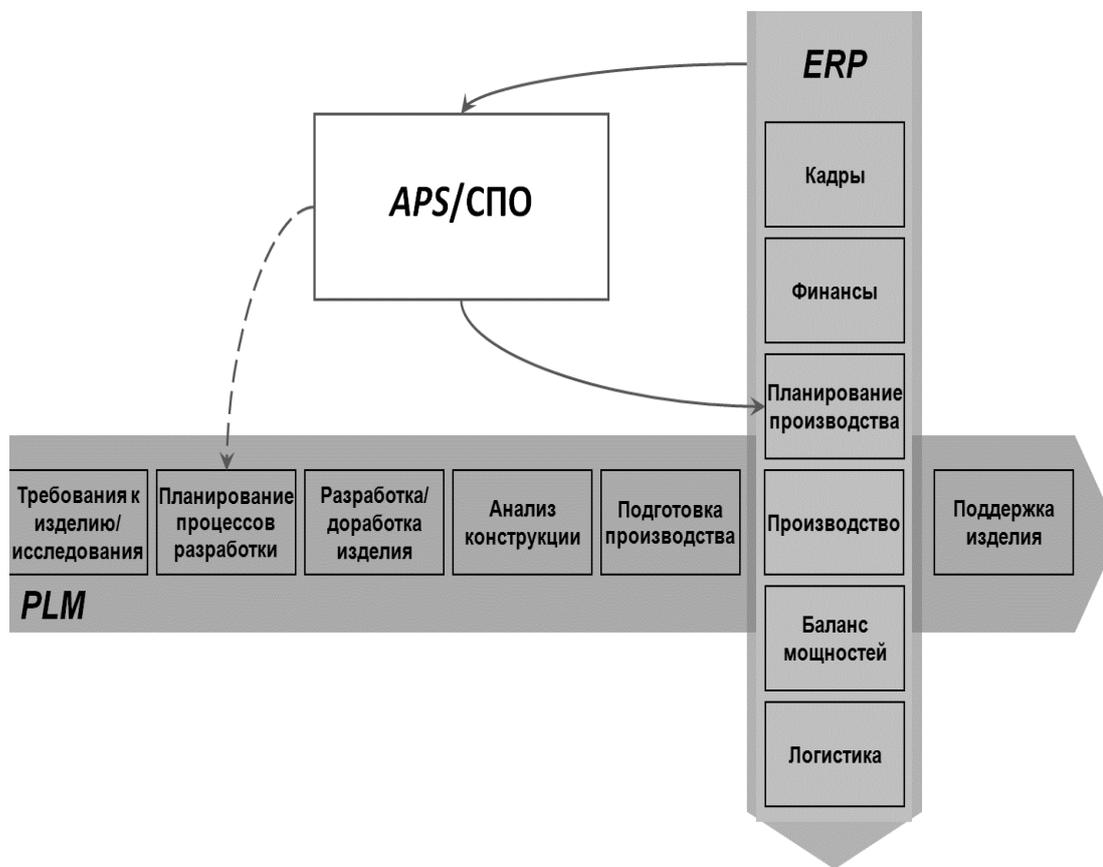


Рис. 1. Концептуальная схема методологии ПОУ

В работе обоснована необходимость создания в рамках перспективной системы управления предприятием отрасли, построенной на основе методологии ПОУ:

- методического обеспечения модели оценки уровня цифровизации как составляющей комплекса показателей технического уровня (ТУ) производственных систем предприятий РКТ;
- методического обеспечения и аппарата структурной декомпозиции ТС в условиях слабоструктурированной задачи управления надежностью создания элементов изделий РКТ на начальных стадиях их жизненного цикла.

Глава 2 посвящена разработке методических аспектов цифровизации ПС предприятий РКТ. В рамках методологии ПОУ разработаны модели оценки уровня цифровизации как составляющей комплекса показателей ТУ ПС, структурной декомпозиции с учетом условий слабоструктурированной задачи управления надежностью ТС изготовления изделий РКТ.

Структуризация задач создания цифровых ПС требует систематизации динамических факторов принятия решений посредством ТА предприятий РКТ.

Автором разработаны методические положения по определению числового значения ТУ ПС, под которым понимается суммарный показатель, численно

характеризующий степень совершенства техники, технологии, оборудования, в т.ч. и уровень цифровизации процессов предприятия, достигнутый или планируемый на определенный момент времени. Структурно-логическая модель процесса ТА уровня цифровизации предприятия представлена на Рис. 2.

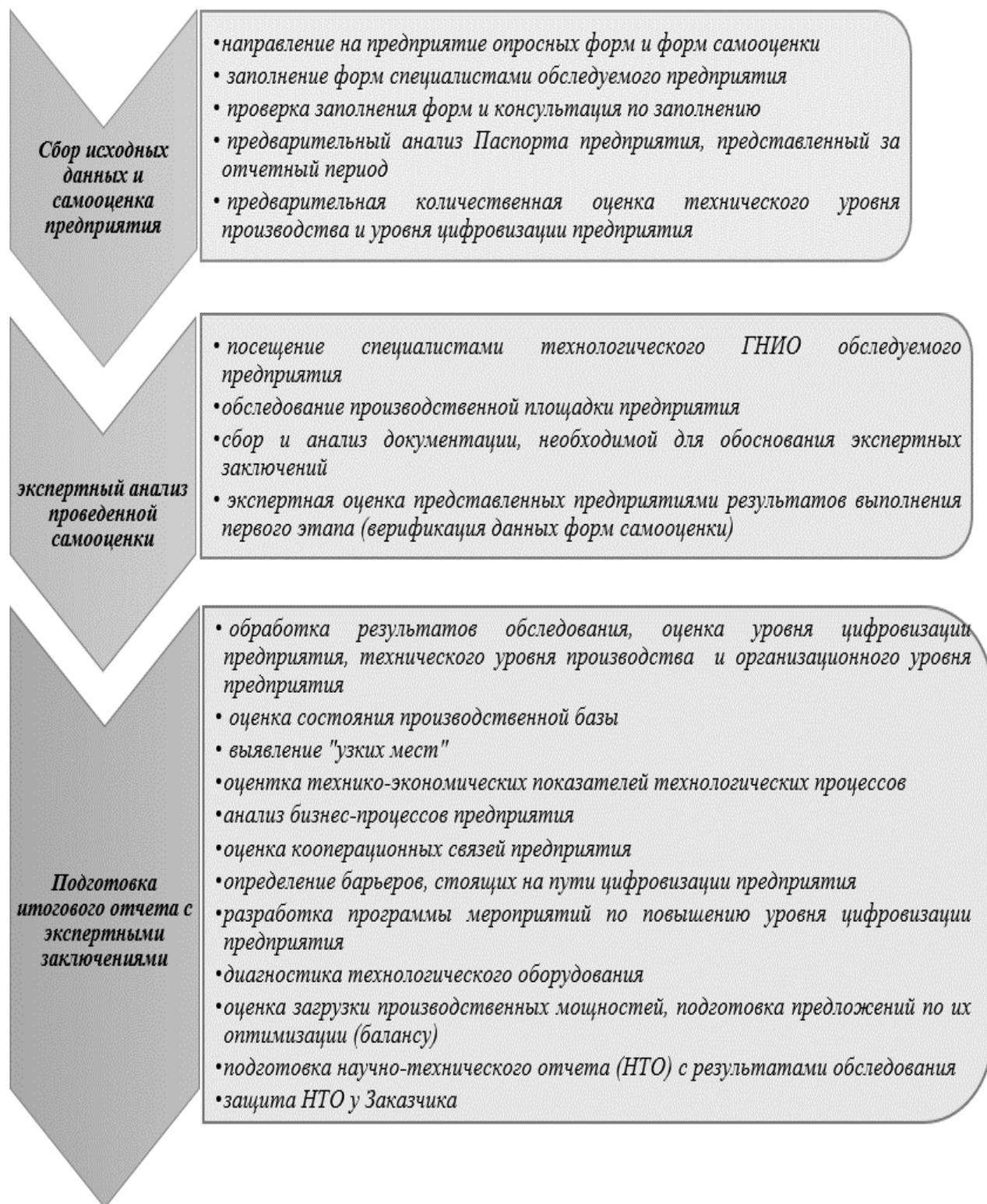


Рис. 2. Этапы технологического аудита уровня цифровизации предприятия

С учетом зарубежных практик сформирован облик «идеального» предприятия, принятый в качестве ориентира для сравнения и оценки ТУ ПС РКП. ТУ

рассчитывается на основе показателей основных (нормируемых) видов работ. Каждый вид работ описывается одним или несколькими определителями ТУ.

По системе определителей с учетом уровня цифровизации производится числовая оценка ТУ видов работ, а затем и всего производства. Переход предприятия на более высокий ТУ цифровизации определяется нормативом, вычисленным из расчета внедрения в производство решений «Индустрии 4.0», опыта отечественных и зарубежных предприятий, с учетом объема производства и степени его специализации.

По результатам ТА сформирован комплекс проектных задач цифровизации процессов организации производства изделий РКТ предприятий РКП.

С учетом слабой структуризации процессов организации производства в условиях перехода от опытного к серийному производству изделий РКТ модель комплекса задач представлена в виде нечеткой двухуровневой системы:

$$\tilde{Z} = (\tilde{Z}, \tilde{P}),$$

где $\tilde{Z} = \{\tilde{Z}_{ij}\}$ - нечеткое множество задач цифровизации процессов организации производства;

$\tilde{P} = \{\tilde{P}_{ij}\}$ - нечеткое множество отношений иерархической соподчиненности задач.

$i = (1; 2)$ – номер уровня задачи;

j – номер задачи в рамках уровня.

На первом уровне решаются задачи формирования планов реконструкции, технического перевооружения и модернизации ИТ – инфраструктуры для повышения эффективности ПС цехов предприятий РКП.

На втором уровне решаются задачи контроля и регулирования текущего состояния ТС (оборудования) участков и рабочих мест в рамках сформированных ПС цехов предприятий РКП.

Типовая модель задачи первого уровня имеет вид:

$$\tilde{Z}_{1j} = (\tilde{M}(\tilde{S}_{1j}), \tilde{Q}_{1j}, \tilde{U}_{1j}), \text{ где}$$

$\tilde{M}(\tilde{S}_{1j}) = (\tilde{S}_{1j}, W_{1j})$ - модель исходной ситуации формирования плана технического перевооружения и модернизации ИТ – инфраструктуры ПС j - го цеха;

$\tilde{S}_{1j} = (\tilde{K}_{1j}, \tilde{T}_{1j}, \tilde{P}\tilde{C}_{1j})$ – модель структуры конструкторско-технологического состава изделий РКТ и ПС j - го цеха;

W_{1j} – номенклатура показателей вариантов K_{1j} , T_{1j} , $ПC_{1j}$;

$\tilde{Q}_{1j} = \{C_{\Sigma}, W_{\Sigma}, t_{\text{пр}}, \varphi\}_{1j}$ – модель цели реорганизации ПС j - го цеха, где:

$C_{\Sigma 1j}$ - среднее значение (математического ожидание) оценки стоимости реорганизации ПС j - го цеха;

$W_{\Sigma 1j}$ – номенклатура целевых показателей реорганизации ПС j - го цеха;

$\varphi : W_{\Sigma 1j} \rightarrow \max$ – целевая функция управления реорганизации ПС j - го цеха;

$C_{\Sigma 1j} \leq C_{\text{прзад}}$, $t_{\text{пр}} \leq t_{\text{прзад}}$ – целевые требования к показателям затрат и времени (его предельное значение) реорганизации ПС j -го цеха.

Необходимо отметить, что основной вклад в повышение эффективности ПС предприятий РКП вносят мероприятия обеспечения надежности ТС серийного производства. Поэтому в подавляющем большинстве случаев решение задачи первого уровня сводится к обеспечению требуемого уровня надежности ТС серийного производства РКТ.

С учетом изложенного, в работе для первого уровня представлено решение задачи управления надежностью ТС производства изделий РКТ путем формирования планов реконструкции, технического перевооружения и модернизации ИТ – инфраструктуры ПС цехов предприятий РКП.

С позиций системного подхода типовая модель структурной декомпозиции в условиях слабой структуризации факторов управления надежностью ТС на при переходе к серийному производству изделий РКТ представляется нечеткой системой вида:

$$\tilde{F}_i = \tilde{F}(\tilde{S}_i, \tilde{Q}_i, \tilde{U}_i), \text{ где:}$$

\tilde{S}_i – модель структуры конструкторско-технологического состава изделий РКТ и ПС, формирующего множество возмущающих факторов влияния на показатели качества ТС:

$$\tilde{S}_i = (\tilde{K}_i, \tilde{T}_i, \tilde{ПC}_i), \text{ где:}$$

\tilde{K}_i , – нечеткое множество i -го конструкторского состава изделий РКТ;

\tilde{T}_i – нечеткое множество вариантов ТС i , обеспечивающих изготовление K_i ;

$\tilde{ПC}_i$ – нечеткое множество вариантов ПС, обеспечивающих реализацию K_i, T_i .

$\tilde{Q}_{1j} = \{C_{\Sigma}, W_{\Sigma}, P_{\text{ТС}}, \varphi\}_i$ – модель цели управления надежностью ТС i , где:

C_{Σ} – оценка среднее значение (математического ожидание) оценки стоимости реализации K_i, T_i ;

$W_{\Sigma} = W(\Pi_{K_i}, \Pi_{T_i})_{\Sigma}$ – номенклатура показателей качества K_i, T_i ;

$P_{\text{ТС}}$ – оценка среднего значения (математического ожидания) интегрального показателя надежности ТС i ;

$\varphi : P_{\text{ТС}}\{C_{\Sigma}, W(\Pi_{K_i}, \Pi_{T_i})_{\Sigma}, \text{Tr}_{\Sigma}, t_{\text{пр}}\} \rightarrow \max$ – целевая функция управления надежностью ТС i ;

$C_{\Sigma} \leq C_{\text{прзад}}$, $\text{Tr}(K_i) \leq \text{Tr}_{\text{зад}}$ – целевые требования к показателям затрат и трудоемкости производства K_i ;

$W(\Pi_{K_i}, \Pi_{T_i}) \geq W(\Pi_{K_i}, \Pi_{T_i})_{\text{зад}}$, $t_{\text{пр}} \leq t_{\text{прзад}}$ – целевые требования к параметрам конструкции изделий РКТ, ТС его изготовления, время (его предельное значение) изготовления K_i ;

$\tilde{U}_i = \{\tilde{u}_{ik}^{\Pi_i}\}$ – нечеткое множество решений структурной декомпозиции ТС i , заданное на Π_i как множество операторов вида: $\tilde{u}_{ik}^{\Pi_i}: \Pi_i \rightarrow T_{ik}$, где $\tilde{T}_{ik}(T_{\varepsilon} / \alpha_{\varepsilon}(T_{\varepsilon}), \lambda_{\varepsilon})_{ik}$ – k -й вариант ТС i для обеспечения заданных значений показателя

$W_{\sum i}$ для параметра P_i . Характеризует планируемую программу формирования $ТС_i$ для обеспечения заданных значений $P_{тс}$ как показателя W для $ТС_i$.

Неуправляемым входом программы являются исходные, заданные Заказчиком компоненты P_i, S_i , а управляемым - «весовое» содержание факторов управления (технологического метода (способа) технологического процесса, технологической цепочки, СТО, технологического режима), состояния оборудования) в обеспечение формирования k -го варианта $ТС_i$.

Выходом программы являются количественные значения критериев цели $\{C, W_{\phi}, T_p, t_{пр}, P(t), TУ\}_i$, оцениваемые руководителем (составителем) программы производственной деятельности.

Функция принадлежности $\alpha_{\varepsilon}(T_{\varepsilon})$, характеризует относительное содержание фактора T_{ε} управления (технологического метода (способа) технологического процесса, технологической цепочки, СТО, технологического режима), указывающее вклад («весовую» долю) в обеспечение формирования k -го варианта $ТС_i$, а порог принадлежности $\lambda_{\varepsilon} \in [0, 1]$ определяет требования, предъявляемые к качеству показателя $W_{\sum i}$, причем качество удовлетворяется при: $\alpha_{\varepsilon}(T_{\varepsilon}) > \lambda_{\phi}$.

В общем случае всего может быть n «весовых» компонентов ($\varepsilon = 1 \dots n$), где $\sum_{\varepsilon=1}^n \alpha_{\varepsilon}(T_{\varepsilon}) = 1$.

Функция принадлежности $\mu_{\phi}(W_{\phi})$ характеризует качество (функцию ценности) единичного показателя $TУ W_{\phi}$ для k -го варианта $ТС_i$, а порог принадлежности $\lambda_{\phi} \in [0, 1]$ определяет требования, предъявляемые к качеству показателя $W_{\sum i}$, причем качество удовлетворяется при: $\mu_{\phi}(W_{\phi}) > \lambda_{\phi}$.

Значения $\alpha_{\varepsilon}(T_{\varepsilon}), \lambda_{\phi}, \mu_{\phi}(W_{\phi})$ определяются экспертным путем в процессе разработки технологии T_i . Методы экспертной оценки достаточно широко представлены в литературе и применяются в отрасли.

Синтез вариантов осуществляется путем варьирования $\alpha_{\varepsilon}(T_{\varepsilon})$ группировок K_i, T_i , закрепляемых за различными вариантами $ПС_i$. Для этого использован метод кластер-анализа, позволяющий осуществлять упорядоченное разбиение (уточнение) кластеров K_i, T_i на более мелкие с большей степенью влияния производственно-технологических факторов (Рис. 3).

Метод декомпозиции $ТС$ на основе методологии ПОУ позволяет выстроить систему управления процессами технологического обеспечения организации цифрового производства, поскольку обеспечивает итеративное управление надежностью $ТС$ в нечетких условиях перехода к серийному производству изделий РКТ с учетом требований к уровню цифровизации $ПС РКП$ путем формирования рациональных планов реконструкции, технического перевооружения и модернизации ИТ – инфраструктуры $ПС$ цехов предприятий РКП.

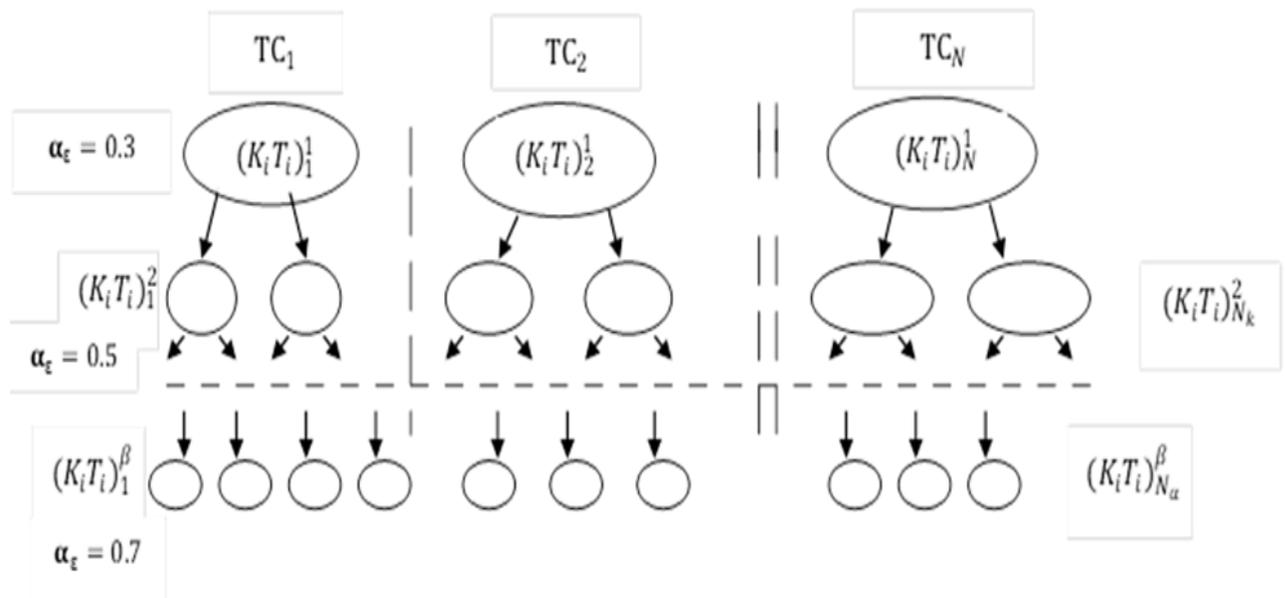


Рис.3. Схема процесса итеративного уточнения кластеров ТС

Глава 3 посвящена вопросам моделирования процессов контроля и регулирования показателей надежности ТС в условиях множественности критериев и ограничений путем введения допусков на параметры технологического процесса, а также получения зависимостей между эффективностью ТС и параметрами качества изготовления продукции для решения задачи второго уровня.

Показана эффективность метода проактивного обслуживания по анализу параметров вибрации оборудования для формирования модели контроля показателей надежности ТС.

Модель задачи второго уровня (контроля состояния ТС) имеет вид:

$$F_2 = F (T, Q_{\text{ТОиР}}, U_{\text{ТОиР}}), \text{ где:}$$

T – модель модуля технологического оборудования, определяющего интегральный показатель надежности ТС;

$Q_{\text{ТОиР}} = \{C_{\Sigma \text{ТОиР}}, \omega_T, \varphi_{\text{ТОиР}}\}_i$ – модель цели управления надежностью ТС $_i$, где:

$C_{\Sigma \text{ТОиР}}$ – оценка среднее значение (математического ожидание) оценки стоимости программы ТОиР;

ω_T – номенклатура производственно-технологических факторов, определяющих состояние оборудования;

$\varphi_{\text{ТОиР}}: C_{\Sigma \text{ТОиР}} \{ \omega_T, P_{\text{ТС}}, t_{\text{пр}} \} \rightarrow \min$ – целевая функция управления процессами технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования;

$P_{\text{ТС}}$ – оценка среднего значения (математического ожидания) интегрального показателя надежности ТС $_i$;

$P_{\text{ТС}} \geq P_{\text{ТСзад}}, t_{\text{пр}} \leq t_{\text{прзад}}$ – целевые требования к надежности ТС и времени (его предельному значению) программы ТОиР;

$\tilde{U}_{\text{ТОиР}} = \{\tilde{u}_{\text{ТОиР}}\}$ - нечеткое множество программ ТОиР.

Посредством метода структурируется множество производственно-технологических факторов (дефекты составных частей оборудования, накопленные

повреждения в материалах, параметры обработки и др.) и оценивается их влияние на надежность ТС.

Экспериментальные данные (измеренный спектр вибраций и др.) сопоставляются с расчетными или паспортными данными, представленными в эталонной модели станка в диапазоне рабочих частот (Гц).

Далее идентифицируются и структурируются виды производственно-технологических факторов, а их величина определяется отношением значений амплитуд сигналов на частотах, характеризующих дефекты, к среднеквадратичному значению экспериментально полученного сигнала. Итоговые результаты представляются в виде таблицы дефектов каждой составной части оборудования, или в графическом виде, согласно схеме состояния деталей станка с описанием дефектов.

В результате формируются регрессионные модели зависимостей целевых функций вероятности отклонений показателей надежности ТС от производственно-технологических факторов вида с оценкой вклада факторов в величину разбросов параметров: $Y_j = \mathbf{b}_{0j} + \sum_{i=1}^N \mathbf{b}_{ij} x_i$, где Y_j – целевая функция, \mathbf{b}_{ij} – коэффициенты регрессии; x_i – производственно-технологические факторы (детерминированные величины дефектов, износа элементов, обеспечивающих точность оборудования: шпинделя, подшипников, шариково-винтовых пар, зубчатых и ременных передач, электродвигателей, насосов и т.д.).

В работе применена разработанная автором классификация основных производственно-технологических факторов, влияющих на стабильность параметров создаваемых изделий РКТ.

С учетом особенностей составления годовых планов ТОиР для ранних стадий ЖЦ изделий РКТ, не требующих высокой точности, в рамках работы разработаны линейные регрессионные модели для оборудования механообрабатывающего производства.

Автором разработана методика организации ТОиР на предприятиях отрасли в соответствии с ГОСТ 34479-2018 (Рис. 4).

В исследованиях обобщен отраслевой опыт, сформулирован единый подход и разработана типовая модель процесса контроля и регулирования стабильности значений показателей надежности ТС в условиях опытного и серийного производств, классифицированы основные производственно-технологические факторы, влияющие на стабильность параметров создаваемых изделий РКТ, в т.ч.:

1. Показан и унифицирован механизм учета производственно-технологических факторов при обеспечении стабильности значений показателей качества и надежности создаваемых изделий РКТ и технологии их производства в условиях цифровой трансформации.

2. Показана необходимость внедрения единой отраслевой системы управления состоянием оборудования на уровне предиктивного анализа, что позволит сократить затраты и повысить качество производственных процессов.

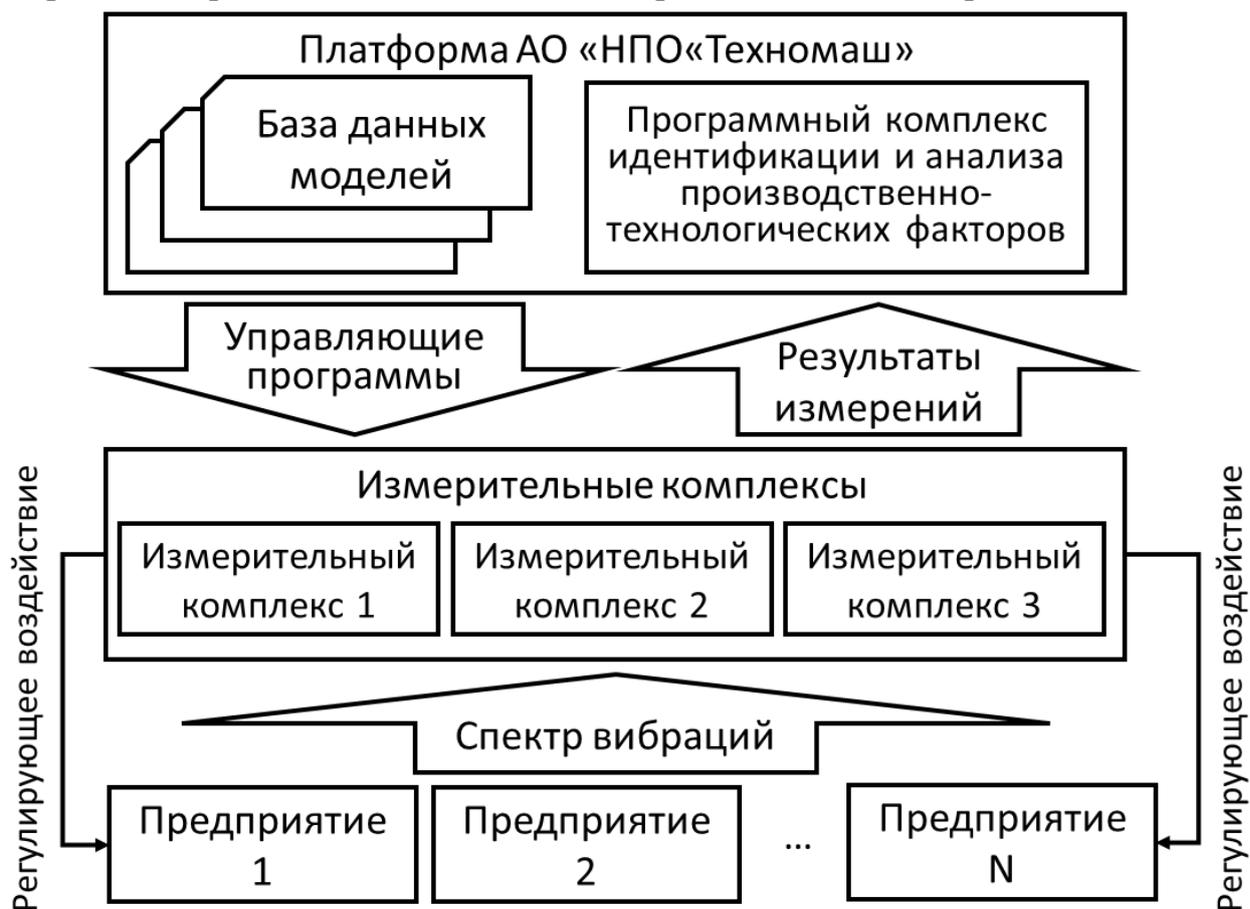


Рис. 4. Схема организации ТОиР на предприятиях отрасли.

Глава 4 посвящена адаптации созданных методов к практике проведения технологических аудитов на предприятиях РКП и реализации элементов управления в автоматизированных системах сопровождения цифрового производства.

Неотъемлемым техническим приемом концепции «Индустрия 4.0» является использование цифровых двойников (Digital Twin, DT). На основе методологии ПОУ сформирована система цифровых двойников в составе: *DT-1* – цифрового двойника изделия РКТ (хранит информацию о КД, ТД (ТП, УП) и тп.), *DT-2* – цифрового двойника процессов создания изделия РКТ (хранит информацию потоке работ при создании изделия РКТ, планы подразделений, электронные паспорта изделий и тп.), *DT-3* – цифрового двойника ПС (хранит информацию о паспорте предприятия, персонале, организационной структуре, оборудовании (для ТОиР), ресурсные характеристики подразделений, базы знаний по производственно-технологическим решениям, перечень базовых и критических технологий, руководящие и аналитические материалы по описанию деятельности и пр.) (Рис. 5).

DT-2 фиксирует и позволяет определить параметры изделия РКТ, формируемые в процессах разработки и изготовления.

Основные задачи, решенные с применением DT-3 на базе метода декомпозиции ТС включают:

- поддержание технологий, оборудования, СТО в работоспособном состоянии;
- оптимизация состава ресурсов (оборудование, здания, ... кадровый потенциал);
- поддержка паспорта предприятия.
- формирование плана мероприятий технологического обеспечения организации цифрового производства.

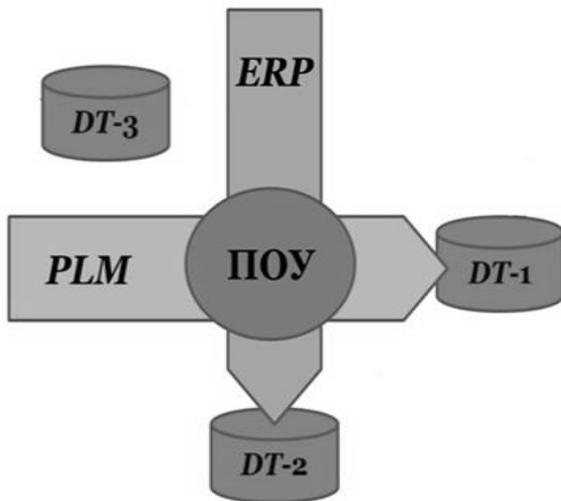


Рис. 5. Структурная схема системы ПОУ

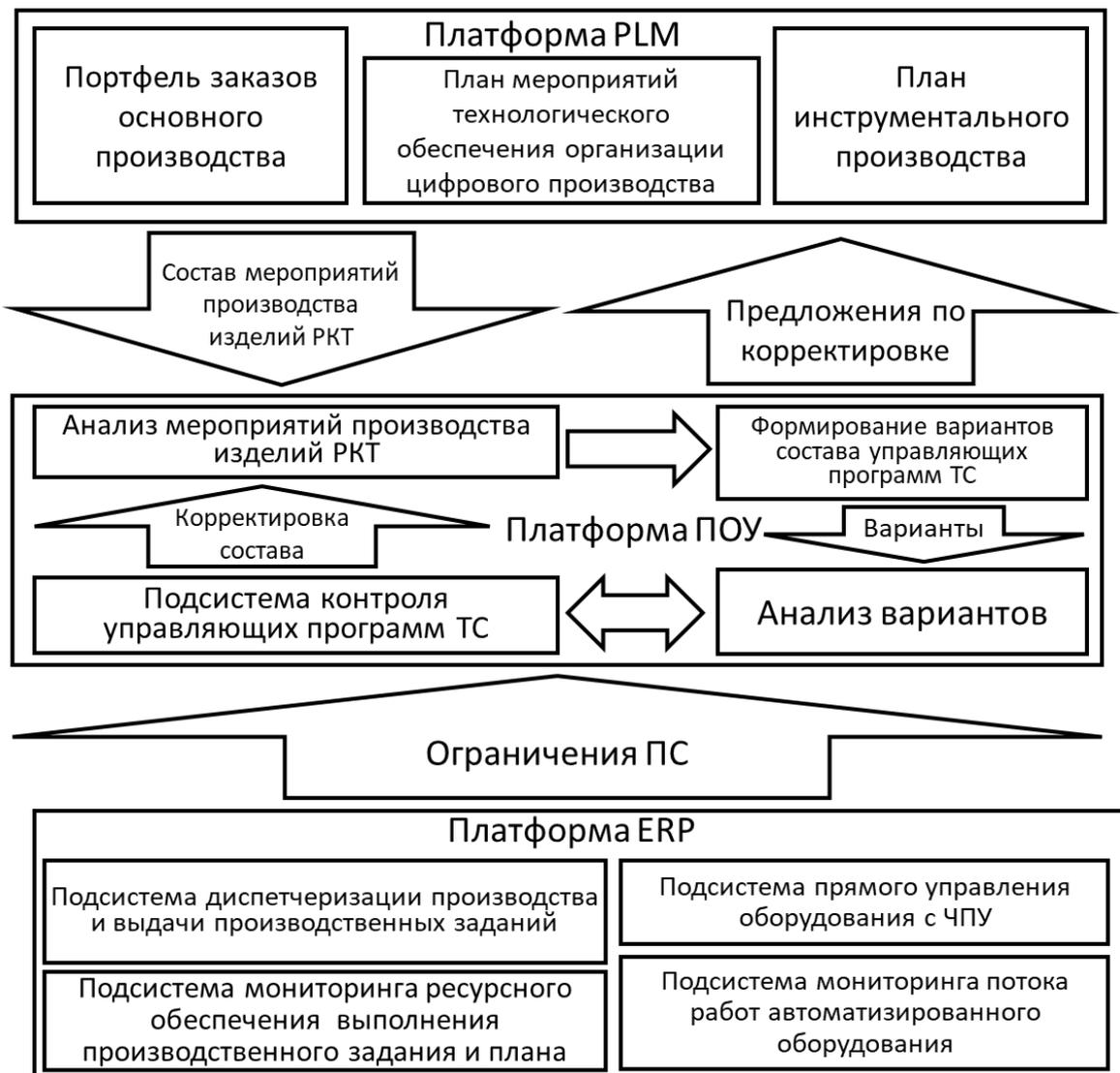


Рис. 6. Структурная схема перспективной системы управления предприятием

В ходе внедрения на предприятиях РКП комплексного проекта «Разработка информационно-программных средств автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства» разработаны элементы методического, математического и организационного обеспечений подсистем (Рис. 6). Работы по проекту позволили определить функционал перспективной системы управления предприятием

По итогам аудита формируется сводная диаграмма нормированного уровня цифровизации по всем направлениям производственной деятельности предприятий, где зеленым контуром обозначены показатели (достижение которых планируется к 2025–2030 годам), а красным – фактические показатели предприятия, фиксирующая выявленные общесистемные проблемы предприятий (Рис.7).



Рис. 7. Уровень цифровизации предприятия РКП

Единая методология оценки позволяет делать сравнительный анализ «цифровой зрелости» обследуемых предприятий между собой, и ее соответствия целевым показателям (Рис.8).

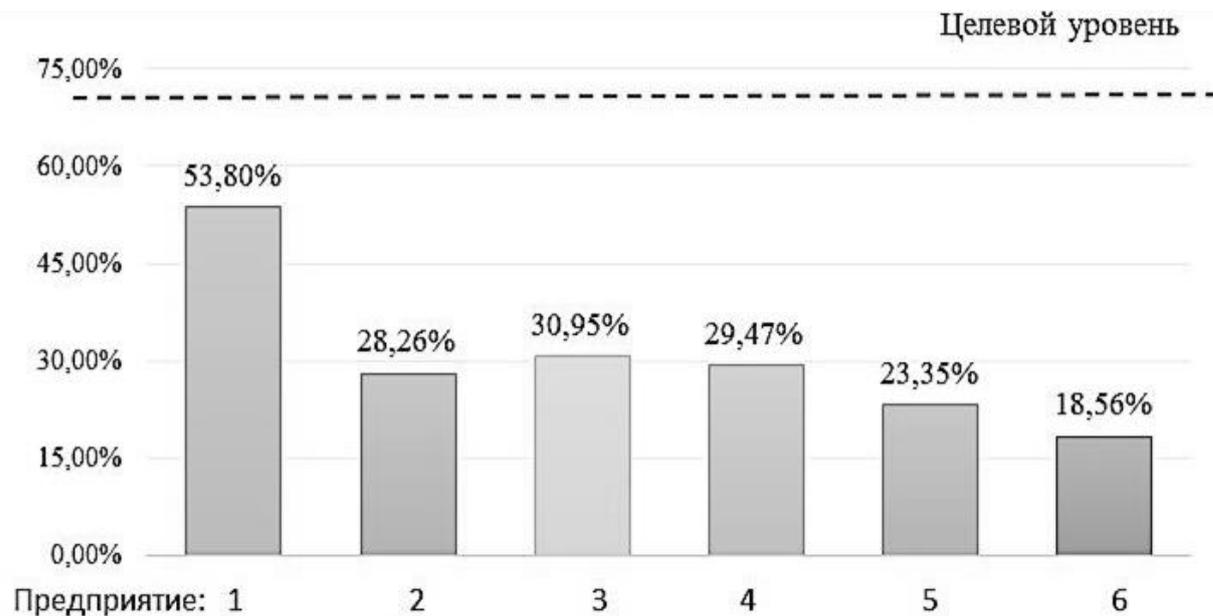


Рис. 8. Уровень цифровизации предприятий интегрированной структуры

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования существующих систем цифровизации предприятий РКП с позиций надежности ТС на основе предложенной методики технологического аудита показали недостаточность и фрагментарность внедрения технологий «цифрового производства» на предприятиях РКП.

1. По результатам анализа системных проблем отрасли, факторов сдерживания процессов цифровизации и их методического обеспечения разработаны:

- общепромышленной системный подход на базе единой методологии, позволяющей решать задачи формирования цифрового облика производственных систем изготовления изделий РКТ в обеспечение Стратегии ГК «Роскосмос»,
- научно-методические материалы технологического аудита с оценкой технического и цифрового уровня развития предприятий РКП, позволившие сформировать алгоритмы внедрения новых решений «Индустрии 4.0» на предприятиях отрасли.

2. Разработан комплекс моделей и методов обеспечения качества процессов изготовления изделий РКТ на основе принципов организации цифрового производства, включающий:

2.1 Классификацию основных факторов обеспечения стабильности значений показателей качества создаваемых элементов изделий РКТ и технологий в условиях опытного и серийного производств.

2.2 Модель и метод структурной декомпозиции ТС в условиях слабоструктурированной задачи управления надежностью, позволяющий сформировать рациональные планы опережающего технологического обеспечения организации цифрового производства на всех стадиях ЖЦ изделий РКТ.

2.3 Модель и метод контроля состояния ТС на основе предиктивных технологий управления ЖЦ оборудования, с применением которого в рамках методологии ПОУ сформированы архитектура и функционал перспективной системы управления ПС РКТ. Это обеспечивает количественный учет случайных факторов при контроле стабильности значений показателей качества создаваемых изделий РКТ и технологии их производства в условиях цифровой трансформации.

2.4 Метод проактивного обслуживания ТС по анализу параметров вибрации оборудования для формирования модели контроля показателей надежности технологических систем.

2.5 Механизм включения проектов цифровизации производственных систем в общий план (поток) работ предприятия, обеспечивающий планирование работ на едином объеме трудовых и материальных ресурсов предприятия.

2.6 Алгоритмы унификации процедур диспетчеризации при применении универсального оборудования и оборудования с ЧПУ в системе ПОУ.

3. Практическое применение результатов работы реализовано в аппаратно-программном комплексе управления производством, который включает системы: управления и мониторинга работы автоматизированного технологического оборудования; диспетчеризации производства и выдачи производственных заданий; мониторинга и ресурсного обеспечения выполнения производственного задания и производственного плана; оценки состояния оборудования и параметров готовой продукции и др. Комплекс обеспечивает управление качеством изделий РКТ в условиях перехода к серийному производству на основе моделей организации цифрового производства.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Обоснование формализованной оценки эффективности технологических и производственных систем / Е.С.Юрцев [и др.] // Информационно-технологический вестник. 2018. № 1(15). С. 169-181. (0,84/0,25)
2. Управление жизненным циклом продукции с позиций нового уклада организации производственных систем / Е.С.Юрцев, А.В. Рагуткин [и др.] // Качество и жизнь. 2019. № 2(22). С. 28-34. (0,41/0,14)
3. Реализация системы управления проектно-производственной деятельностью для создания сложной технической продукции / Е.С.Юрцев, А.В. Рагуткин [и др.] // Информационно-технологический вестник. 2019. № 4(22). С. 147-161. (0,81/0,26)
4. Современные методы диагностики сложных технических систем в условиях цифрового производства / Е. С.Юрцев [и др.] // Станкоинструмент. 2020. № 2(19). С. 64-71. (0,42/0,15)
5. Опыт ФГУП «НПО «Техномаш» в проведении технологического аудита уровня цифрового развития предприятий ракетно-космической промышленности / Е. С.Юрцев [и др.] // Станкоинструмент. 2020. № 3(20). С. 76-81. (0,32/0,18)
6. Проблемы технического перевооружения предприятий ракетно-космической промышленности и создание отраслевого инжинирингового центра / Е. С. Юрцев [и др.] // Станкоинструмент. 2021. № 1(22). С. 20-23. (0,24/0,1)
7. Автоматизированная система «Оценка технического уровня предприятия по видам производства» / Е.С.Юрцев [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611996 Российская Федерация. № 2014663826. заявл. 26.12.2014. опубл. 10.02.2015.
8. Семенов В.В., Юрцев Е.С., Рахмилевич Е.Г. Универсальный транслятор с языков программирования цифрового оборудования // В.В.Семенов, Е.С.Юрцев, Е.Г.Рахмилевич Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660480 Российская Федерация. № 2018617285. заявл. 12.07.2018. опубл. 23.08.2018.
9. Создание иерархий принятия решения по управляющим действиям выбора технологии / Е.С.Юрцев [и др.] //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661547 Российская Федерация. № 2019660466. заявл. 22.08.2019. опубл. 02.09.2019.
10. Рагуткин А.В., Сидоров М.И., Юрцев Е.С. Модели организации цифрового машиностроительного производства: монография / А.В.Рагуткин, М.И.Сидоров, Е.С.Юрцев; под ред. А.В.Рагуткина // М.: «Эко-Пресс», 2021. 289 с. (21,1 /7,0)