

На правах рукописи



РАГУТКИН АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

**МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗЕЙ
МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.

Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Научный консультант:

Сидоров Михаил Игоревич

доктор технических наук

Официальные оппоненты:

Азаров Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»

профессор кафедры менеджмента качества Института путей, строительства сооружений

Олейник Андрей Владимирович

доктор технических наук, профессор

ФГАУН «Институт конструкторско-технологической информатики

Российской академии наук»

ведущий научный сотрудник

Одинокое Сергей Анатольевич

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

и.о. заведующего кафедрой управления качеством и сертификации

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится «19» октября 2023 года в 12-00 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.

Отзывы автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 и на сайте <https://bmstu.ru>

Автореферат разослан _____ 2023 года Ученый

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



Елена Сергеевна Постникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из важных задач российской науки в современных условиях, является разработка научно обоснованной стратегии и методологии повышения эффективности реализуемых технологических процессов и функционирования производственных систем на основе использования цифровых технологий, разработки систем и методов адаптивного управления на всех уровнях производства и применения сложной наукоемкой продукции. Информационно-коммуникационная среда современного цифрового машиностроительного производства, представляет совокупность программно-аппаратных средств, обеспечивающих реализацию и сопровождение всех стадий производственного процесса в автоматизированном или автоматическом режиме, в том числе сбор, создание, обработку, передачу и хранение необходимой информации в цифровом виде.

Необходимым условием успешного решения задач развития машиностроения является опережающее развитие исследовательской и экспериментальной базы, обеспечивающей внедрение новых технологий с использованием современных информационно-измерительных систем, систем обработки экспериментальных данных. Экспериментальная отработка технических систем наиболее сложная многокритериальная задача, решение которой обеспечивает достоверность оценки и прогнозирования надежности выпускаемых изделий в различных условиях эксплуатации и создание сложных технических систем с требуемыми параметрами эффективности функционирования при наименьших затратах времени и ресурсов. Несмотря на большое количество видов испытаний, всех их объединяет единая цель, заключающаяся в обнаружении дефектов разработки и изготовления, которые приводят к снижению эффективности применения изделий. Информация, полученная при испытаниях, используется для устранения этих дефектов, а также для совершенствования методов управления процессами на стадиях жизненного цикла.

Такие исследования предполагают обработку больших объемов данных, что невозможно без использования современных методов моделирования и вычислительных процедур. Цифровые технологии охватывают все области разработки, производства и эксплуатации изделия. Их применение в авиакосмической отрасли развивается ускоренными темпами, однако, недостаточно системно и не обеспечивает получение и обработку информации в едином формате и логике.

Очень важной частью системного подхода к созданию новых видов техники и построению эффективных технологий и технологических систем является получение достоверных исследовательских данных о связях свойств материалов, применяемых в конструкциях, на всех стадиях их жизненного цикла. Создание физических и математических моделей объектов, оценка их поведения и изменения состояния в процессе изготовления и эксплуатации зависит от достоверности данных по

изменению свойств материалов при внешнем воздействии (нагрузении, обработке, трении и т.п.) Поэтому важнейшим направлением работ по созданию цифрового производства является разработка программно-аппаратных и исследовательских комплексов, позволяющих получать объективную, достоверную и пригодную к обработке информацию о поведении материалов в процессе изготовления деталей и их эксплуатации.

Степень разработанности темы исследования. Изучение вопросов создания и свойств цифровых двойников машиностроительных производств фактически только начинается. Только в последние годы начались работы по согласованию понятийного аппарата предметной области, в 2012 году введен ГОСТР 55062 «Информационные технологии. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения», разработанный ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. С 2020 года ведется обсуждение и принятие стандартов серии «Цифровые двойники» и «Искусственный интеллект».

Многочисленными исследованиями вопросов эффективности производства известны зарубежные ученые И. Ансофф, Л. фон Бергаланфи, У. Браун, М. Вебер, Л. Гэлловей, Л. Гилбрет, Д. Джонс, П. Дракер, Б. Карлофф, М. Коленсо, Дж. Лайкер, Дж.Д. Лизни, В. Маршал, Б. Маскелл, К. Менар, М. Мескон, Дж. Морган, Д. Норт, Г. Саймон, Ф.У. Тейлор, Дж. Томпсон, С. Хайниш, Й. Шумпетер и др.

Особенности производства наукоемкой продукции и инноваций в производстве рассматривались в работах Ю.П. Анисимова, Афанасьева М.В., Альтшуллера Г.С., Бендикова М.А., Горбунова В.Л., Емельянова Е.В., Лapidуса В.А., Шапиро Д. И. и др.

Роль информационных технологий в управлении и организации производств отражена в работах: Бусленко Н.П., Боровкова А.И., Воронова А.А., Вороновского Г.К., Емельянова С.В., Заикина О.А., Зельнера Е.Я., Калмана Р., Каплана Р.С., Кирпичникова А.П., Кудрявцева Е.М., Озгюнера Ю., Олейника А.В., А.И. Орлова, Перверзева М. П., Сингха М.Г., Финдейзена В., Фомина Б.Ф., Шеера А.В. и многих других.

Проблемы повышения производительности и качества продукции всегда были центром внимания ученых во всей истории развития науки. Автору хотелось отметить ученых, труды которых легли в основу его мировоззрения в данной области знаний. Это, прежде всего, Бойцов Б.В., Волчкевич Л.И., Гнеденко Б.В., Дзиркал Э.В., Дружинин Г.В., Кендалл М., Кубарев А.И., Лукашев Е.А., Олейник А.В., Первозванский А.А., Поспелов Г.С., Саати Т., Северцев Н.А., Сигов А.С., Советов Б. Я., Ставровский М.Е., Ушаков И.А., Флейшман Б.С., Цвиркун А.Д., Шеннон Р., Шор Я. Б. и др.

Несмотря на разнообразие исследовательских подходов, вопросы взаимосвязи и оптимизации параметров производительности и качества при организации производств остаются актуальными. В современных условиях эти аспекты проблемы эффективности тесно увязываются с необходимостью учета экологических требований. В условиях перехода к цифровому производству к числу актуальных направлений исследований можно отнести создание методик количественной оценки показателей, определение сферы применения и прогнозирование практических результатов с помощью информационных технологий.

Объектом исследования являются цифровые модели процессов организации производства продукции машиностроительных предприятий.

Предметом исследования являются модели и методы организации производства, результаты аналитики данных, обеспечивающие эффективность функционирования производственных и технологических систем.

Целью научного исследования является создание основ методологии по исследованию связей свойств цифровых моделей управления процессами машиностроительных производств, обеспечивающих их эффективность.

Для реализации данной цели в работе **решались следующие блоки задач:**

- исследование иерархической структуры и элементов цифровых моделей технологических систем машиностроения (ТСМ), обоснование мероприятий оценки уровня производств при проведении технологического аудита;
- исследование и регулирование работоспособности технологических и производственных систем машиностроения по комплексным критериям, определяющим эффективность производств; согласование параметров качества и производительности при производстве машиностроительной продукции; исследование и оценка эффективности организации производства с использованием аппарата метода анализа иерархий (МАИ);
- исследование моделей разрушения материалов в процессах их технологической обработки и эксплуатации изделий; определение «маркеров» процессов разрушения и изнашивания материалов; исследование взаимосвязей динамических моделей точности исполнительных механизмов и изнашивания материалов;
- разработка моделей контроля параметров обработки в процессе изготовления деталей сборочных единиц изделий; разработка технологических мероприятий, направленных на повышение срока службы и работоспособности средств ТСМ; разработка моделей влияния технологических параметров и режимов эксплуатации на работоспособность материалов;
- разработка базовых элементов информационной системы управления мероприятиями, направленными на повышение производительности и эффективности производств; апробация и внедрение результатов работы.

Методы исследования. Использовались корректные методы исследований, основанные на ресурсных подходах к оптимизации параметров производств, методы физического и математического моделирования, управления, экспертных оценок, прикладной статистики, прогнозирования и объектно-ориентированного проектирования.

Достоверность полученных **научных результатов** обоснована верификацией математических моделей, применением системного подхода к исследованиям, обеспечивается аттестованными методиками и средствами натуральных исследований, валидацией данных, полученных в результате экспериментов, и согласованностью их результатов с теоретическими моделями.

Научная новизна диссертационной работы состоит в разработке комплексных научно обоснованных решений, направленных на повышение эффективности производства изделий машиностроения, решением сопряженных задач обеспечения работоспособности с использованием:

- Моделей контроля параметров обработки изделий;
- Методик регулирования работоспособности ТСМ по комплексным критериям, определяющим эффективность производства;
- Моделей поддержки работоспособности технологических систем предиктивными и проактивными технологиями.

1. Обоснованы методологические принципы построения цифровых двойников изделий, оборудования и технологической системы машиностроительного производства, необходимые для принятия управленческих решений.

2. Разработана система оценки эффективности принятия управленческих решений по организации производства изделий машиностроения с учетом динамики показателей работоспособности технологических систем.

3. Теоретически обоснованы и реализованы технологические методы повышения срока службы оборудования и производимых изделий.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новых методов исследования условий обеспечения работоспособности ТСМ по оценке использования ресурсов предприятия, разработке теоретической базы и методических положений обоснования показателей эффективности технологических систем производства.

Результаты работы предназначены для использования при решении задач:

- создания и согласования формата и наполнения данными цифровых двойников изделий машиностроения;
- разработки моделей управления технологическими процессами производства изделий машиностроения;

- формирования научно-методической и информационной базы по параметрам и критериям эффективности функционирования технологических и производственных систем;
- создания организационных механизмов реализации проектов, направленных на повышение эффективности производственных систем;
- прогнозирования необходимости проведения работ по обслуживанию элементов технологических систем.

Практическая значимость работы заключается в развитии методов, обеспечивающих повышение интероперабельности цифровых двойников изделий, технологических и производственных систем – способности компонентов информационных систем к обмену и использованию информации, полученной в результате обмена, с учетом необходимости обеспечения взаимодействия на техническом, семантическом и организационном уровнях.

Применение разработанных в диссертации методов и средств адаптивного управления при организации производства позволяет повысить производительность предприятий путём оперативного реагирования на изменения ее показателей на каждом иерархическом уровне принятия решений с использованием современных технологий цифрового производства.

Применение предложенных в работе моделей оптимизации параметров технологических процессов существенно сокращает сроки и затраты на проведение различных видов испытаний, подготовку производства и изготовление продукции с заданным уровнем качества.

Предложенная методика оценки эффективности технологических процессов изготовления продукции на основе метода анализа иерархий обеспечивает получение согласованного решения управленческих структур машиностроительного предприятия по выбору оптимальных технологических и производственных процессов.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы использованы при выполнении проектов модернизации производств, в рамках ФЦП на промышленных предприятиях и реализуются в программе развития цифровых производств, разработанной ГК «Роскосмос». В рамках проекта с индустриальным партнером – ФГУП НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева создан комплекс информационно-программных средств автоматизации управления высоко-технологичным оборудованием с ЧПУ, включающий:

- системы диспетчеризации производства и выдачи производственных заданий;
- системы мониторинга работы оборудования с ЧПУ, участков оборудования с ЧПУ и другого автоматизированного технологического оборудования цифрового машиностроительного производства;

- системы подготовки, контроля, архивации управляющих программ;
- системы прямого управления оборудованием с ЧПУ;
- системы визуализации информации о протекании технологических процессов, состоянии и функционировании оборудования, а также параметрах заготовок и готовой продукции;
- программное обеспечение автоматизированных рабочих мест цифрового машиностроительного производства.

Разработано и реализовано:

- Разработана система имитационного моделирования и визуализации работы цифрового оборудования по управляющим программам и по результатам мониторинга работы приводов NCSIM.
- Разработаны технические (программно-аппаратные) средства, обеспечение переход на универсальный язык управления UNCL при использовании аналогичных средств распространенных САМ- систем,
- Разработаны методические материалы, обеспечивающие протоколы взаимодействия между участниками оперативного управления производством.

Результаты исследований по моделям процессов, используемых при создании цифровых двойников технологических процессов и изделий, реализованы на различных предприятиях и организациях разных отраслей экономики, а также на предприятиях – партнерах ФГБОУ ВО «РТУ - МИРЭА» и на базовых кафедрах этих предприятий. Научно - методические разработки, созданные автором, используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «РТУ - МИРЭА» при подготовке бакалавров и магистров по направлению 15.03.01 Машиностроение (профиль: цифровые и аддитивные технологии в машиностроении). Внедрение результатов исследования подтверждено соответствующими документами.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретическое обоснование, разработанные модели и методические подходы обеспечения значимой интероперабельности цифровых двойников изделий, технологических и производственных систем.
2. Научно обоснованные и экспериментально подтвержденные связи цифровых двойников изделий и технологических процессов, позволяющие управлять режимами обработки материалов для получения регламентированных параметров качества изготовления изделий машиностроения при оптимальной производительности технологического оборудования.
3. Топологическое описание работоспособности технологической системы производства изделий машиностроения и модели исследования эффективности производственной технологии по комплексным показателям.

4. Методика согласования принятия решений по организации производства изделий на основании оценки эффективности технологических процессов изготовления продукции методом анализа иерархий.

5. Методы оптимизации параметров и повышения инструментальной достоверности контроля технологических процессов, определяющих возможность повышения производительности обработки изделий и технологического обеспечения качества их изготовления.

6. Комплекс информационно-программных средств автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием с ЧПУ, включающий: системы мониторинга работы оборудования, участков оборудования с ЧПУ и другого автоматизированного технологического оборудования цифрового машиностроительного производства, систему имитационного моделирования и визуализации работы цифрового оборудования.

7. Многоуровневая система формирования показателей надежности ТСМ при организации наукоемких производств, на основе математической модели оптимизации потоков ресурсов предприятия и решении задач эффективного соотношения параметров производительности и качества производства.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует пунктам паспорта специальности 2.5.22:

1. Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства.

9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов.

18. Разработка научных, методологических и системотехнических принципов повышения эффективности функционирования и качества организации производственных систем.

25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике.

Апробация работы. Основные результаты исследований были доложены на российских и международных научно-практических конференциях различного уровня, в том числе: Международной конференции «Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем» ФГБОУ ВО МИЭТ 2014; I - VIII Международных научно-практических конференциях «Московский технологический университет (РТУ - МИРЭА) в 2015 – 2022 г.г.»; 6th International Conference «Modern Technologies for Non-Destructive Testing» Tomsk, 09-14 октября 2017 г.; 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Applied Composite Materials, MEACM 2019 Singapore, 22-23 ноября 2019 г. и др.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 53 научных работах, в том числе: 5 монографиях; 48 научных статьях в реферируемых и индексируемых изданиях, из них: 25 в индексируемых SCOPUS и WoS, 23 – в рекомендованных ВАК России; по тематике, связанной с темой диссертации; **Личный вклад автора** заключается в обобщении результатов исследований широкого круга авторов по различным направлениям в предметной области, в результате которого обоснованы актуальность темы исследований, цель и задачи, решение которых обеспечивает ее достижение. Автором получены новые научные результаты, вынесенные на защиту, обеспечено личным участием достижение основных научно-практических результатов внедрения разработок, выраженных в выводах и рекомендациях.

Автором разработаны модели, методы и средства, определяющие возможность управляемого достижения параметров обеспечения эффективности производств, в том числе научно-методические материалы и практические приложения, реализованные в промышленности, используемые научными организациями и в учебном процессе РТУ МИРЭА.

Все результаты диссертационной работы получены лично автором и при его непосредственном участии при проведении теоретических и экспериментальных исследований. Во всех необходимых случаях заимствования результатов в диссертации приведены соответствующие ссылки.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов и заключения. Содержание диссертации изложено на 285 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц и 57 рисунков. Список литературы включает 349 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, перечислены методы и средства исследований, обозначены научная новизна и практическая ценность, приведены сведения о построении и структуре диссертационного исследования.

В Главе 1 «Анализ моделей технологического обеспечения изготовления продукции» приведен аналитический обзор исследований различных авторов, а также мероприятий и работ, осуществляемых в предметной области в настоящее время. Предложены и обоснованы направления решения поставленных в работе задач.

В главе рассмотрены мероприятия и процедуры, проводимые для оценки эффективности производства и программ технического перевооружения: технологический, энергетический и экологический аудит.

Показано, что в процессе технологического аудита должны осуществляться сравнения совместимости и связей свойств цифровых двойников технологических

систем, технологических процессов и цифровых двойников изделий с учетом связи свойств материалов, из которых они изготавливаются и возможности перехода на перспективные материалы и технологии их обработки. Например, в авиаракетостроении осуществляется переход на композиционные материалы, что не может не сказаться на особенностях применяемого оборудования, метрологического обеспечения и т.д. В результате инжиниринга должно быть выработано обоснованное техническое предложение по организации нового, или модернизации существующего производства. Отмечено, что в современных условиях большое значение уделяется переходу на наилучшие доступные технологии (НДТ), что еще в большей степени заставляет говорить о необходимости методического сопровождения по интероперабельности цифровых двойников изделий, технологических и производственных систем, разработки «маркеров», позволяющих идентифицировать различные процессы.

Основываясь на результатах многолетних работ российских технологов и инженеров-экологов и учитывая международный опыт [Directive 2010/75/EC], в России заявили о переходе к новому технологическому нормированию промышленности. Минпромторгом России были созданы институты и инструменты поддержки деятельности в сфере промышленности, настроить которые нужно таким образом, чтобы экологизация промышленности стала неременным условием ее развития, чтобы решающим стала не мощность производственных процессов и не количество промплощадок, а их качество, экологичность и ресурсоэффективность, в перечне путей поддержки было определено стимулирование использования наилучших доступных технологий в промышленном производстве.

В Главе 2 «Исследования взаимосвязей процессов организации цифрового производства и технологии создания изделий» рассмотрены ИПИ-технологии, применяемые на всех стадиях жизненного цикла изделий ракетно-космической техники.

На основании проведенного анализа сделан вывод: многономенклатурное серийное, мелкосерийное машиностроительное производство дискретного продукта испытывает наибольшие сложности в реализации систем комплексной автоматизации, что обусловлено как объективными причинами (сложность и многообразие одновременно реализуемых технологических процессов), так и субъективными особенностями российских предприятий, применяющих для одного технологического процесса технологическое оборудование различных классов и разного уровня автоматизации.

Проблему можно решить при внедрении на предприятии концепции цифрового производства, где должно быть реализовано функционирование систем управления производственным процессом в режиме реального времени и обеспечен достаточ-

ный уровень гибкости на всех стадиях производства (Рис. 1), начиная с его планирования и заканчивая производственно-технологической стадией, что современной наукой описывается в концепции Индустрии 4.0.

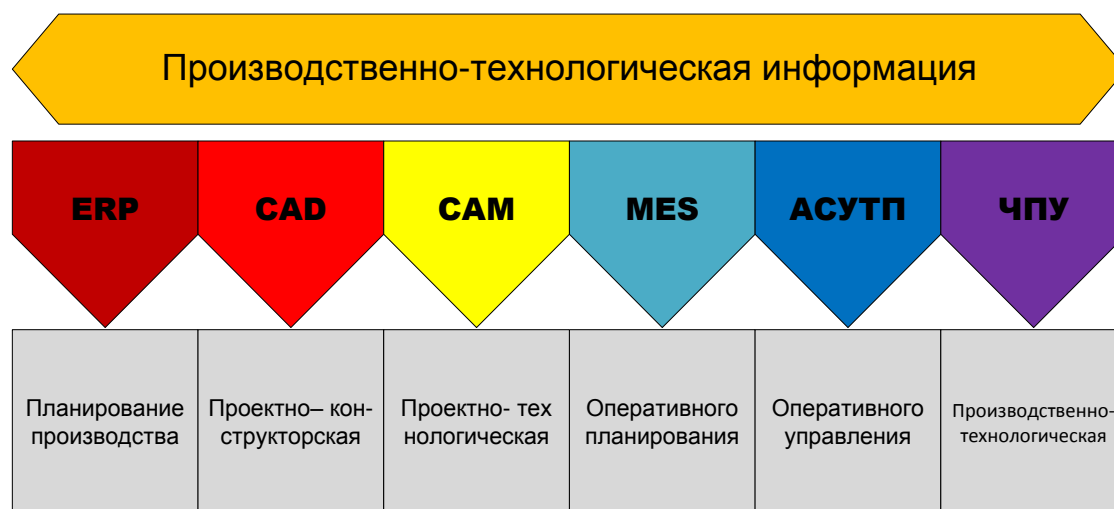


Рис.1. Стадии производственных процессов цифрового машиностроительного производства

Одной из главных проблем является формализация свойств ТСМ и систем, обеспечивающих управление на всех стадиях производства. Проведённый анализ в области разработки информационно-программных средств, для автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства дал возможность определить перечень научных, методических и опытно-конструкторских работ, который позволит сделать переход цифрового машиностроительного предприятия на новый уровень функционирования. Подобный перечень мероприятий должен включать в себя следующие работы:

1. Проведение анализа современных многономенклатурных мелкосерийных производств, для определения условий экономически оправданного функционирования предприятий в соответствии с концепцией Индустрии 4.0, с целью определения необходимых параметров производства, обеспечивающих экономический рост.

2. Проведение анализа набора параметров киберфизических систем многономенклатурного мелкосерийного производства, обеспечивающего достижение необходимых параметров производства и диапазона их изменения.

3. Определение методики выбора критериев нахождения оптимального и экономически оправданного набора параметров киберфизических систем многономенклатурного мелкосерийного производства и диапазона их изменения.

4. Разработку методики определения оптимального и экономически оправданного набора параметров киберфизических систем многономенклатурного мелкосерийного производства, функционирующего в соответствии с концепцией Индустрии 4.0, и диапазона их изменения.

5. Проведение анализа существующих лабораторных систем обучения и моделирования производственных систем на предмет их усовершенствования для обеспечения проведения научных исследований по моделированию гибких производственных процессов киберфизических систем, функционирующих в рамках концепции Индустрии 4.0.

6. Проведение работ по созданию научно-исследовательской и обучающей лабораторной системы моделирования гибких производственных процессов киберфизических систем, функционирующих в рамках концепции Индустрии 4.0.

7. Разработку методических рекомендаций по проведению научных исследований и обучающих лабораторных работ.

Выполнение этих работ предоставит производственным и научным организациям недостающий инструментарий, обеспечивающий развитие машиностроительных предприятий в концепции Индустрии 4.0, а именно методику определения оптимального и экономически оправданного набора параметров в киберфизических системах многономенклатурного мелкосерийного производства, функционирующего в соответствии с концепцией Индустрии 4.0, и диапазона их изменения, а также научно-исследовательскую обучающую лабораторную систему, позволяющую проводить научные исследования в области Индустрии 4.0 и готовить соответствующих специалистов.

Выбор и использование инструментальных средств проектирования, технологии изготовления и эксплуатации изделий должны вытекать из принятой стратегии их жизненного цикла (ЖЦИ). Оптимизация характеристик изделия достигается при условии определенности связей свойств и рациональном балансе технических, организационных, экономических и пр. требований.

Моделирование процессов позволит определять, контролировать и управлять эффективностью машиностроительных предприятий. Но информация по качеству изделий машиностроения будет не полной, если разрабатываемые модели не будут увязаны на всех этапах – от материаловедения, режимов обработки, изготовления, испытания и поставки готового изделия до его эксплуатации и утилизации. Вся эта информация должна систематизировано войти в систему управления созданием изделия (Рис. 2).

Система управления созданием изделий машиностроения рассматривается как единая интегрированная многоуровневая система, включающая постановку целей, описание подходов к организации работы и обучению сотрудников, организационных и иных механизмов, призванных обеспечить достижение поставленных целей.

Результаты, получаемые в процессе создания техники, должны обеспечить условия для непрерывного технологического развития и инноваций, которые способствуют созданию конкурентного преимущества в технологической стратегии, задают дальнейшие направления в области совершенствования технологий и продуктов. Исследования и разработки являются частью производственной цепочки, благодаря которым создается новая продукция и услуги, совершенствуется производственный и технологический потенциал.

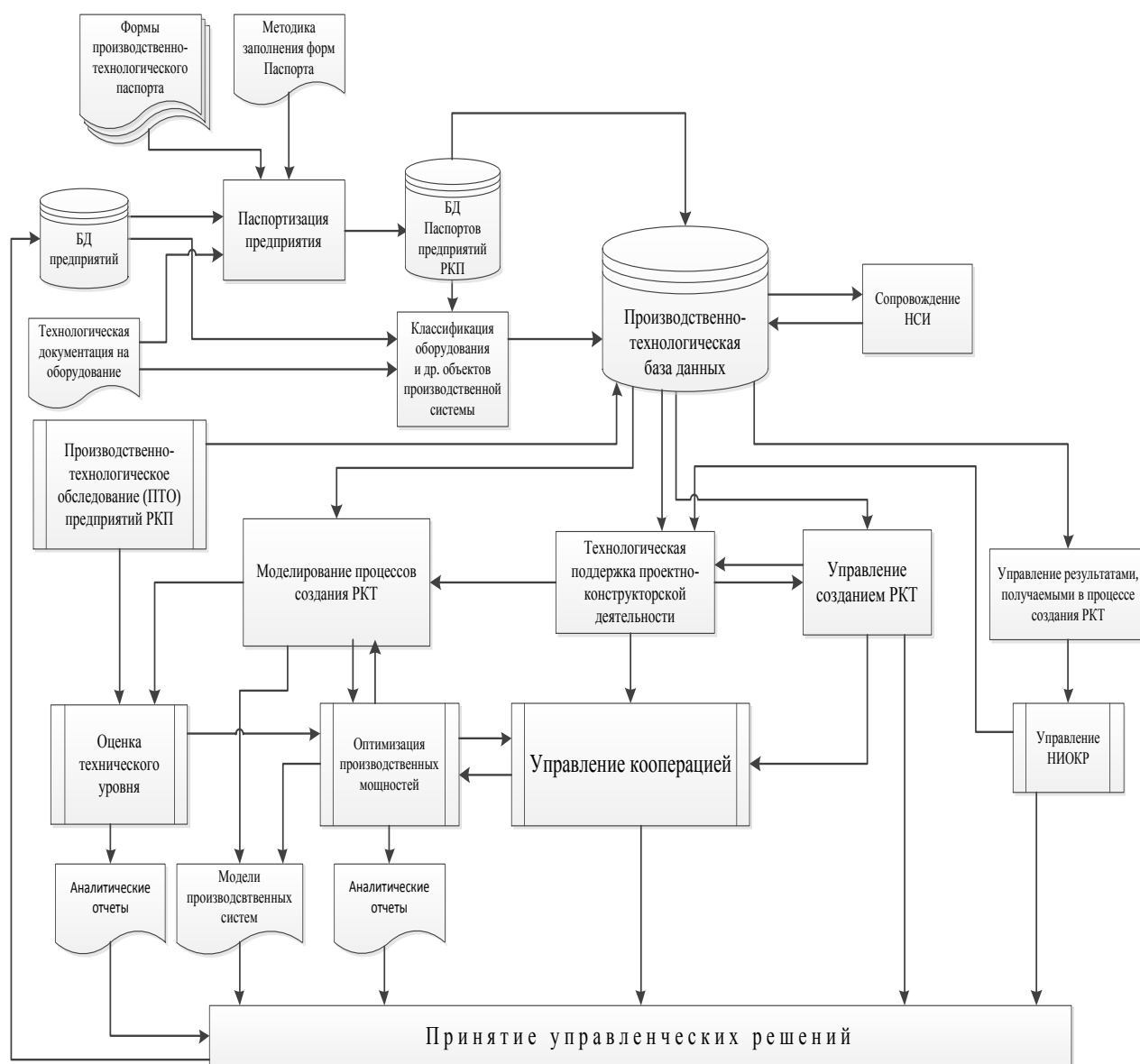


Рис.2. Схема информационно-технологической поддержки управления

Рассматриваются программно-технические средства, необходимые для внедрения технологии информационной поддержки жизненного цикла изделий вендоров, наиболее широко представленные на российском рынке на предприятиях ракетно-космической промышленности и других наукоемких отраслей машиностроения.

На Рис. 3 представлена структурная схема типового рассматриваемого модуля производства РКО.

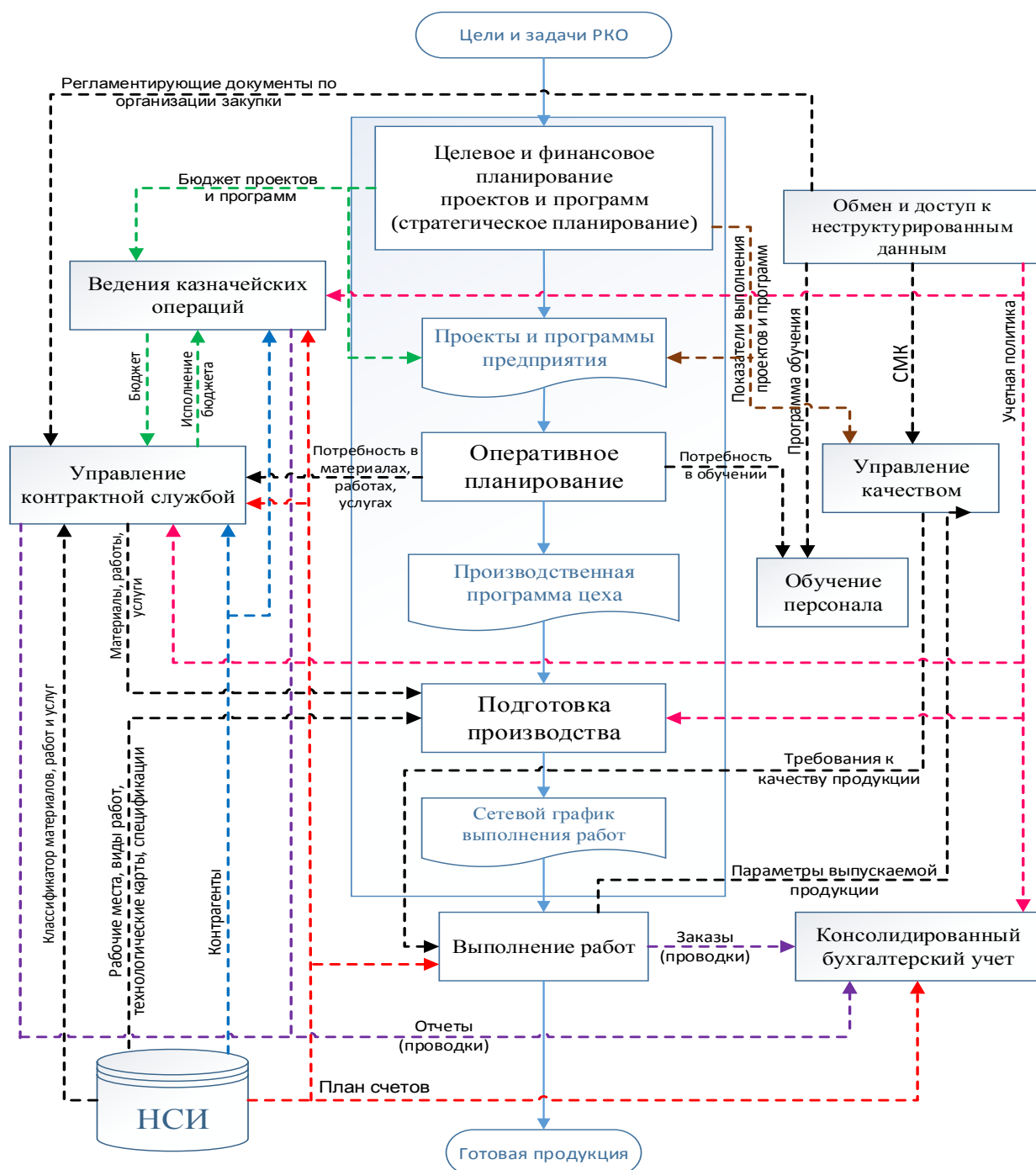


Рис.3. Структурная схема типового рассматриваемого модуля производства

В Главе 3 «Согласование моделей производства изделий» рассмотрены вопросы управления жизненным циклом продукции с позиций предлагаемого уклада организации производственных систем. Обоснованы основные направления совершенствования механизмов управления жизненным циклом продукции машиностроения в процессе изготовления изделий.

В процессе создания высокотехнологичной продукции (ВТП) формируется комплексное решение, основные элементы которого необходимо выстроить по направлениям:

- управление жизненным циклом продукции;
 - автоматизация решения задач проектирования и технологической подготовки производства;
 - ресурсное моделирование процессов обеспечения TSM;
 - внедрение новых технологий материалов;
- реализация методов управления качеством.

Повышение эффективности деятельности закладывается в основу организации производства ВТП и должно быть обеспечено как совершенствованием материально-технической базы, так и системой управления предприятием. В основу построения системы предложен метод проектно-операционного управления (ПОУ), который интегрирует бизнес-процессы на уровне основной деятельности всего предприятия, реализуя расширенный функционал BPM (Business Process Management) систем, включая процедуры оптимизации загрузки предприятия. Решение направлено на унификацию управления, мониторинга и обмена информацией по процессам, функционально связанным с системами PLM, MES и ERP. Схема ПОУ приведена на Рис. 4.

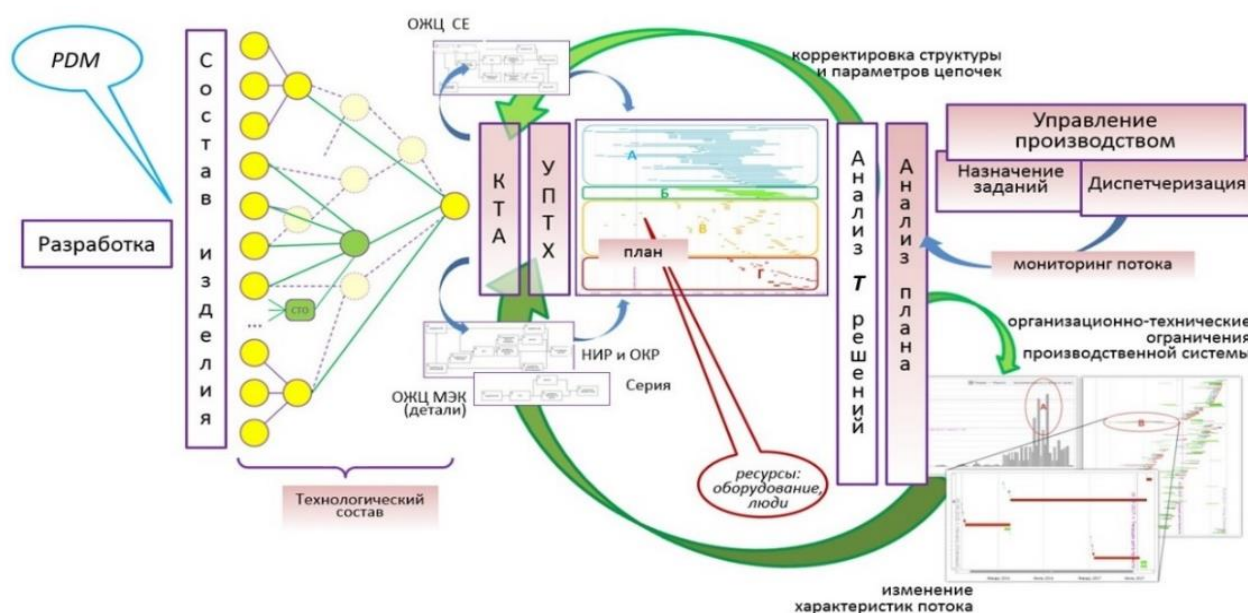


Рис.4. Структурная схема системы проектно-операционного управления предприятием

В представленной схеме системы управления исходная информация, необходимая для упорядочивания работ и балансировки загрузки подразделений, поступает из следующих источников:

1. Конструкторский состав изделия – из PDM (Product Data Management).
2. Схемные решения, описывающие процесс создания элементов изделий.

3. Операционные описания отдельных этапов работ.
4. Описания состава ресурсов подразделений (люди, критическое оборудование), необходимых для реализации основной деятельности.
5. Портфель заказов на НИОКР и выпуск серийной продукции на рассматриваемый горизонт планирования по предприятию.

Методы решения задач на этапах обработки модели и информационные потоки в процессах формирования решений являются сложными и многосвязными, поэтому неизбежным является итерационный характер описания, как процессов, так и непосредственно изделий. Важнейшей задачей является «сохранение» решений, выработанных на ранних стадиях (этапах), в активном состоянии, с целью снижения действий по их актуализации и увеличения трудоемкости и длительности процессов разработки. Поэтому модели изделий и технологических процессов их изготовления должны обладать достаточным количеством связей, как между собой, так и с системами «верхнего» уровня, позволяющими ускорить процессы «отладки» системы ПОУ, и обеспечить возможность мониторинга процессов по этапам жизненного цикла изделий за счет валидации данных.

В модели обеспечивается уникальность сопровождения конструкторского состава каждого из сопровождаемых изделий, что в силу специфики создания изделий ракетно-космической отрасли крайне необходимо из-за большого количества конструкторских и, технологических изменений.

По результатам создания информационно-алгоритмической среды системы проектно-операционного управления (ПОУ), управление жизненным циклом изделий предложено изложить с позиций разработчиков PLM-систем, которое основано на принципе дуализма «физическое-информационное», отражает желание достичь взаимно однозначного соответствия между физическим и информационным пространством. В дополнение к такой постановке задачи, может быть предложено решение по управлению сквозными процессами создания (разработки и изготовления) новых и существующих изделий.

При разработке методов планирования и управления, реализованных в методологии ПОУ преследовались цели:

- сокращения сроков создания (разработки и изготовления) изделий;
- минимизации потерь при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), а также серийного производства;
- балансировки ресурсов в процессах создания технических систем;
- унификации методов поддержки изделий в эксплуатации;
- достижения интероперабельности в управлении процессами ЖЦ и сокращения затрат на эксплуатацию инструментальных средств ПОУ.

Объединение и унификация управляющих компонент PLM и ERP комплексов позволяет сократить затраты на построение и поддержку IT-инфраструктуры. Сокращение затрат на эксплуатацию в системе проектно-производственного сопровождения (предложено А.В. Цырковым) достигается также за счет автоматизации процессов подготовки данных для решения задач управления на основе использования проектно-производственных баз знаний. Система может быть использована как надстройка над существующим функционалом PLM и ERP на предприятиях, не требуя отказа от сложившихся бизнес-процессов и инструментальных средств (программ) в деятельности инженерных и планово-экономических служб. Предлагаемая разработка расширяет возможности предприятия по манёвренности в принятии управленческих решений на всех уровнях управления. Созданная система станет проводником типовых решений по цифровизации процессов на предприятии, создании цифровых двойников производств (процессов). Система может быть отнесена к классу систем управления бизнес-процессами (Business Process Management, BPM), но, в дополнение к существующим на рынке BPM-решениям, обладает расширенным функционалом в области подготовки схмотехнических решений по процессам конструкторской, технологической, производственной и логистической деятельности.

В Главе 4 «Исследование критериев работоспособности материалов и эффективности их обработки» отмечено, что необходимой и достаточно сложной задачей является согласование параметров надежности технологической системы и системы обеспечения качества изготовления продукции. Цифровые двойники изделия и производства в этом случае, безусловно, кроме единства языка, должны обладать совокупностью свойств, позволяющих средствам диагностики, контроля и управления технологическими процессами обеспечить возможность управляющего воздействия в реальном масштабе времени, либо с некоторым упреждением.

Изменение эффективности в процессе функционирования объекта определяется систематическими и случайными событиями и факторами. К систематическим относят факторы, приводящие к стабильности по некоторой закономерности, которую можно представить в виде математической модели. Такие изменения вызваны, в первую очередь, протекающими с некоторой интенсивностью процессами деградации материалов деталей (изнашивание, коррозия и т.п.). В результате происходит понижение точности технологических операций, снижение производительности машин, снижение точности средств измерения и контроля и т.п. Верификация математических моделей статистического описания процесса накопления повреждений, обуславливающего разрушение материалов деталей, подтверждает адекватность кинетического подхода, описывающего этот процесс в форме ассоциации точечных, линейных, поверхностных и объемных дефектов, что позволяет получать

функции распределения с высокой достоверностью согласующиеся с эмпирическими распределениями Вейбулла и Рэлея. Предложена кинетическая модель, сформулированная относительно скорости топохимической реакции. Изменение во времени распределения зародышей и активно растущих ядер схватывания на поверхности и в объеме материалов представлено в виде системы дифференциальных уравнений кинетики:

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_0) \exp\{-A_0 k_y^2 t^2 (1 - \exp\{-k_x t\})\}, \quad (1)$$

где A_0 – поверхностная концентрация зародышей цепи дислокаций;

$\alpha = \frac{s_y}{s_0}$ – степень превращения, как доля покрытия поверхности пятен контакта растущими ядрами;

$x = x_0 \exp\{-k_x t\}$ – поверхностная концентрация зародышей;

$y = x_0 (1 - \exp\{-k_x t\})$ – соответственно, ядер.

Приведены результаты исследования феноменологии топохимической кинетики и кинетического подхода при изучении связи свойств материалов. Показано, что в топохимической кинетике априори принимаются некоторые положения относительно законов образования ядер и законов их роста. Затем полученные закономерности сравниваются с экспериментальными данными, согласование с которыми принимается в качестве подтверждения тех положений, которые были сформулированы при построении математической модели кинетики.

Показано, что одной из важных проблем, которую необходимо обсуждать с целью исследования процессов поведения материалов заключается в представлении зависимости скорости химических реакций на поверхности взаимодействующих материалов от температуры.

Отмечается, что для константы скорости мономолекулярной реакции было предложено несколько уравнений, основное из которых, уравнение Аррениуса

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right); \text{ или в классической теории: } k = \nu \exp\left(-\frac{E^*}{RT}\right). \text{ При обсуждении}$$

уравнений отмечается, что в классической теории фактор частоты ν вычисляется из спектроскопических данных и имеет порядок $10^{12} - 10^{14} \text{ c}^{-1}$. Частотный фактор не зависит от температуры, так что величина E^* , которая представляет собой разность энергий активированной частицы и нормальной молекулы (обе в своих самых низших энергетических состояниях), может быть идентифицирована с экспериментальной энергией активации.

В квантовомеханической модели вводится энтропия активации, что позволяет учитывать структурные изменения, но она связана с переходным комплексом, свойства которого не могут быть установлены независимо от кинетических данных. Выход из этого сводится к экспериментальному исследованию частотных

факторов, которые заметно отличаются по порядку величин от обычных значений (10^{13} с^{-1}), и попытаться объяснить отклонения с помощью гипотетической структуры активированного комплекса. Таким путем могут быть получены дополнительные данные, например, о влиянии третьих тел на ход реакции.

Современная техника разработки математических моделей, а также методы математического моделирования и вычислительного эксперимента, позволяют в формализованном виде представить разные по уровню детальности описания характеристик материалов, технологических процессов производства и процессов изнашивания материалов при эксплуатации.

Решение многих проблем достигается интерпретацией экспериментальных результатов, целью которой является предоставление разработчикам возможности анализа особенностей поведения материалов при различных условиях нагружения и взаимодействия. Существенную помощь в этом оказывает возможность математического моделирования обратных задач реконструкции по статистике отказов хода процесса накопления повреждений с детализацией механизмов.

В рамках обратных задач в соответствии с кинетическим квазивейбулловским распределением обработаны данные испытаний при различных температурах растягивающей пульсирующей нагрузкой образцов стали пруткового проката, данные испытаний резца на износ, надрезанных образцов листовой стали на малоцикловую усталость, статистические данные роста длины макротрещины; обработаны данные качественно соответствующие кинетическому квазиэрлеевскому распределению: испытаний вала на изгиб при вращении, шариков подшипников качения; статистические данные для испытаний, в которых явно проявлялась неоднородность выборки образцов.

Результаты анализа данных для растяжения, знакопеременного изгиба, роста магистральной макротрещины под статической нагрузкой показали, что они хорошо аппроксимируются квазивейбулловским распределением. Это в рамках кинетической модели соответствует большому вкладу в накопление повреждений двумерных перекрывающихся микротрещин, но на заключительной стадии процесса накопления всех видов повреждений разрушение, соответствующее в рамках принятой кинетической концепции нарушению сплошности материала, происходит в основном за счет формирования структуры трехмерных перекрывающихся микропор (микротрещин).

Экспериментальные данные испытаний на трение хорошо аппроксимируются квазивейбулловским распределением, однако в отличие от предыдущих, преобладающая роль в разрушении определяется двумерными перекрывающимися микротрещинами. Данный сценарий адекватно иллюстрирует истинный механизм разрушения, так как при взаимном перемещении поверхностей трения присутствуют значительные касательные напряжения.

Работоспособность кинетической модели разрушения была проверена аппроксимацией статистических данных износа классического композиционного материала. Хорошей аппроксимации удастся достичь тогда, когда в модель закладывается гипотетический механизм, предполагающий образование, рост и перекрывание независимо одномерных и двумерных трещин. В этом случае функция распределения накопления повреждений и функция надежности:

$$F(t) = 1 - [k_5 F_1(t) + (1 - k_5) F_2(t)], \quad (2)$$

$$1 - F(t) = \exp\{-k_2 t^2 [1 - \exp\{-k_1 t\}]\}; \quad (3)$$

где k_5 – весовые коэффициенты, отражающие вклад в общий процесс накопления повреждений по механизмам образования, роста и перекрывания одномерных и двумерных трещин.

Иллюстрации использования кинетического подхода показывают, что у обратных задач кинетики накопления повреждений в материалах, приводящих к разрушению из-за нарушения сплошности, есть определенный потенциал для решения задач разработки новых материалов, а также для повышения надежности изделий, характеризующихся постепенными отказами.

Одной из наиболее сложных задач при создании динамико-стохастической модели исследования состояния материалов деталей является определение «индикатора», т.е. характеристики, свойства, определяющего текущее состояние и позволяющего по его изменению прогнозировать поведение материалов в перспективе.

Автором, на основании зафиксированной линейной связи между интенсивностями изнашивания J_h и выделения водорода $C_{H_2}^{\Gamma.\Phi}$, предложено использование параметра $C_{H_2}^{\Gamma.\Phi}$ в качестве маркера процессов происходящих с материалами, а содержание (концентрацию) в них диффузионноактивного водорода в качестве «маркера» состояния материала на стадиях жизненного цикла изделий.

Кроме того, обосновано, что каждая выбранная смазочная среда характеризуется определенным количеством выделившегося водорода, приходящегося на единицу износа материалов деталей. Зависимости между интенсивностями изнашивания и выделения водорода для исследуемых сред определяются линейным законом, а соотношение интенсивностей характеризует противоизносные свойства этих сред. Это позволило подобрать композиции для смазочно-охлаждающие технологические средства, применяемых для различных условий обработки материалов.

В Главе 5 «Исследование эффективности технологических процессов и обеспечение работоспособности систем производства» проведены исследования работоспособности технологических и производственных систем машиностроения по показателям качества и эффективности использования ресурсов.

При разработке моделей сложных изделий с высокой степенью проработки в большинстве случаев необходимо решение динамических задач, с учетом факторов, приводящих к изменению размерных цепей звеньев в процессе функционирования. К ним относятся тепловые воздействия, изнашивание, деформации под действием приложенных сил и т.п. Решение статической задачи направлено, в основном, на обеспечение собираемости, а динамической – на назначение допусков, обеспечивающих как собираемость при изготовлении, так и работоспособность в течение установленных в проекте наработок. Рассмотрены некоторые типовые модели, возможные при решении данных задач, например, когда под влиянием деформаций или износа за некоторый период эксплуатации t_y (до ремонта, замены и т.п.) детали или поверхности, являющиеся звеньями размерной цепи, изменяют свою величину, причем эта величина является случайной. Наиболее общий случай представлен на Рис. 5.

$$\begin{aligned} m_i(t) &= \bar{m}_{i0} + \Delta m_i t^{\beta_{1i}}; \\ \sigma_i(t) &= \sigma_{i0} + \Delta \sigma_{i0} t^{\beta_{2i}} \end{aligned} \quad (4)$$

где: $\bar{m}_0(t), \sigma_x(t_0)$ – значения параметров замыкающего звена в начальный момент времени t_0 ;

$\Delta m, \Delta \sigma$ – неслучайные величины скорости изменения соответствующих параметров.

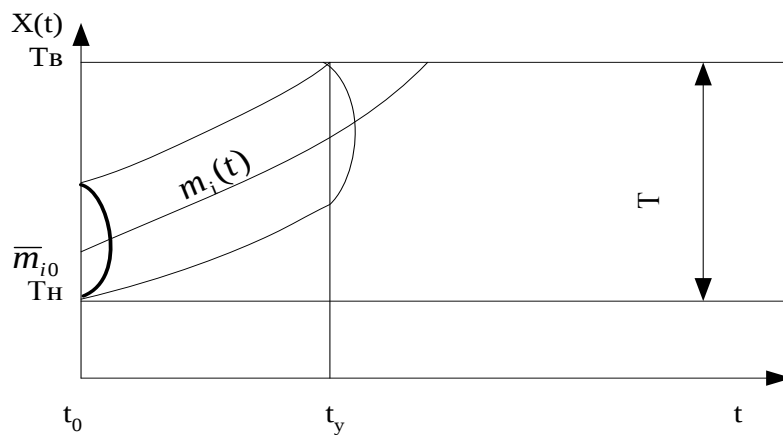


Рис.5. Схематическое изображение нелинейного изменения параметров составляющих их звеньев

После преобразований, получено:

$$\begin{aligned}
 m_x(t_0) &= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i m_{i0} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right); \\
 m_x(t_y) &= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i (\bar{m}_{i0} + \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}}) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i + \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}} \right) = \\
 &= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) + \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}}; \\
 \sigma_x(t_0) &= \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \sigma_{i0}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right)^2}; \\
 \sigma_x(t_y) &= \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \sigma_i^2(t)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 [\sigma_{i0} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}}]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}} \right]^2}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Задаваясь риском α_1 и α_2 , находим:

$$\begin{aligned}
 T_H &= m_x(t_0) - x_{\alpha_1} \sigma_x(t_0) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) - x_{\alpha_1} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} \right)^2} \\
 T_B &= m_x(t_y) + x_{\alpha_2} \sigma_x(t_y) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) + \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}} + x_{\alpha_2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}} \right]^2}
 \end{aligned}$$

Отсюда:

$$T = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}} + x_{\alpha_2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}} \right]^2} + x_{\alpha_1} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right)^2} \tag{6}$$

$$\Delta \omega_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) + \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}} + x_{\alpha_2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}} \right]^2} + x_{\alpha_1} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right)^2} \right\} \tag{7}$$

Выражения (6) и (7) позволяют определить поле рассеивания (принимаемое за допуск) и координату середины поля рассеивания (поля допуска) замыкающего звена.

На практике наибольшую сложность в решении рассмотренных задач представляет получение значений $\Delta m, \Delta \sigma$, поскольку условия применения изделий по назначению могут существенно отличаться. В большей степени это относится к узлам трения, интенсивность изнашивания деталей которых зависит от множества взаимозависимых факторов. Поэтому при разработке цифровых моделей изделий необходим учет моделей изнашивания составляющих изделие звеньев применительно к условиям функционирования. Кроме того, поскольку параметры работоспособности материалов, из которых изготавливаются детали закладываются на стадии их производства, необходимо учитывать и модели технологического обеспечения качества обработки материалов.

Предлагается для получения величины скорости изменения параметров изнашивания деталей использовать эмпирические зависимости вида:

$$\frac{J_h}{C_{H_2}} = a + bP + ch \quad (8)$$

где J_h – интенсивность изнашивания материалов; C_{H_2} – интенсивность образования водорода при их взаимодействии; P – нормальное усилие, (параметр, характеризующий нагружение); h – характеристика смазочной среды; a, b, c – константы для данных сочетаний материалов.

В теории потенциальной эффективности сложных систем выражение в виде бинарного отношения: $S \subset U \times V$ аналогично представлению системы в виде (U, V) - обмена, где U – ресурсы, затрачиваемые на обеспечение функционирования системы (затраты на материалы, обслуживание и ремонт оборудования и т.п.) в соответствии с установленными требованиями; V – ресурсы, получаемые в результате функционирования системы (количество произведенной продукции, себестоимость, прибыль) на ее выходе. Примем за V_n – объем произведенной продукции, характеризующий работоспособное состояние ТСМ. В зависимости от решаемой задачи V_n может, представлять ритм выпуска, вероятность выпуска в нормативное время, ритм производства и т.п. После преобразований, с учетом начальных состояний и того, что декомпозицией элементы ТСМ сведены к последовательной схеме независимых компонент, вероятность исполнения задания:

$$P_k(t) = \Im \left\{ \begin{array}{l} (\forall i)(i = \bar{1}, \bar{m}) \& (\forall j)(j = \bar{1}, \bar{n})(x_{ij} y_{ij}(t) = 1) \\ C(t) = \sum_{i,j} C_{i,j}(t) \leq C_n \\ q(t) = (\alpha_t + \beta_t) \leq q_n \\ t_\phi \leq t_n \end{array} \right.$$

где: $C_{ij,t}$ – трудоемкость контроля j -ого параметра единицы продукции i -ым средством; $C(t)$ – трудоемкость контроля единицы продукции; C_n – нормативная величина трудоемкости; $q(t) = (\alpha_t + \beta_t)$ – достоверность измерения в момент t ; α_t, β_t – ошибки 1-го и 2-го рода; q_n – нормативное значение надежности измерения; $t_\phi(t)$ и t_n – продолжительность соответственно фактического и нормативного контроля единицы или партии изделий.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{если } j - \text{ый нормированный параметр контролируется преду-} \\ \quad \text{смотренным в технической документации } i - \text{тым методом,} \\ \quad \text{или } i - \text{тым техническим средством;} \\ 0 - \text{если } j - \text{ый параметр вообще не контролируется, или контроли-} \\ \quad \text{руется техническим средством не соответствующим} \\ \quad \text{техническим требованиям} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{если } i - \text{ое средство контроля } j - \text{го параметра работоспособно} \\ \quad \text{в момент времени } t; \\ 0 - \text{если } i - \text{ое средство контроля } j - \text{го параметра неработоспособно} \\ \quad \text{в момент времени } t \end{cases}$$

Предложены модели, характерные для практических случаев определения вероятности выполнения задания производственной системой по величинам распределений входных и выходных ресурсов.

В Главе 6 «Исследование и оценка эффективности производственных процессов» рассмотрены методы математического программирования, применяемые для решения задач оптимизации параметров эффективности технологических и производственных систем.

Неотъемлемой частью процесса производства и эксплуатации различного вида изделий является контроль их технического состояния, в результате которого устанавливается соответствие объекта контроля предъявляемым требованиям. Ввиду несовершенства измерительных приборов и средств контроля, а также вследствие стохастической природы параметров контролируемых изделий в процессе контроля возникают ошибки, заключающиеся в том, что изделия, находящиеся в одном состоянии, по результатам контроля признаются находящимися в другом состоянии. Эти ошибки могут приводить к различным нежелательным последствиям, в том числе и к невыполнению задания контролируемым объектом, увеличению производственных и эксплуатационных расходов и т.д. Поэтому одной из основных характеристик средств контроля наряду с быстродействием (производительностью), надежностью, стоимостью, габаритно-массовыми характеристиками является достоверность контроля, т.е. показатель степени объективности отображения результатами контроля действительного состояния контролируемого изделия. От достоверности контроля, т.е. меры качества процесса контроля, зависит не только эффективность процесса контроля, но и эффективность применения контролируемых изделий.

Обоснована необходимость применения и оптимизации мажоритарного алгоритма контроля параметров. Мажоритарный алгоритм может применяться как при контроле отдельного параметра, так и при контроле любой их совокупности. В некоторых случаях при реализации мажоритарного алгоритма из тех или иных соображений контрольный допуск не назначается, и результаты изменения сравниваются с гарантийным допуском. При этом задача оптимизации по критерию минимума среднего риска существенно упрощается и состоит в отыскании такого значения, при котором достигается минимальный риск (в частном случае максимизируется абсолютная достоверность контроля).

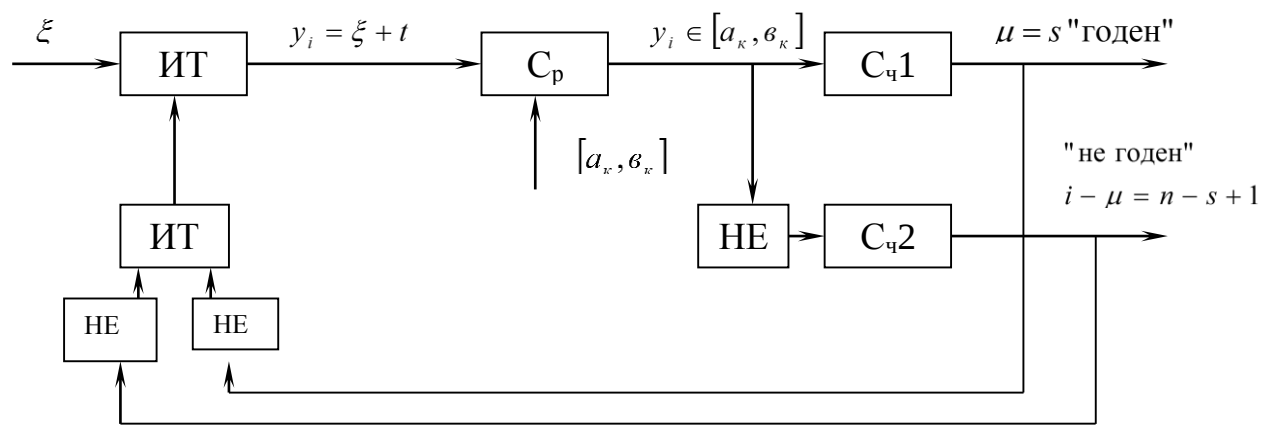


Рис.6. Блок-схема устройства для реализации последовательного мажоритарного алгоритма контроля. ИТ – измерительный тракт, C_p – устройство сравнения; $C_{ч1}$, $C_{ч2}$ – счетчики; И – схема совпадения; НЕ – инвертор

Как показывают исследования, зависимость вероятностей ложного и необнаруженного отказов от параметров оптимизации, такова, что максимум достоверности результата «годен» достигается при очень больших значениях. Поэтому при оптимизации мажоритарного алгоритма контроля необходимо задавать ограничения на вероятность ложного отказа. Блок-схема устройства для реализации последовательного мажоритарного алгоритма контроля приведена на Рис. 6. После каждого измерения устройство сравнения выдает сигнал «I» если $y_c \in [a_k, b_k]$, и сигнал «O» если $y_c \notin [a_k, b_k]$. Сигналы поступают на счетчики $C_{ч1}$ и $C_{ч2}$ емкостью $S-1$ и $\Pi-S$ соответственно. При получении на выходе устройства S сигналов «I» либо $\Pi-S+1$ сигналов «O» переполняются соответственно $C_{ч1}$ или $C_{ч2}$, выдавая сигналы «годен» или «не годен».

В автоматических системах контроля последовательный мажоритарный алгоритм легко реализуется программированием. Как и для мажоритарного алгоритма, отыскание оптимального решающего правила состоит в отыскании таких значений $S, [a_k, b_k]$, при которых оптимизируется выбранный показатель достоверности.

Трудности формирования практически приемлемых решений не удастся преодолеть с помощью только вероятностных моделей управления, больше всего потому, что по чисто психологическим причинам опыт специалистов, их интуицию и предпочтения довольно трудно превратить в стандартные вероятностные построения. Предложено использование и приведены примеры оценки эффективности управленческих решений методом анализа иерархий. Показано, что метод позволяет проводить оценку выбираемой технологии изготовления изделий.

В Главе 7 «Внедрение результатов работы» изложены материалы по использованию результатов проделанной работы.

Представлены результаты комплексного проекта «Разработка информационно-программных средств автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства», реализованного по инициативе ФГУП НПО «Техномаш» и ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА». На площадях предприятия создан экспериментальный образец комплекса управления производством, включающий информационно-программные средства из следующих основных систем:

- система подготовки и контроля управляющих программ;
- система прямого управления оборудованием с ЧПУ;
- система архивации управляющих программ;
- система диспетчеризации производства и выдачи производственных заданий;
- система мониторинга и ресурсного обеспечения выполнения производственного задания и производственного плана;
- система мониторинга работы автоматизированного технологического оборудования цифрового машиностроительного производства;
- системы обеспечения визуализации информации о протекании технологических процессов, состоянии оборудования и параметрах готовой продукции;
- системы администрирования информационной безопасности цифрового машиностроительного производства;
- модулей сопряжения с системами управления предприятием (ERP) и жизненным циклом изделия (PLM);
- АРМ оператора, диспетчера, руководителя и администратора.

На Рис.7 представлена структурная схема взаимодействия подразделений предприятия с применением разработанных аппаратно-программных средств. В настоящее время ведутся работы по внедрению Комплекса на предприятиях ГК «Роскосмос».

Часть результатов диссертационного исследования получена при реализации проекта получившего финансирование из средств Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFZ-2022-0002).

По результатам теоретических и экспериментальных работ в области разрушения материалов автором в составе коллектива опубликованы и изданы два учебника с грифом УМО высшего образования, которые используются в учебном процессе как РТУ МИРЭА, так и других вузов

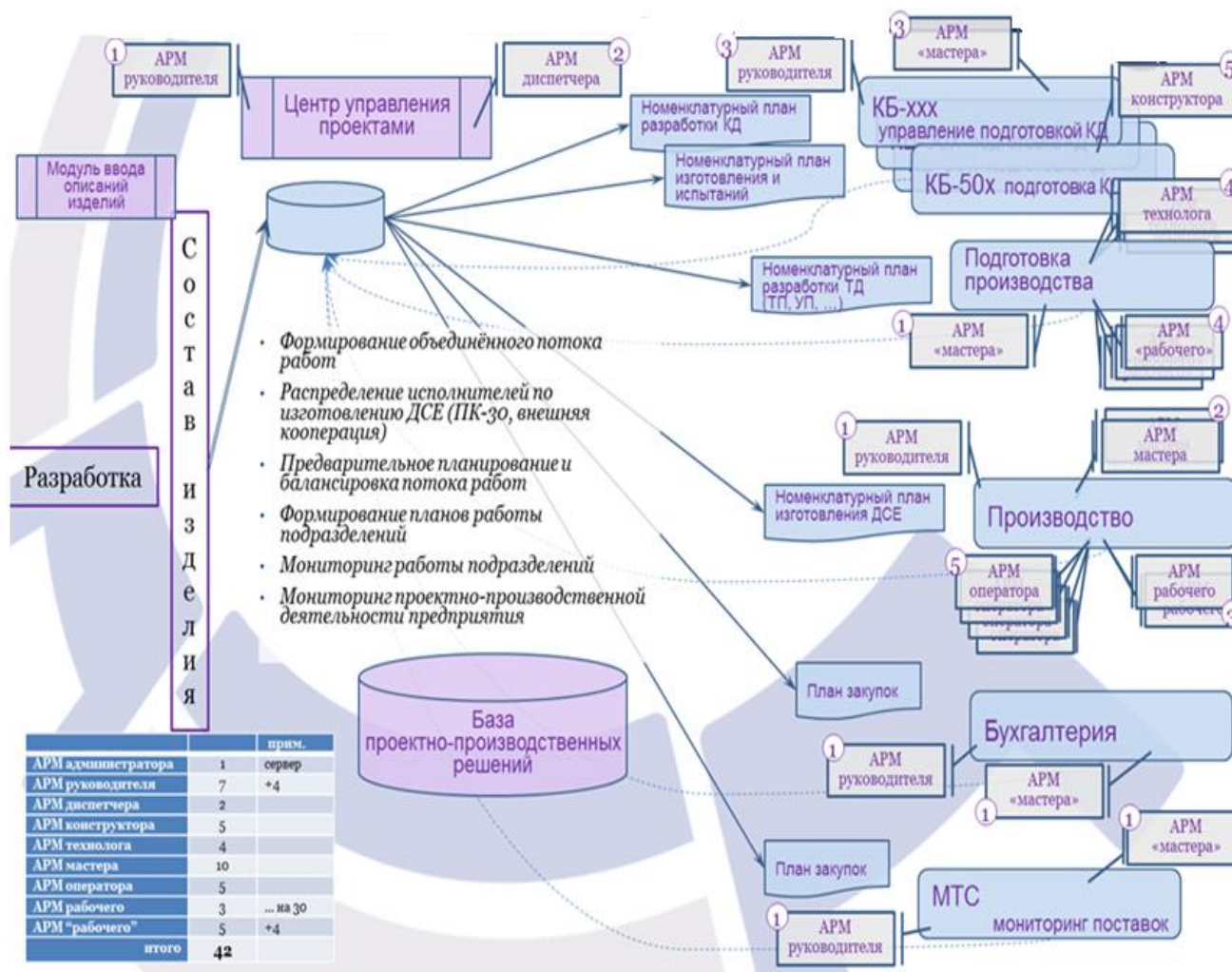


Рис.7. Структурная схема взаимодействия подразделений предприятия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Реализация цели и задач, сформулированных в рамках диссертационного исследования, позволила получить новые научно-обоснованные результаты и апробировать их для повышения эффективности производства машиностроительной продукции.

1. На основании проведенного анализа методов технологического, энерго- и экологического аудита и исследования ресурсоэффективности определены группы факторов, необходимых для построения иерархии принятия решений по эффективности мероприятий, направленных на построение цифровых производств и процессов производства продукции.

2. Исследованы взаимосвязи процессов организации производства и технологии изготовления изделий, определены направления и необходимые требования к алгоритмам создания и согласования формата и наполнения данными цифровых двойников изделий машиностроения. Определен комплекс требований, обеспечивающих интероперабельность цифровых двойников изделий, технологических и производственных систем.

3. Исследование феноменологии топохимической кинетики с применением кинетического подхода при изучении связи свойств обрабатываемых материалов изделий машиностроения является основой разработки обоснованных механизмов управления технологическими процессами, в том числе на основе решения обратных задач кинетики и предложенных критериев контроля состояния материалов изделий на различных стадиях их жизненного цикла.

4. Предложено топологическое описание и разработаны модели исследования работоспособности и эффективности технологических процессов производства изделий машиностроения, обоснованы методы формирования научно-методической, нормативно-правовой и информационной базы повышения эффективности функционирования технологических и производственных систем.

5. Разработаны модели исследования эффективности производственной технологии по комплексным показателям, методы оптимизации параметров и повышения инструментальной достоверности контроля технологических процессов, определяющих возможность повышения производительности обработки изделий и технологического обеспечения качества их изготовления.

6. Представлены методики согласования принятия решений по организации производства изделий на основании оценки эффективности технологических процессов изготовления продукции методом анализа иерархий.

7. Обосновано, что предложенные модели цифровых двойников обладают высокой степенью живучести, могут функционировать на протяжении всего жизненного цикла и использовать аспекты виртуальной среды (мультифизические возможности, прототипирование, внешние источники данных и т. д.). вычислительные методы (оптимизация, предиктивное и феноменологическое прогнозирование и т. д.). а также элементы физической природы (динамика показателей, параметры производительности и качества, стоимость и т. д.) для совершенствования элементов и всей системы организации производства (конструкции, поведения, технологичности и т. д.).

8. Разработан и внедрен комплекс информационно-программных средств, обеспечивающих автоматизацию управления высокотехнологичным оборудованием с числовым программным управлением, включая системы мониторинга работы оборудования, участков оборудования с ЧПУ и другого автоматизированного техно-

логического оборудования цифрового машиностроительного производства, систему имитационного моделирования и визуализации работы цифрового оборудования. Созданный комплекс позволяет обнаружить аномалии в производственных процессах и достигать различных функциональных целей: управление в режиме реального времени, получение аналитики в автономном режиме, проверка работоспособности, предиктивное обслуживание, оптимизация управления производственным процессом, адаптация режимов и параметров обработки материалов, анализ больших данных, машинное обучение и т. д.

Рекомендации. Применение разработанной методологии не должно ограничиваться принятыми в работе критериями оценки эффективности принятых решений. Безусловно, в различных отраслях промышленности имеются особенности, определяющие характер связи между элементами иерархии принятия решений на всех ее уровнях, например, в требованиях к используемым материалам изделий, уровню качества изготовленной продукции и методам ее контроля, масштабам производства и т.д. Необходимо уточнение требований к цифровым двойникам изделий, технологических и производственных систем конкретных отраслевых машиностроительных производств.

Перспективы дальнейшего развития темы состоят в разработке цифровых двойников процессов всех технологических переделов машиностроительных производств, согласовании и оптимизации технологий изготовления изделий, с учетом условий их функционирования, вариантов выбора материалов и оборудования, других условий, определяющих эффективность организации производства. Полученные результаты дадут возможность оптимального использования материалов, увеличения сроков службы изделий и надежности технологических систем производств.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Монографии:

1. Исследование и обеспечение применения эффективных технологий / Рагуткин А.В. [и др.]. М.: Издательство «Эко-Пресс», 2020. 232 с. (13,5 п.л. / 3,3 п.л.).
2. О роли водорода в процессах разрушения материалов / А.В. Рагуткин [и др.]. М.: Издательство «Эко-Пресс», 2020. 208 с. (12,1 п.л. / 2,4 п.л.).
3. Рагуткин А.В., Сидоров М.И., Юрцев Е.С. Модели организации цифрового машиностроительного производства. М.: Издательство «Эко-Пресс», 2021. 289 с. (16,8 п.л. / 5,6 п.л.).
4. Трибология автоколебаний / А.В. Рагуткин [и др.]. М.: Издательство «Эко-Пресс», 2022. 270 с. (15,7 п.л. / 3,2 п.л.).
5. Электромагнитная совместимость методики и алгоритмы математического моделирования взаимодействия объектов. / А.В. Рагуткин [и др.]. М.: Научно-техническое издательство «Горячая линия-Телеком», 2022. 116 с. (7,03 п.л. / 1,75 п.л.).

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

6. Некоторые аспекты обобщенного энергетического подхода к процессам разрушения материалов / А.В. Рагуткин [и др.]. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2023. № 4. С. 9-15. (0,42 п.л. / 0,1 п.л.).
7. Анализ применимости термофлуктуационных моделей зарождения трещин // А.В. Рагуткин [и др.]. Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2023. № 3. С. 37-40. (0,2 п.л. / 0,05 п.л.).
8. Creation of Hydrophobic Functional Surfaces of Structural Materials on the Basis of Laser Ablation (Overview) / A. V. Ragutkin [and ath.]. Thermal Engineering. 2022. Vol. 69. No. 6. p. 429-449. (1,27 п.л. / 0,25 п.л.).
9. Температурные зависимости скорости реакции в трибохимической кинетике / А.В. Рагуткин [и др.]. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 6. С. 37-45. (0,54 п.л. / 0,1 п.л.).
10. Топохимические реакции в кинетике разрушения материалов / А.В. Рагуткин [и др.]. Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 11. С. 30-39. (0,6 п.л. / 0,1 п.л.). DOI 10.31044/1684-2561-2022-0-11-30-39.
11. Assessing the Efficiency of Technological Systems / A. V. Ragutkin [and ath.]. Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41. No 5. P. 428-433. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).
12. Formation technology of effective electrode materials based porous silicon with platinum metal nanoparticles for autonomous energy systems. / A. V. Ragutkin [and ath.]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Applied Composite Materials, MEACM 2019. 2020. p. 012001. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.).
13. Nafion-carbon containing nanocomposite materials with high catalytic activity for portable energy sources / A. V. Ragutkin [and ath.]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Applied Composite Materials, MEACM 2019. 2020. p. 012006. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.).
14. The features of bimetallic pt-ru nanoparticles formation on the nafion membrane for electrodes of chemical power sources / A. V. Ragutkin [and ath.]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Applied Composite Materials, MEACM 2019. 2020. p. 012007. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.).
15. Kinetics of damage accumulation and failure in frictional contact. / A. V. Ragutkin [and ath.]. Russian Engineering Research. 2020. Т. 40. № 4. p. 297-302. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).
16. Phenomenology of topochemical kinetics and potentialities for the development of kinetic approach to the theory of friction / A. V. Ragutkin [and ath.]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Т. 48. № 5. p. 416-420. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.). Q2

17. Рагуткин А.В., Сидоров М.И., Ставровский М.Е. Некоторые аспекты эффективности нанесения антифрикционных покрытий технологиями финишной антифрикционной безабразивной обработки // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 239-244. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.).
18. Yashtulov N.A., Lebedeva M.V., Ragutkin A.V. Development of advanced electrode materials on porous silicom for micropower formic fcidoxygen fuel cells // 2019. №10. P.705-710. (0,4 п.л. / 0,12 п.л.).
19. Lebedeva M.V., Ragutkin A.V., Yashtulov N.A. The polymer materials as effective matrix-supports in autonomous energy sources International Journal of Applied Engineering Research. 2019. Т. 14. № 21. P. 4014-4018. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.). Q2
20. Coulunometry of oxygen, hydrogen and moisture molecular impurities in inert gases / A. V. Ragutkin [and ath.]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 6. Сер. "6th International Conference: Modern Technologies for Non-Destructive Testing" 2018. P. 012027. (0,48 п.л. / 0,1 п.л.)
21. Composite material for optical oxygen sensor / A. V. Ragutkin [and ath.]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 6. Сер. "6th International Conference: Modern Technologies for Non-Destructive Testing" 2018. С. 012031. (0,3 п.л. / 0,06 п.л.). Q2
22. Development of effective functional materials based on polymer and carbon support with pt-pd nanoparticles for renewable energy sources / A. V. Ragutkin [and ath.]. International Journal of Applied Engineering Research. 2018. Т. 13. № 24. p. 16770-16773. (0,25 п.л. / 0,06 п.л.)
23. Electrode materials based on porous silicon with platinum nanoparticles for chemical current sources / A. V. Ragutkin [and ath.]. Russian Journal of Applied Chemistry. 2018. Т. 91. № 2. p. 280-285. (0,36 п.л. / 0,1 п.л.) Q3
24. The electrode materials based on carbon nanotubes and polymer matrix modified with platinum catalysts for chemical power sources / A. V. Ragutkin [and ath.]. International Journal of Applied Engineering Research. 2018. Т. 13. № 24. С. 16774-16777. (0,24 п.л. / 0,06 п.л.).
25. Development of digital machine-building production in the industry 4.0 concept / A. V. Ragutkin [and ath.]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Т. 47. № 4. p. 380-385. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).
26. The development of high-effective composites based porous silicom with platinum nanoparticles for autonomous energy sources / A. V. Ragutkin [and ath.]. International jornal of industrial electronics and electrical engineering, 2018. №6. p.4-7. (0,24 п.л. / 0,06 п.л.).

27. Composite material for optical oxygen sensor / A. V. Ragutkin [and ath.]. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 6. Сер. "6th International Conference: Modern Technologies for Non-Destructive Testing" 2018. p. 012031. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

28. The catalytic activity of bimetallic pt-pd polymer nanocomposites in formic acid oxidation / A. V. Ragutkin [and ath.]. Russian Chemical Bulletin. 2017. Т. 66. № 3. С. 474-478. (0,3 п.л. / 0,01 п.л.).

29. Функциональные характеристики электродов на основе пористого кремния для микромощных источников тока / А.В. Рагуткин [и др.]. Цветные металлы. 2017. № 5. С. 58-63. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

30. Composite material for optical oxygen sensor. Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference: Materials Science and Engineering, 6th International Conference: Modern Technologies for Non-Destructive Testing 9–14 October 2017, Tomsk, Russian Federation. 2017. № 289. P. 012031. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

Публикации в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ

31. Методы повышения достоверности контроля работоспособности цифровых систем / А.В. Рагуткин и [др.]. Технология машиностроения. 2022. № 6. С. 36-42. (0,42 п.л. / 0,1 п.л.).

32. Рагуткин А. В. Динамические задачи в моделях работоспособности изделий // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21. № 3. С. 116-126. (0,7 п.л.).

33. Рагуткин А.В., Сидоров М.И., Ставровский М.Е. Некоторые аспекты создания и согласования цифровых двойников изделий и производства // Технология машиностроения. 2020. № 4. С. 54-60. (0,42 п.л. / 0,1 п.л.).

34. Управление жизненным циклом продукции с позиций нового уклада организации производственных систем. / А.В. Рагуткин и [др.]. Качество и жизнь. 2019. № 2 (22). С. 28-34. (0,42 п.л. / 0,1 п.л.).

35. Реализация системы управления проектно-производственной деятельностью для создания сложной технической продукции / А.В. Рагуткин и [др.]. Информационно-технологический вестник. 2019. № 4 (22). С. 147-161. (0,91 п.л. / 0,18 п.л.).

36. Развитие цифрового машиностроительного производства в концепции индустрии 4.0 / А.В. Рагуткин и [др.]. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 4. С. 97-103. (0,42 п.л. / 0,1 п.л.).

37. Оптический сенсор молекулярного кислорода на основе композиционного материала / А.В. Рагуткин и [др.]. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17. № 3. С. 728-730. (0,12 п.л. / 0,05 п.л.).

38. Особенности мониторинга радиоактивных аэрозолей и газов. тенденции развития аналитических фильтрующих материалов / А.В. Рагуткин и [др.]. Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 3 (83). С. 36-41. (0,36 п.л. / 0,1 п.л.).

39. Effect of a condensation utilizer on the operation of steam and hot-water gas-fired boilers / A. V. Ragutkin [and ath.]. Thermal Engineering. 2015. Т. 62. № 5. С. 352-358. (0,42 п.л. / 0,1 п.л.).

40. Рагуткин А.В. Распределенная генерация как способ эффективного и надежного электроснабжения потребителей // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 7. С. 17-19. (0,18 п.л.).

41. Лазарев С.А., Рагуткин А.В. Энергетическое обследование (энергоаудит) в условиях саморегулирования. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2010. № 11. С. 31-36. (0,4 п.л. / 0,18 п.л.).

В том числе, зарегистрированные объекты РИД:

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664454 Российская Федерация. Многофункциональная программная платформа видеоаналитики: № 2021663637: опубл. 07.09.2021 / А. С. Сигов, А. В. Рагуткин, И. А. Александров [и др.]

43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664645 Российская Федерация. Программный модуль интеллектуального автоматизированного поиска ситуационных событий в видеопотоке: № 2021663707: опубл. 10.09.2021 / А. С. Сигов, А. В. Рагуткин, И. А. Александров [и др.].

44. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664742 Российская Федерация. Программный модуль транскодирования видеопотока: № 2021663668: опубл. 13.09.2021 / А. С. Сигов, А. В. Рагуткин, И. А. Александров [и др.].

45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664913 Российская Федерация. Программный модуль интеллектуального анализа потоковых видеоданных на основе методов машинного обучения: № 2021663715: опубл. 15.09.2021 / А. С. Сигов, А. В. Рагуткин, И. А. Александров [и др.].

46. Способ определения массовой концентрации молекулярного кислорода в органической жидкости / А.В. Рагуткин и [др.]. Патент на изобретение RU 2685763 C1, 23.04.2019.

47. Smart energy cad / А.В. Рагуткин и [др.]. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019612050, 08.02.2019.

48. Построение сегмента области устойчивости пространственных относительных колебаний материальной точки / А.В. Рагуткин и [др.]. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019661266, 23.08.2019.

49. Получение и обработка данных, получаемых от датчиков триботехнического комплекса / А.В. Рагуткин и [др.]. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019661267, 23.08.2019.

50. Создание иерархий принятия решения по управляющим действиям выбора технологии / А.В. Рагуткин и [др.]. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019661547, 02.09.2019.

51. Fitenergy / А.В. Рагуткин и [др.]. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019663326, 15.10.2019.

52. Resourcesave cad. / А.В. Рагуткин и [др.]. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019666223, 06.12.2019.

53. Condenser тепловой и конструктивный расчет / А.В. Рагуткин и [др.]. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016611501, 03.02.2016.