



А. С. Алешина, А. А. Ивановский, А. М. Иващенко, И. Ю. Кляйррок,
А. Ю. Култышев, М. Ю. Степанов, Р. О. Юдин



Цифровая трансформация
в энергомашиностроении и энергетике



Цифровая трансформация
в энергомашиностроении
и энергетике

ТУРБОСЕРВИС



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт энергетики

Высшая школа энергетического машиностроения

Серия научно-технических изданий «Формула турбин»

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ И ЭНЕРГЕТИКЕ

Учебное пособие

Под общей редакцией д.т.н. А. Ю. Култышева



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2026

УДК 621:620.9(075.8)
ББК 31.363я73
Ц75

Цифровая трансформация в энергомашиностроении и энергетике : учеб. пособие / А. С. Алешина [и др.] ; под общ. ред. д.т.н. А. Ю. Култышева. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2026. – 243 с. – (Серия научно-технических изданий «Формула турбин»).

ISBN 978-5-7422-9318-7

Рецензенты:

В. Е. Михайлов, д.т.н., профессор, генеральный директор ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»);

А. Н. Рогалев, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Инновационных технологий наукоемких отраслей» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Авторы:

А. С. Алешина, А. А. Ивановский, А. М. Иващенко, И. Ю. Кляйнрок, А. Ю. Култышев, М. Ю. Степанов, Р. О. Юдин

В данном учебном пособии системным образом подробно рассмотрены вопросы цифровой трансформации и развития энергомашиностроительных предприятий и автоматизации оборудования объектов энергетики. Отдельное внимание уделено вопросам постановки цифрового процесса сопровождения жизненного цикла энергетического оборудования.

Структура издания позволяет использовать его как основу курсов лекций по дисциплинам «Цифровая трансформация бизнеса», «Основы цифровой трансформации» для студентов и аспирантов различных специальностей.

Табл. 8. Ил. 66. Библиогр.: 175 назв.

Компьютерная верстка *А. Ю. Култышева*

Печатается по решению
Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ISBN 978-5-7422-9318-7

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	8
<i>Глава 1.</i> ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	10
<i>Глава 2.</i> ЦИФРОВАЯ ЗРЕЛОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	17
<i>Глава 3.</i> НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	29
<i>Глава 4.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ	31
<i>Глава 5.</i> ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА	54
<i>Глава 6.</i> ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА.....	102
<i>Глава 7.</i> ПОСТАНОВКА ЦИФРОВОГО ПРОЦЕССА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЯ.....	105
<i>Глава 8.</i> МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ	129
8.1 Основная нормативно-техническая документация, применяемая при разработке систем мониторинга и диагностики	129
8.2 Цели и основные принципы проектирования систем мониторинга и диагностики.....	131
8.3 Подходы к диагностированию оборудования.....	135
8.4 Прогнозирование технического состояния.....	147
8.5 Развитие отечественных систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования.....	154
8.6 Обзор зарубежных систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования.....	172
8.7 Опыт разработки системы мониторинга и диагностики паровых турбин.....	179

<i>Глава 9.</i>	ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ И ЭНЕРГЕТИКЕ.....	191
9.1	Основные направления применения ИИ.....	192
9.2	Технологические основы и методы ИИ для энергомашиностроения и энергетики	201
9.3	Вызовы и ограничения применения ИИ в энергомашиностроении и энергетике.....	205
9.4	Перспективные направления развития ИИ в энергомашиностроении и энергетике.....	206
<i>Глава 10.</i>	ИНДУСТРИЯ 6.0: БЫТЬ ИЛИ НЕ БЫТЬ	209
10.1	Эволюция промышленных революций: от механизации к киберфизико-биологическим системам.....	211
10.2	Ключевые технологии Индустрии 6.0 применительно к энергомашиностроению	212
10.3	Критическая оценка готовности российского энергомашиностроения.....	214
10.4	Мировой опыт и стратегические сценарии для России.....	214
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	217

ПРЕДИСЛОВИЕ

Применение комплексного подхода к цифровой трансформации энергомашиностроительных предприятий с одновременным внедрением модульного подхода открывает широкие возможности для повышения конкурентоспособности таких объектов трансформации и предметов исследования, а дальнейшее ведение операционной деятельности с использованием такой концепции приводит к взрывному росту компании.

Реализация проектов с использованием комплексных подходов позволяет повысить качество, технико-экономические показатели и конкурентоспособность энергетического оборудования и объектов в целом и снизить затраты на сопровождение их жизненного цикла, а также сократить трудоемкость и длительность изготовления оборудования с получением дополнительных возможностей и инструментов модернизации оборудования, реконструкции и сервиса объектов ТЭК.

Следует также отметить, что структура книги позволяет ее использовать как основу курсов лекций «Цифровая трансформация бизнеса» и «Основы цифровой трансформации» для студентов и аспирантов всех инженерных специальностей.

Авторы

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЖЦИ – жизненный цикл изделия;

ЖЦ – жизненный цикл;

ВТИ – Всероссийский (ранее Всесоюзный) теплотехнический институт;

МЭИ – Московский энергетический институт;

ЦКТИ – Центральный котлотурбинный институт;

УрФУ – Уральский федеральный университет;

ЛМЗ – Ленинградский металлический завод;

КТЗ – Калужский турбинный завод;

НЗЛ – Невский завод имени Ленина;

ЦНИИКА – Центральный институт комплексной автоматизации;

НИОКР – научно-исследовательская опытно-конструкторская работа;

ДСЕ – детали и сборочные единицы;

ПТВ – план товарного выпуска;

БС – базовая структура;

ЦМИ – цифровой макет изделия;

АРМ – автоматизированное рабочее место;

ЕРК – единый расчетный комплекс;

ПГУ – парогазовая установка;

ПТУ – паротурбинная установка;

ГТУ – газотурбинная установка;

КУ – котел-утилизатор;

КПД – коэффициент полезного действия;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

ГРЭС – государственная районная электрическая станция;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

ЦВД – цилиндр высокого давления;

ЦСД – цилиндр среднего давления;

ЦНД – цилиндр низкого давления;

ЦСНД – цилиндр средне-низкого давления;

РВД – ротор высокого давления;

РСД – ротор среднего давления;

РНД – ротор низкого давления;

ЧВД – часть высокого давления;

ЧСД – часть среднего давления;

ЧНД – часть низкого давления;

КТПП – конструкторско-технологическая подготовка производства;

КПП – конструкторская подготовка производства;

ТПП – технологическая подготовка производства;

САПР – система автоматизированного проектирования;

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;

ЭЧСРиЗ – электрогидравлическая часть системы регулирования и защиты;

КИП – контрольно-измерительные приборы;

РКВД – регулирующий клапан;

СК – стопорный клапан;

ИИ – искусственный интеллект;

НСИ – нормативно-справочная информация.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация производства – это ключевой этап в эволюции машинного производства, характеризующийся передачей функций управления и контроля от человека к специализированным приборам и автоматическим системам. Этот процесс является важнейшим элементом промышленной революции, начавшейся в XX веке, и продолжает играть решающую роль в современной промышленности, обеспечивая повышение эффективности, точности и безопасности производственных процессов.

Основные аспекты автоматизации производства следующие:

1. Цели автоматизации.

- Снижение влияния человеческого фактора на качество продукции.
- Увеличение производительности за счет непрерывности работы.
- Сокращение издержек (финансовых, временных и трудовых).
- Повышение гибкости производства (быстрая переналадка под новые задачи).
- Обеспечение безопасных условий труда (замена человека на опасных участках).

2. Уровни автоматизации.

- Нулевой – ручное управление без технических средств.
- Частичный – автоматизация отдельных операций (например, станок с ЧПУ).
- Комплексный – автоматизация целого участка или цеха.
- Полный – автономная работа всего производственного цикла без участия человека.

3. Ключевые технологии.

- Программируемые логические контроллеры – «мозги» автоматизированных систем.
- Роботизированные комплексы – манипуляторы для сборки, сварки, погрузки.
- Системы SCADA – мониторинг и диспетчеризация процессов.

- IoT-датчики – сбор данных о состоянии оборудования.
- Искусственный интеллект – прогнозирование отказов, оптимизация режимов.

- Цифровые двойники – виртуальные модели производств для тестирования изменений.

4. Экономический эффект.

- Рост выпуска продукции на 20-40% при снижении брака.
- Сокращение времени простоев на 15-30%.
- Окупаемость инвестиций за 3-5 лет (в зависимости от объемов).

5. Вызовы и ограничения.

- Высокие начальные затраты на внедрение.
- Необходимость переподготовки персонала.
- Риски кибератак на промышленные сети.
- Ограниченная адаптивность к нестандартным ситуациям (по сравнению с человеком).

6. Тенденции развития.

- Интеграция «умных» фабрик в концепцию Индустрии 4.0, а потом целевым образом в концепцию Индустрии 6.0.
- Использование облачных платформ для управления распределенными производствами.
- Развитие коллаборативных роботов (коботов), работающих рядом с людьми.
- Внедрение блокчейн-технологий для прозрачности цепочек поставок.

Автоматизация производства – это не просто замена человека машиной, а создание интеллектуальной экосистемы, где технологии и люди дополняют друг друга. Ее развитие определяет конкурентоспособность предприятий в XXI веке, позволяя переходить от массового производства к персонализированным решениям с минимальными издержками.

ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

В эпоху до массового внедрения автоматизации основное внимание уделялось механизации труда. Механизация позволяла заменять физический труд человека при помощи различных механических устройств и машин, тем самым увеличивая производительность и снижая физические нагрузки на рабочих. Однако интеллектуальный труд, включая задачи управления и контроля, оставался за пределами механизации и требовал непосредственного человеческого участия.

С развитием технологий и науки, возможности механизации расширились, и многие операции, как физического, так и интеллектуального труда, стали поддаваться формализации и, как следствие, автоматизации. Современная автоматизация производства включает в себя не только автоматическое выполнение рутинных физических задач, но и сложные процессы принятия решений, которые ранее требовали участия квалифицированных специалистов.

Введение автоматизации на производство имеет ряд значительных преимуществ:

1. Повышение производительности труда: автоматизированные системы способны работать круглосуточно без перерывов, обеспечивая значительный рост объемов производства.

2. Стабильное качество продукции: автоматизация минимизирует человеческий фактор, который может привести к ошибкам и браку, тем самым гарантируя высокое и стабильное качество выпускаемой продукции.

3. Сокращение затрат: автоматизация позволяет снизить долю рабочих, занятых на производстве, и, как следствие, уменьшить затраты на заработную плату.

Автоматизация производства измеряется уровнем (степенью) автоматизации, который отражает глубину и широту внедрения автоматических систем в производственный процесс. Существуют различные уровни автоматизации, начиная от частичного контроля производственных

операций до полного автономного управления всем производственным процессом без непосредственного участия человека.

В современном мире тенденция к автоматизации производственных процессов только усиливается, поскольку стремление к повышению производительности и оптимизации затрат становится все более актуальным для предприятий в условиях глобальной конкуренции.

Автономные механизмы, предшественники нынешних автоматизированных систем, были известны с давних времен. Тем не менее, до XVIII века они не находили широкого применения в мелкомасштабном производстве, служа скорее интересными экспонатами, демонстрирующими мастерство их создателей, нежели практическими инструментами. Развитие инструментов и методов труда, а также интеграция машин и механизмов для выполнения задач, традиционно отведенных людям, привели к значительному прогрессу в производстве в конце XVIII и начале XIX веков, что стало основой для промышленного переворота.

Этот переворот заложил основу для механизации различных отраслей производства, включая текстильную, металлообработку и деревообработку. Карл Маркс выделил этот процесс как кардинальное изменение в техническом развитии, отметив переход к использованию систем машин, которые автоматизировали процессы, оставив человеку роль наблюдателя и регулятора. Ключевыми достижениями этого времени стали создание И.И. Ползуновым автоматического регулятора для парового котла и разработка Дж. Уаттом центробежного регулятора для паровых машин, что сыграло важную роль в промышленной эволюции, и в энергомашиностроении в частности.

С развитием железнодорожного транспорта в XIX веке возникла потребность в автоматизации для повышения безопасности движения поездов, что привело к созданию автоматических устройств контроля скорости. В России одними из первых таких устройств стали разработки инженера С. Прауса и команды В. Зальмана и О. Графтио, внедрение которых свидетельствует о раннем признании важности автоматизации в железнодорожной отрасли.

До XIX века тематика автоматических устройств ограничивалась классической механикой, рассматривая их как отдельные единицы. Новый этап начался с работ Дж.К. Максвелла и И.А. Вышнеградского, которые легли в основу теории автоматического управления, рассматривая регуляторы и машины как единую систему. Это направление развития теории поддержали и развили другие ученые, в том числе А. Стодола и Н.Е. Жуковский.

Появление механических генераторов и электродвигателей открыло путь для централизованной генерации и распределения электроэнергии, что потребовало разработки систем автоматического контроля за напряжением, ставших неотъемлемой частью промышленного использования электричества.

С начала XX века, благодаря изобретению регуляторов напряжения, электричество начало активно применяться в качестве источника энергии для производственного оборудования. Это открыло дорогу электроприводу, который сперва заменил паровые машины в системах трансмиссии, а затем и в индивидуальном использовании, обеспечивая работу станков собственными электродвигателями.

В 1920-е годы переход к использованию индивидуальных электроприводов значительно улучшил технологические процессы и экономическую эффективность механической обработки. Это способствовало не только энергетической механизации станков, но и усовершенствованию их управления. Благодаря этому процессу начали развиваться станки-автоматы и автоматические линии, что в 1930-е годы привело к широкому внедрению автоматизированного электропривода в различных отраслях промышленности, заложив основу для современной автоматизации производственных процессов.

В Советском Союзе начало внедрения автоматизированных технологий совпало с развитием тяжелой промышленности и машиностроения, идя в ногу с политикой индустриализации и механизации. Уже в 1930 году был создан комитет по автоматике при Главэнергоцентре ВСНХ, способствующий автоматизации в энергетической отрасли. К 1932 году появилось специализированное бюро автоматизации, что стимулировало применение автоматического оборудования в различных секторах экономики, от тяжелой

промышленности до пищевой. Важным шагом стало создание Всесоюзного объединения точной индустрии для производства контрольно-регулирующих приборов.

НИИ различных отраслей активно развивали отделы автоматики, а в Академии наук СССР функционировала Комиссия телемеханики и автоматики, что способствовало координации исследований в этой области. Появление журнала «Автоматика и телемеханика» стало значимым событием для научного сообщества.

В США в 1936 году Д.С. Хардер определил автоматизацию как процесс автоматической обработки и перемещения деталей на различных этапах производства, что отразило эволюцию понимания термина от простого связывания оборудования до охвата всех операций в производственном процессе.

Широкое внедрение автоматизации в различных сферах, таких как промышленность, транспорт, связь, торговля и обслуживание, обусловлено ее высокой экономической выгодой, технологической необходимостью и операционными преимуществами. Ключевые аспекты автоматизации включают более эффективное использование ресурсов, таких как энергия, сырье, оборудование, трудовые ресурсы и инвестиции, улучшение качества и стандартизацию продукции, а также повышение надежности работы оборудования.

Социалистические страны активно продвигали автоматизацию производства как ключевой элемент развития экономики, реализуя ее в соответствии с централизованными планами, подкрепленными финансовыми и материальными ресурсами.

С начала реализации первых пятилеток (1928-1941), были основаны заводы по производству оборудования для автоматизации, играя критическую роль в поддержке военных усилий и нужд оборонной промышленности во время Второй Мировой войны. Послевоенный период (1946-1950) ознаменовался дальнейшим развитием автоматизации, особенно в энергетике, химической и нефтегазовой отраслях, включая внедрение автоматизированного электропривода.

Программа развития автоматизации, принятая на XIX съезде КПСС для периода 1953-1958 годов, предусматривала механизацию и автоматизацию производственных процессов в ключевых отраслях, включая металлургию, горную промышленность и машиностроение, а также полную автоматизацию работы ГЭС.

1950-е годы стали временем, когда автоматизация активно внедрялась по всему спектру ведущих отраслей советской экономики. В машиностроении запускались автоматические производственные линии, а электростанции переходили на автоматизированное управление. Металлургическая промышленность достигла высокого уровня автоматизации процессов выплавки, а нефтеперерабатывающая и химическая отрасли внедрили автоматические установки. Развитие телемеханики позволило автоматизировать управление газопроводами и системами водоснабжения.

К 1953 году объем автоматизированного оборудования вырос в 10 раз по сравнению с 1940 годом, включая появление металлообрабатывающих станков с программным управлением и роторных автоматических линий для массового производства, а также телемеханическое управление в взрывоопасных химических производствах, подчеркивая стремительное развитие и значительное влияние автоматизации.

Начиная с 2005 года с целью выживания в условиях жесткой конкуренции различные энергомашиностроительные предприятия, в том числе турбинные, разными темпами начинают цифровую трансформацию. Необходимо отметить, что будет эффективно проводить цифровую трансформацию предприятия по производству паровых турбин без выстраивания связи между конструкцией изделия и технологией производства при одновременной стандартизации, типизации, классификации конструкции и унификации оборудования и технологии. Как верно и обратное – добиться высокой эффективности использования инструментов стандартизации, типизации, классификации и унификации без перехода на новую концепцию ЖЦИ с современной методологией КТПП, основывающейся на бесчертежном подходе с аннотированной 3Д-моделью в качестве подлинника и ассоциативными связями на всех этапах подготовки производства.

На рисунке 1.1 представлена диаграмма, характеризующая современную концепцию эффективного развития турбинного предприятия, включающая три основных направления развития бизнес-процессов и конструкции оборудования: 1) модульная концепция, использующая модульные принципы и подходы на протяжении всего ЖЦИ от разработки, производства до утилизации; 2) оптимизация конструкции и функций оборудования за счет совершенствования составляющих модулей; 3) цифровая трансформация предприятия с повышением уровня цифровой зрелости, влияющая на эффективность всех этапов ЖЦИ [1, 2].



Рисунок 1.1 – Современная концепция развития турбинного предприятия

Значительное повышение эффективности оборудования и его ЖЦ невозможно с отсутствием значительного движения хотя бы по одному из обозначенных взаимно дополняемых направлений развития, так как цифровые инструменты являются лишь высокопроизводительными средствами организации и выполнения КТПП, производства, монтажа, пусконаладки, эксплуатации и сервисного обслуживания оборудования. Их внедрение на всем ЖЦИ не даст должного эффекта, если в оборудование не будут закладываться теоретические основы деталей и машин, позволяющие добиться максимальной стандартизации, типизации, классификации

конструкции и унификации, обеспечивающих конструкторскую, технологическую и функциональную преемственность и возможность выстроить по критическому пути все бизнес-процессы создания и производства всей номенклатуры оборудования предприятия.

В профессиональной среде машиностроителей энергетического и нефтегазового секторов даже проскакивают выражения «бардак автоматизировать нельзя». Одновременно очевидно, что без должного совершенствования технико-экономических и функциональных показателей модулей и конструкций, компонуемых из них, невозможно добиться высоких характеристик оборудования всего номенклатурного ряда. Выполнить ряд расчетно-аналитических и оптимизационных задач эффективно без унификации и мобильных решений по компоновке и модификации, которыми, безусловно, могут являться новые принципы и подходы к созданию модульных конструкций с использованием современных инструментов и методологий цифрового макета изделия и цифровой концепции обеспечения ЖЦИ, невозможно.

Контрольные вопросы к главе 1

1. Дайте определение термину автоматизация производства.
2. Какие ключевые этапы развития автоматизации производства в мире можно выделить?
3. Какие три основных направления развития бизнес-процессов входят в современную концепцию эффективного развития турбинного предприятия?

ГЛАВА 2. ЦИФРОВАЯ ЗРЕЛОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ

На сегодняшнем конкурентном рынке невозможно добиться быстрой перестройки выпуска разной, в том числе новой, продукции и достигать максимальных показателей производства и его продукции без решения смежных задач, внедрение результатов решения которых обеспечивают предпосылки к «взрывному» росту предприятия:

- системный подход при формировании конструкции оборудования с учетом взаимозаменяемости, совместимости и согласованности габаритных, монтажных и установочных размеров;

- исключение избыточности выпускаемой продукции, которая выпускается единичными образцами или ограниченными малыми сериями. Это сокращает большое разнообразие избыточных по составу и количеству технологических средств, что снижает неоправданные дополнительные непроизводительные расходы на их содержание;

- обеспечение ограниченности ряда модулей, позволяющей создать библиотеку и решить задачу максимальной оптимизации конструкции модулей путем направления ресурса высококвалифицированного персонала на оптимизацию существующих узлов, модулей, конструкций и компоновочных решений вместо создания новых дублирующих мало востребованных модулей, и конструкций оборудования;

- инженерный анализ и оптимизация модулей и в целом конструкции оборудования как с точки зрения технико-экономических показателей продукта, обеспечив высокие показатели надежности, экологичности, экономичности, ремонтпригодности оборудования, так и с точки зрения технологичности изделия, обеспечив высокие показатели технологической конструкции изделия по ГОСТ 14.201-83 – функция подготовки производства, предусматривающая взаимосвязанное решение конструкторских и технологических задач, направленных на повышение производительности труда, достижение оптимальных трудовых и материальных затрат и сокращение времени на производство, в том числе и монтаж вне предприятия-изготовителя, техническое обслуживание и ремонт изделия;

- внедрение управления ЖЦИ;

- цифровизация инструментов обеспечения ЖЦ;
- рациональная и безопасная реализация проектов внедрения в опытно-промышленную и промышленную эксплуатацию на предприятии новых подходов, заключающихся в разработке методологии внедрения «новых» инструментов, конструкций, принципов КТПП с постепенным исключением от проекта к проекту вовлечения «старых» конструкций и отказа от «старых» инструментов и бизнес-процессов.

Учитывая, что даже плановая переработка конструкций всей действующей номенклатуры оборудования является трудоемкой, невостребованной, неактуальной и неподъемной задачей для любой компании, то старт, развертывание проекта по внедрению новой концепции с наполнением архива библиотеками модулей должно быть осуществлено под конкретный План товарного выпуска (ПТВ) продукции видимого горизонта проектов (2-3 года). При этом разрабатывать «точечно» модульные конструкции только для части выпускаемого оборудования является серьезной стратегической ошибкой. Так как такой подход даже с целью достижения краткосрочной временной и экономической выгоды приведет к нецелевым потерям трудовых ресурсов, пробуксовке внедрения концепции, снижению охвата использования и унификации модулей/блоков/элементов с потерей их функциональности, остановке наполнения библиотеки, снижению доли использования типовых отработанных библиотечных позиций. Все это приводит к значительным среднесрочным и долгосрочным потерям и не только временным, трудовым, экономическим, но и потерям оборудования в качестве, надежности, технологичности и технико-экономических показателей, то есть эксплуатационным показателям объекта использования на протяжении всего ЖЦ до утилизации, потому что усложнится в том числе реконструкция, модернизация и сервисное обслуживание оборудования.

Важнейшими вопросами развития, например, паротурбостроения являются вопросы совершенствования инструментов и средств разработки, производства, эксплуатации и управления жизненным циклом (ЖЦ) основного и вспомогательного энергетического оборудования. Поэтому в разное время профильными организациями (ОРГРЭС, ВТИ, ЦКТИ, Турбокон,

Т Плюс, УрФУ, МЭИ, СПбПУ и др.) выполнялись исследования, а на турбинных предприятиях (Силовые машины, (СКБ «Турбина», Ленинградский металлический завод), КТЗ и УТЗ) проекты по совершенствованию бизнес-процессов, развитию и адаптации инструментов, способов и методологии конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) и собственно производства эксплуатации, модернизации и сервисного обслуживания турбинного оборудования.

В соответствии с [3]: «Сквозная цифровая технология «Новые производственные технологии» (СЦТ НПТ) – это сложный комплекс мультидисциплинарных знаний, передовых наукоемких технологий и системы интеллектуальных ноу-хау, сформированных на основе результатов фундаментальных и прикладных научных исследований, кросс-отраслевого трансфера и комплексирования передовых наукоемких технологий, СЦТ и субтехнологий. Новые производственные технологии – совокупность новых, с высоким потенциалом, демонстрирующих де-факто стремительное развитие, но имеющих пока по сравнению с традиционными технологиями относительно небольшое распространение новых подходов, материалов, методов и процессов, которые используются для проектирования и производства глобально конкурентоспособных и востребованных на мировом рынке продуктов или изделий (машин, конструкций, агрегатов, приборов, установок и т.д.). Разработка и внедрение субтехнологий, входящих в СЦТ НПТ, является необходимым условием для присутствия отечественных компаний на глобальных высокотехнологичных рынках, для которых характерны смещение «центра тяжести» в конкурентной борьбе на этап разработки высокотехнологичной продукции, повышение уровня ее наукоемкости, сокращение сроков вывода новой продукции на рынок, жесткие ограничения по издержкам, высокие требования к потребительским характеристикам».

Ведущие страны реализуют собственные стратегии по развитию промышленности. Так, в Нидерландах появилась программа «Smart Factory», в Великобритании – High Value Manufacturing Catapult, в Италии – Fabbrica del Futuro, во Франции – Usine du Futur, «Сделано в Китае 2025», Made Different –

в Бельгии, Национальная технологическая инициатива – в России, в США – Консорциум промышленного Интернета. Параллельно разрабатываются и реализуются программы цифровизации [4, 5]: в Германии – проект «Индустрия-4.0», в Японии – концепции «Connected Factories», в США – проекты по направлению «интернет вещей», в России была утверждена программа «Цифровая экономика» [6].

Цифровая трансформация является фактором конкуренции: государства и предприятия, которые смогут опередить других на этом пути и воспользоваться возможностями цифровизации в полной мере, станут лидерами [7].

Источник [7] ссылается на рейтинг [8] и обозначает: «Развитие цифровой экономики и вхождение в группу лидеров требует продолжения поддержки инновационных компаний, совершенствования налогового инструментария, стимулирования банков к кредитованию малых и средних предприятий, увеличения затрат на НИОКР частных компаний, укрепления связей науки и производства в рамках государственно-частного партнерства, более активной цифровизации промышленности, финансов и торговли; внедрения концепции «умного» производства». Рейтинг Digital Evolution Index 2017 представлен на рисунке 2.1.

Страны-лидеры демонстрируют высокий уровень цифрового развития и стабильный его рост, который необходимо поддерживать, и они должны активизировать инновационную деятельность. Перспективные страны, к которым относится и Россия, имеют самый невысокий уровень цифрового развития, но стремительно развиваются в направлении цифровизации. У этих стран есть все шансы войти в группу лидеров, если в них будет повышаться эффективность использования ресурсов и активно поддерживаться инновации [7]. Россия занимает 39-е место в рейтинге, но при этом занимает 5-е место среди «перспективных» стран, что дает основательный повод надеяться на серьезный рывок в цифровизации, причем в первую очередь за счет передовых промышленных предприятий. Цифровая трансформация промышленности в соответствии с многочисленными основополагающими федеральными нормативными документами и дорожными картами является стратегической

задачей российской экономики.

Согласно отчету Фонда «Сколково» [9]: «Выдвижение НПП (как единого комплекса технологий) в качестве одного из ключевых технологических приоритетов в ряде развитых стран произошло в 2010-2012 гг. и способствовало появлению новых исследований, изучающих причины, содержание и перспективы развития новых технологий. Тем не менее, до настоящего времени не выработано общепринятого определения НПП. Широко используется понятие «передового производства» (advanced manufacturing), введенное Национальной ассоциацией перспективных производственных технологий США (National Association of Advanced Manufacturing, NACFAM): передовое производство – это производство, в

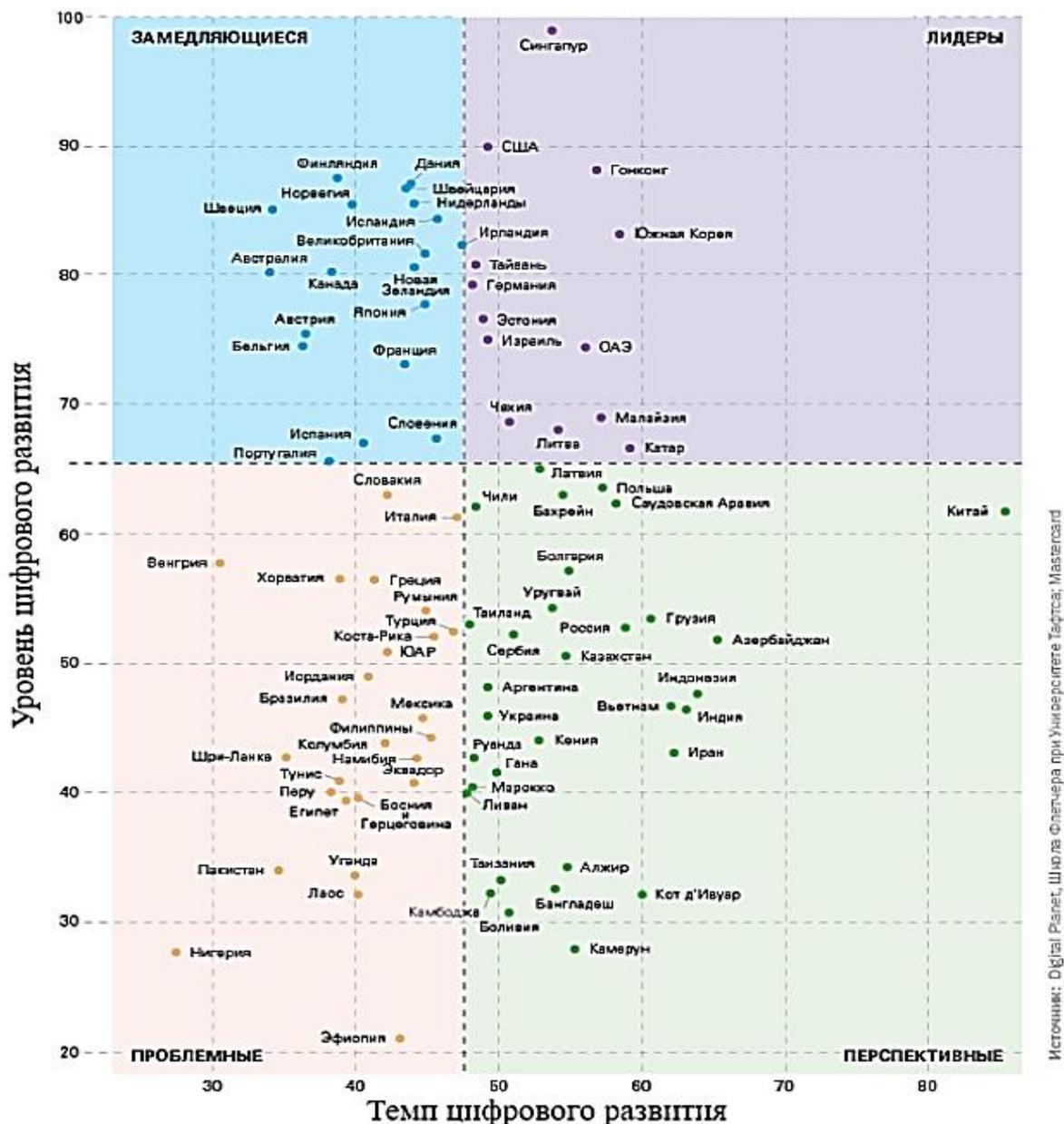


Рисунок 2.1 – Цифровое развитие стран

котором широко используются компьютерные, высокоточные и информационные компоненты, интегрированные с высокопроизводительной рабочей силой, которое создает систему, сочетающую в себе преимущества массового производства и в то же время гибко настроенную на необходимый в данный момент объем выпуска, и обладающую высокой степенью кастомизации с целью быстрого реагирования на потребности клиентов».

Энергомашиностроение стран и турбостроение как одно из наиболее наукоемких и как раз требующих быстрого реагирования на потребности заказчиков его сегментов, в особенности, находится на «острие» цифровой трансформации и развития промышленности и страны в целом. При этом под цифровой трансформацией необходимо понимать одновременное развитие технологий и реорганизации бизнес-процессов.

Существует множество различных формулировок «цифровой трансформации», в том числе описанных в [10], однако считаем, что наиболее четкая, точно подчеркивающая основную мысль и подходящая к турбиностроительному предприятию является формулировка Caglayan Arkan [11]: «цифровые преобразования требуют от лидеров использовать другой способ объединения людей и процессов с новыми технологическими инструментами, а также открытости для переосмысления традиционных бизнес-моделей и мышления цифровой компании с точки зрения того, как вы привлекаете своих клиентов, расширяете возможности своих сотрудников и оптимизируете свою деятельность, чтобы заново изобрести продукты и бизнес-модели».

На основании знаний о конструкциях паровых и газовых турбин, вспомогательного оборудования турбинных установок, об инструментах и средствах цифровизации, а также проектах цифровой трансформации турбинных предприятий, полученных при реализации совместных проектов, изучении предприятий, их деятельности и производимой продукции из специализированных и общедоступных источников, авторами проведен укрупненный анализ уровня цифровизации, и составлена оценка цифровой зрелости предприятий и уровня унификации/модульности конструкций производимого ими оборудования.

Как было обозначено выше, вопросы развития конструкции оборудования, подходов, инструментов и средств КТПП, а также цифрового, технологического и производственного развития являются многофакторными и зависят от школ и традиций, доступности результатов научных исследований в турбиностроительной и смежных областях. Особо значительно на возможность и скорость развития предприятия влияет номенклатура продукции: назначение, диапазон мощности и условия эксплуатации, а также оперативность и результативность цифровой трансформации предприятия, которые, главным образом, определяются успехами цифровой трансформации КТПП и собственного процесса производства новых продуктов.

Основные факторы и результаты оценки цифровой зрелости мировых производителей паротурбинного оборудования и уровня унификации/модульности их продукции сведены в таблицу 2.1.

Ниже описаны шкалы, разработанные авторами для такой укрупненной обзорной оценки. Они позволяют выполнить сравнительный анализ возможностей и готовности предприятий к использованию модульных подходов и современных средств управления ЖЦИ при создании паротурбинного оборудования.

Подобные оценки крайне важны, и выполнялись авторами периодически при работе над проектами цифровой трансформации и проектами по разработке новых образов конкурентного паротурбинного оборудования и использовались как бенчмаркинг, от результатов которого отталкивались при принятии как концептуальных стратегических решений, так и тактических конструкторских решений.

Следует отметить важность развития предприятия с одновременным внедрением модульной концепции разработки продукции и цифровой трансформацией предприятия. Разрабатывать модульные конструкции оборудования и оптимизировать модули, а главное полноценно использовать в новых создаваемых конструкциях оборудования и

Таблица 2.1 – Оценка уровня цифровизации и унификации/модульности конструкций мировых производителей паротурбинного оборудования

№ пп	Наименование фактора	General Electric (вкл. Alstom)	Siemens Energy	Mitsubishi Power	Ansaldo Energia	Doosan Skoda Power	MAN Energy Solutions	Турбоатом	ЛМЗ	КТЗ	УТЗ	НЭЛ
1	Срок существования компании, лет	166	157	155	170	164	130	89	166	77	85	166
2	Срок существования направления, лет	105	96	116	101	119	118	89	116	73	85	88
3	Референции паровых турбин, ед.	>5000	>121000	>2600	>700	>800	>2400	>430	>2750	>3040	>920	>500
4	Диапазон мощностей, МВт	2-1500	0-1900	0-1900	80-1200	5-1250	0-180	1-1100	0-1255	0-100	12-335	0-35
5	Средний объем выпуска паровых турбин в год, ед.	50	200	20	10	10	18	5	15	40	12	1
6	Численность конструкторов по направлению, чел.	>1000	>2000	>500	>400	130	150	200	300	100	130	20
7	Бюджет на НИОКР, % от прибыли	10	8-10	8-10	5	5	8	1	1	2	1	1
8	Количество центров компетенций, шт.	>15	>20	>15	2	>15	3	1	1	1	1	1
9	Рынки сбыта, количество стран	>180	>180	>70	>90	>60	>100	>45	>80	>48	>30	>20
10	Основная специализация по назначению паровых турбин	конденсационные	конденс./приводные	конденсационные	конденсационные	конденсационные	приводные	конденсационные	конденсационные	судовые	теплофикационные	приводные
11	Комплексная цифровизация, год начала	1995	1993	2000	2008	2002	2000	2010	2017	2018	2012	2005
12	Оценка уровня цифровой зрелости, уровни от 1 до 5	5	5	4	4	4	5	3	4	3	4	3
13	Оценка уровня модульности основной продукции, от 1 до 5	4	4	4	3	3	3	2	2	2	3	2

эффективно управлять ЖЦ, не имея высоких показателей цифровой зрелости предприятия, невозможно, как и обратное, достичь высоких показателей цифровой зрелости предприятия без значительной доли унификации библиотечных изделий во вновь разрабатываемых образцах оборудования.

При этом по разным отечественным и зарубежным оценкам необходимо обеспечивать долю использования унифицированных узлов и деталей в проектируемом изделии не менее половины от общей номенклатуры в составе нового изделия, что по мнению авторов невозможно достичь без новой идеологии, которой должно стать методологическое применение модульного принципа разработки и производства оборудования.

Стоит отметить, что опыт разработки паровых турбин позволяет сделать вывод о возможности достижения доли унификации 50-60% во всем номенклатурном ряде и 90% внутри группы ряда, то есть ограниченного ряда (семейство или серия турбин), что достигается как раз при использовании модульных принципов и подходов к КТПП, что, например, невозможно достичь в гидротурбостроении, где из-за особенностей индивидуальных условий объектов эксплуатации доля унификации даже в соседних образцах номенклатурного ряда продукции предприятия иногда едва достигает 15%, хотя даже в гидротурбостроении при правильном выстраивании типоразмерного ряда достигались аналогичные показатели унификации [1, 2]. Аналогичный показатель в газотурбостроении не превышает 20-30%, что объясняется большей, чем в паротурбостроении, наукоемкостью, приводящей к необходимости выполнения трудоемких и длительных лабораторных, стендовых и натурных испытаний, и, как следствие, к разработке, производству и дальнейшему сопровождению на протяжении всего ЖЦ оборудования ограниченного несколькими образцами ряда. Ограничение по мощностному и функциональному ряду газовых турбин не позволяет широко использовать ни унификацию, ни модульные подходы и даже параметрическое проектирование, а в лучшем случае используются подходы масштабирования с последующим проведением полномасштабных расчетно-аналитических и экспериментальных исследований. Как отмечено выше, в мировых профессиональных кругах турбостроителей вне гласно уже второй

образец паровой турбины семейства или серии, даже с некоторыми функциональными изменениями относительно первого головного образца, принято считать серийным, в то время как в газотурбостроении только 51-й образец газовой турбины, когда в ней уже учтены все необходимые доработки по опыту эксплуатации, считают серийным образцом.

Итак, оценка уровня цифровой зрелости предприятий различных отраслей осуществляется по различным методикам и использует многочисленные варианты шкал по нескольким блокам или направлениям и количеству баллов. Для оценки уровня цифровой зрелости энергомашиностроительных предприятий, разрабатывающих и производящих, в том числе паровые турбины, использовалась собственная экспертиза, что является справедливым, так как большая часть методик, разработанная большими коллективами, предполагает адаптацию к отрасли или даже к конкретному предприятию и самооценку.

Разработанная с учетом анализа и адаптации разных подходов [12-19] шкала оценки уровня цифровой зрелости энергомашиностроительного предприятия сведена в таблицу 2.2.

Такая шкала соответствует так называемой модели оценки цифровой зрелости «снизу-вверх», которая равняется на целевую эталонную бизнес-модель, использует план мероприятий, направленных на рост цифровой зрелости предприятия.

Уровень цифровой зрелости предприятия, естественно, зависит от модели и стадии цифровой трансформации, при этом авторы соглашаются с [13], который после проведенного глубокого анализа различных методик оценки зрелости и адаптации утверждает, что «цифровая трансформация промышленных предприятий отражает, главным образом, цифровую трансформацию конструкторско-технологической подготовки производства».

Применительно к турбинному заводу стоит обозначить некоторые еще более конкретные характеристики, которые авторы использовали для оценки предприятий.

Уровень 1. Осуществлено оснащение предприятия компьютерной техникой рабочих мест большей части участников процесса создания и производства оборудования. Доля компьютеризации может достигать 100 %.

Таблица 2.2 – Шкала оценки уровня цифровой зрелости
энергомашиностроительного предприятия

Уровень	Наименование уровня	Описание оценочных критериев уровня цифровой зрелости
1	Начальный	Хаотичность: процессы выполняются интуитивно, случайным образом и индивидуально для конкретного случая, что не позволяет спрогнозировать результат и добиться его в плановые сроки и бюджет.
2	Управляемый	Повторяемость: процессы становятся повторяющимися, и между ними формируются четкие границы по единой методологии, что позволяет повторять успешные решения.
3	Стандартизованный	Регламентированность: процессы и ресурсы документированы, стандартизованы и интегрированы, что позволяет управлять ими на всех уровнях комплексно.
4	Предсказуемый	Управляемость: процессы, способности и эффективность контролируются и управляются на основе количественных параметров. Именно этот уровень (!) позволяет полноценно и эффективно использовать в конструкторско-технологической подготовке модульный принцип с полностью цифровыми средствами и инструментами управления ЖЦИ.
5	Инновационный	Постоянные улучшения: непрерывные совершенствования бизнес-процессов, планирование и внедрение инноваций, что становится культурой, и все выполняется с использованием математических моделей.

Уровень 2. Компьютерные рабочие места используются для локальной автоматизации основных и вспомогательных процессов предприятия с использованием различного слабо интегрированного между собой программного обеспечения; более 50% документов участниками процесса разрабатывается в «ручном» или «полуручном» режиме.

Уровень 3. На предприятии разработаны уставы, положения, стандарты и регламенты управления основными и вспомогательными процессами управления ЖЦИ и данными; единое информационное пространство участников процесса отсутствует, и для интеграции отдельных процессов используются конвертеры и интеграторы, то есть сквозные процессы КТПП, производства, монтажа, пуско-наладки, эксплуатации и сервисного обслуживания оборудования отсутствуют. Для автоматизации процессов могут быть выбраны единые цифровые платформы.

Уровень 4. На предприятии выполнена системная автоматизация всех процессов предприятия на единой платформе CAD/PDM/PLM/CAM с интеграцией CAE-системы и с частичной или полной реализацией ERP. В автоматизированных системах работает более 80% участников процесса и более 50% станков с ЧПУ.

Уровень 5. На предприятии 100% участников процесса работает в системах автоматизации единого информационного пространства и более 80% оборудования являются станками с ЧПУ, которые интегрированы в EIM-систему; осуществляется непрерывное совершенствование бизнес-процессов, планирование и внедрение инноваций с использованием комплекса экспертных систем.

Контрольные вопросы к главе 2

1. Дайте определение формулировке «цифровая трансформация», которая максимально близко подходит к турбиностроительному предприятию.
2. Какие уровни цифровой зрелости энергомашиностроительного предприятия можно выделить?
3. Как можно охарактеризовать пятый уровень цифровой зрелости?

ГЛАВА 3. НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В современных производственных системах, поддерживающих высокую адаптивность в условиях автоматизации, используются следующие элементы:

- станки с числовым программным управлением (ЧПУ), которые были представлены на рынке в 1955 году и начали широко распространяться с внедрением микропроцессорной техники;

- промышленные роботы, дебютировавшие в 1962 году и ставшие массово популярными благодаря прогрессу в микроэлектронике;

- роботизированные технологические комплексы (РТК), появившиеся в 1970-80-е годы и получившие распространение с появлением программируемых логических контроллеров;

- гибкие производственные системы, которые объединяют различные технологические устройства и роботизированное оборудование под управлением компьютеров, включая системы для перемещения заготовок и автоматической смены инструмента;

- автоматизированные складские системы (Automated Storage and Retrieval Systems, AS/RS), представляющие собой компьютеризированные подъемно-транспортные системы для хранения и извлечения товаров по запросу;

- системы компьютерного контроля качества (Computer-aided Quality Control, CAQ), включающие использование компьютеров и автоматизированного оборудования для проверки качества продукции;

- системы автоматизированного проектирования (Computer-aided Design, CAD), применяемые для разработки новых продуктов и подготовки технической документации;

- компьютерное планирование и координация (Computer-aided Planning, CAP), обеспечивающие интеграцию и координацию различных аспектов производственного планирования с помощью ЭВМ. CAP системы классифицируются и соединяются в зависимости от характеристик и назначения, основываясь на физической совместимости и типе связей между

элементами, обеспечивая их согласованную работу.

Эффективная организация производственных процессов в любом предприятии или отдельном цехе строится на умелом распределении всех основных, вспомогательных и обслуживающих операций как в пространстве, так и во времени. Хотя конкретные подходы к этому распределению могут варьироваться в зависимости от уникальных условий производства, существуют общие принципы, применимые практически везде:

- специализация задач и процессов;
- соответствие и пропорциональность производственных мощностей;
- работа процессов в параллельном режиме;
- организация прямоточного производства;
- минимизация времени простоя и перерывов в работе;
- обеспечение ритмичности и непрерывности процессов;
- приоритетная автоматизация рутинной, не требующей квалификации работы;
- упрощение сложных процессов путем их разделения на более простые и понятные операции.

Контрольные вопросы к главе 3

1. Перечислите основные элементы современных производственных систем, поддерживающие высокую адаптивность в условиях автоматизации.
2. Назовите ключевые общие принципы эффективной организации производственных процессов, которые формируют целевое состояние для автоматизации производства.

ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Если в рамках автоматизации также следовать модульной концепции разработки и производства оборудования, то для обеспечения условий по созданию библиотеки стандартных модулей стоит использовать укрупненную конструкторско-технологическую (иерархическую) структуру, позволяющую добиться единого системного подхода к разработке и производству оборудования, например, на энергомашиностроительном предприятии. Укрупненная конструкторско-технологическая структура энергетического оборудования представлена на рисунке 4.1.

Для достижения максимального эффекта от использования модульной концепции в паротурбинной тематике применяются методологические критерии заполнения такой структуры с разделением конструкции оборудования на модули.

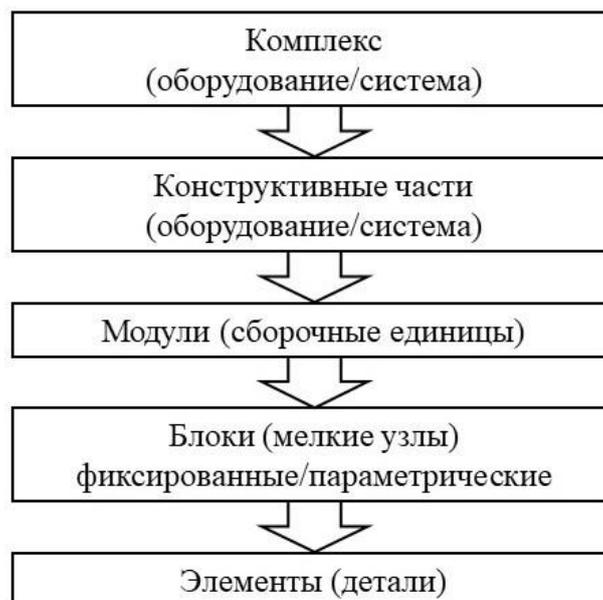


Рисунок 4.1 – Укрупненная конструкторско-технологическая структура энергетического оборудования

Разработанные основные и дополнительные принципы [1, 2, 20-27], которые должен обеспечивать библиотечный модуль, они же критерии разработки новых модулей, позволяют ограничить библиотеку модулей и блоков в связи с возможностью применения одних и тех же модулей/блоков в максимальном количестве, например, турбин различного типа, назначения, принципиальных схем, работающих в различных типах турбоустановок, а

также задействовать для разработки конкретного модуля/блока ограниченное количество конструкторов одного подразделения, которое имеет возможность обособленно, при этом при изготовлении иметь максимальный выбор размещения станочного производственного оборудования, что позволяет широко использовать при производстве внутривзаводскую, внутригрупповую, внешнюю кооперацию.

С учетом такой иерархии строятся конструкторская и технологическая структуры [28]. Важным вопросом является – организация управления составами изделия.

Основа структурирования информации для ее последующего использования в системах планирования – это не электронный архив, а управление составом изделия. С момента начала проекта внедрения на предприятии вошло в обращение такое понятие, как структура изделия – иерархическое дерево, отражающее состав изделия «от головной спецификации до последнего болта».

Структура изделия может содержать на порядок больше информации, чем спецификация, ее построение – первый важный шаг к представлению информации, подходящему для автоматизированной обработки.

В 2012-2015 годах на УТЗ с целью оптимизации процессов планирования и управления производством основного и вспомогательного оборудования газотурбинных и паротурбинных установок принято решение по созданию единой корпоративной базы данных выпускаемых изделий, а также внедрению и адаптации современных решений по автоматизации процессов управления инженерными данными. Создание единой корпоративной базы данных стало основной целью проекта «Внедрение системы управления инженерными данными». Достижение поставленной цели проекта потребовало решения ряда задач, которые представлены на рисунке 4.2.

В рамках опытной эксплуатации PLM-системы была создана первая полная структура изделия «Паротурбинная установка Т-63/76-8,8. Объем поставки завода» по текущему заказу поставки на Ижевскую ТЭЦ-1. Верхний уровень данной структуры представлен на рисунке 4.3.

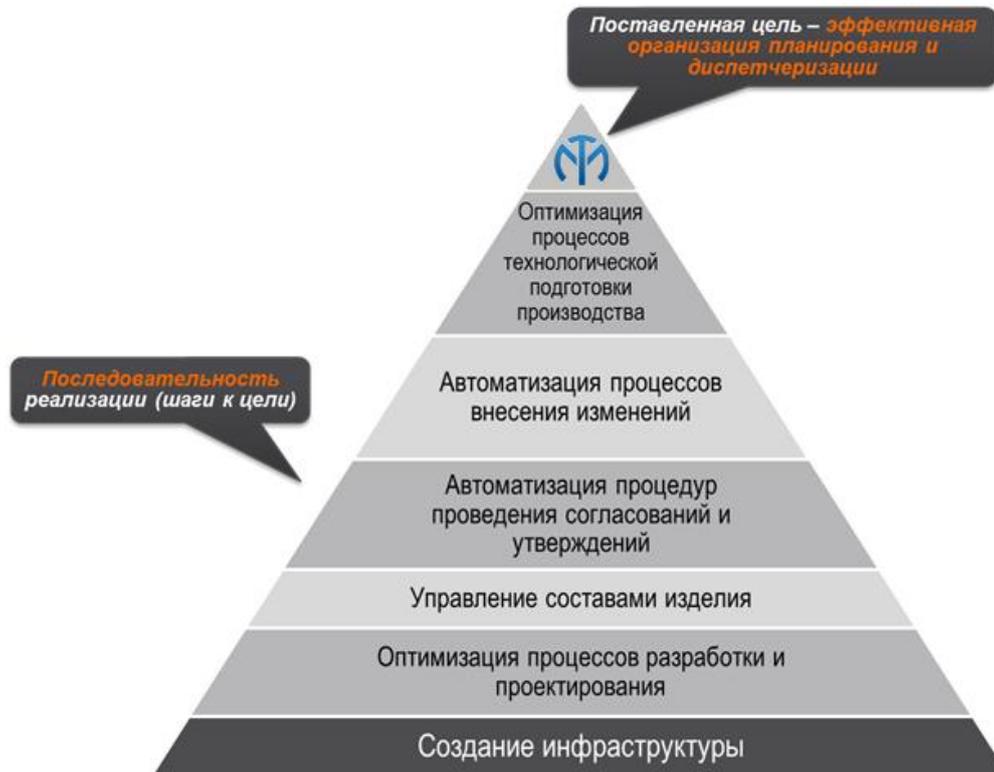


Рисунок 4.2 – Цели и задачи проекта «Внедрение системы управления инженерными данными», реализованного на УТЗ

MT-268700	Паротурбинная установка Т-63/76-8,8. Объем поставки завода	
▶ MT-238503-05	Подогреватель сетевой ПСГ-1300 с оборудованием	1
▶ MT-238503-07	Подогреватель сетевой ПСГ-1300 с оборудованием	1
▶ MT-268701-01	Конденсатор К-6000-ХШ с оборудованием	1
▶ MT-268702	Турбина паровая Т-63/76-8,8 с оборудованием	1
▶ MT-268944	Т-63/76-8,8 ЭЧСРиЗ	1

Рисунок 4.3 – Верхний уровень структуры изделия «Паротурбинная установка типа Т-63/76-8,8. Объем поставки завода» в PLM-системе

Построение структуры изделия, а также ее наполнение сканированной документацией проводилось специалистами КБ вручную на основе разработанных ранее спецификаций. При новом же проектировании использование «тяжелой» САД-системы позволило:

- получать структуры изделия в PLM-системе автоматически при выгрузке сборок, созданных в САД-системе. Пример структуры со связанными САД-документами представлен на рисунке 4.4;

- получать 3Д-модели и ассоциативные с ними чертежи с атрибутивной информацией, выгружаемой в объекты PLM-системы. Примеры ассоциативного чертежа и 3Д-модели представлены на рисунке 4.5;

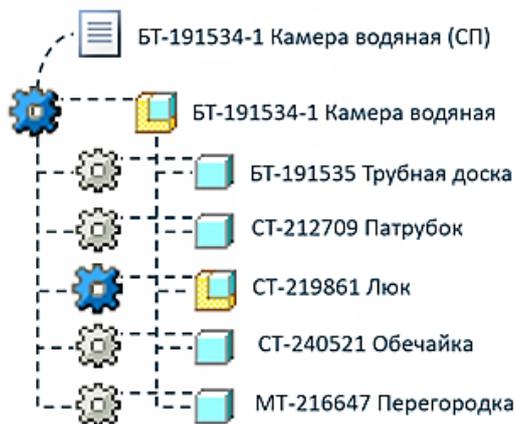


Рисунок 4.4 – Пример конструкторской структуры «Камеры водяная» со связанными CAD-документами

- генерировать библиотечные элементы из специализированных модулей с атрибутивной информацией для выгрузки в библиотеки PLM-системы. Пример стандартного библиотечного элемента, выгруженного в PLM-систему представлен на рисунке 4.6.

Вся структура изделия строится из элементов – частей структуры, символизирующих детали, сборки, стандартные и прочие изделия, материалы. Покупные элементы (стандартные, прочие изделия, материалы и другие библиотечные элементы) применяются во множестве структур, поэтому особенно важно для элементов с широкой применяемостью иметь уникальную запись, однозначно характеризующую данный элемент. По итогам внедрения на УТЗ методологии управления составом изделия был определен и формализован:

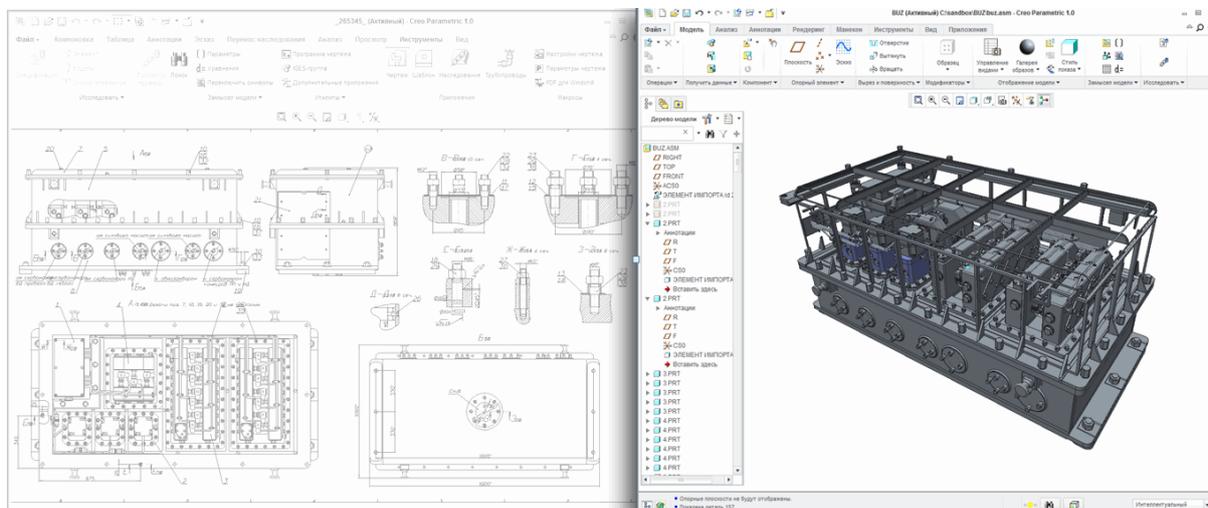


Рисунок 4.5 – Примеры ассоциативного чертежа и 3Д-модели «Блока управления и защиты»

- перечень составов, разрабатываемых в ходе создания изделия (структура требований, структура функций, конструкторский состав, логистический состав, структура эксплуатационной документации, технологический состав и др.);
- порядок и правила формирования составов изделия и создания связи между ними;
- порядок присвоения обозначений и наименований составам изделия;
- порядок и правила согласования и утверждения составов изделия.

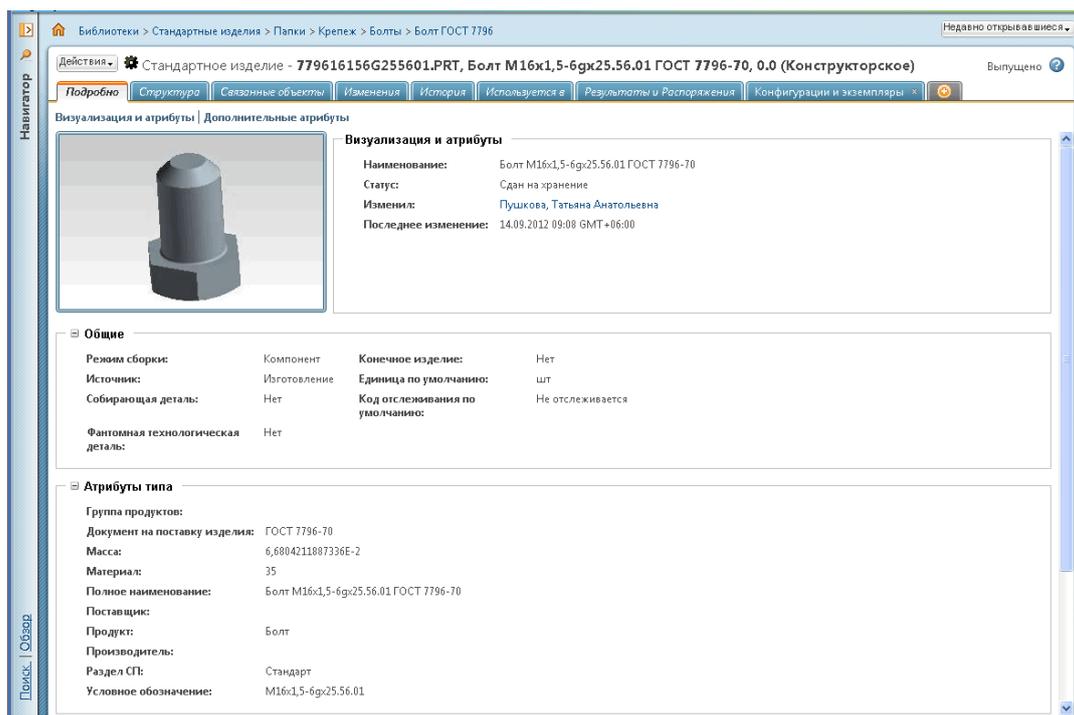


Рисунок 4.6 – Пример стандартного библиотечного элемента, выгруженного в PLM-систему

Также в рамках цифровой трансформации на УТЗ была внедрена другая методология работы с функционалом управления требованиями в PLM-системе. Методология включает порядок и правила:

- присвоения обозначения и наименования структуры требований в системе;
- разработки структуры требований в системе;
- согласования и утверждения структуры требований в системе;
- внесения изменений и корректировок в структуру требований;
- формирования технического задания из структуры требований;
- трассировки требований на детали и сборочные единицы;

- валидации и верификации требований.

Методология включает и учитывает:

- правила присвоения обозначения и наименования структуры функций и логической структуры изделия;

- порядок и правила создания структуры функций и логической структуры;

- основные подходы к разработке структуры функций и логической структуры изделия;

- правила согласования, утверждения и внесения изменений в структуру функций и логическую структуру изделия;

- правила трассировки требований на функциональную и логическую структуры, а также трассировки функций и логики на элементы электронной структуры изделия;

- порядок разработки моделей систем изделия и изделия целиком, а также их связь со структурами функций и логики;

- порядок анализа результатов системного моделирования.

Параллельно с решением таких задач в технологических службах завода проводилась опытная эксплуатация PLM-системы в части ТПП, в рамках которой решались вышеперечисленные задачи на текущем заказе на производство и поставку паротурбинной установки типа Т-63/76-8,8.

В ходе опытной эксплуатации этапа ТПП была решена задача по построению и внедрению технологической структуры изделия. Отличия конструкторской структуры от технологической представлены на рисунке 4.7 на примере диафрагмы 17-й ступени паровой турбины типа Т-63/76-8,8.

Технологическое представление структуры изделия имеет следующие особенности по сравнению с конструкторским:

- отражает процесс производства и сборки изделия – содержит узлы и под сборки, физически существующие в производстве (можно «расцеховать», можно собрать, можно спланировать);

- содержит позиции, не касающиеся конструкции (испытания, работы по демонтажу);

- не содержит узлы, не существующие в производстве (конструкторские

организационные сборки и комплекты распределены по реальным физическим сборкам);

- содержит фактический производственный состав изделия с учетом потребности на регулировку и сборку;

- содержит материалы и технологические детали, необходимые для производства изделия (наплавленный металл заменен на реальную марку электрода с реальной нормой расхода).

Так выстроенная работа с конструкторскими и технологическими структурами в едином информационном поле позволяет раньше полного завершения КПП начать параллельную работу конструкторов и технологов. При этом для эффективной работы, позволяющей сократить продолжительность КПП и производства, необходимо разработать и внедрить:

- правила иерархии структур изделий;

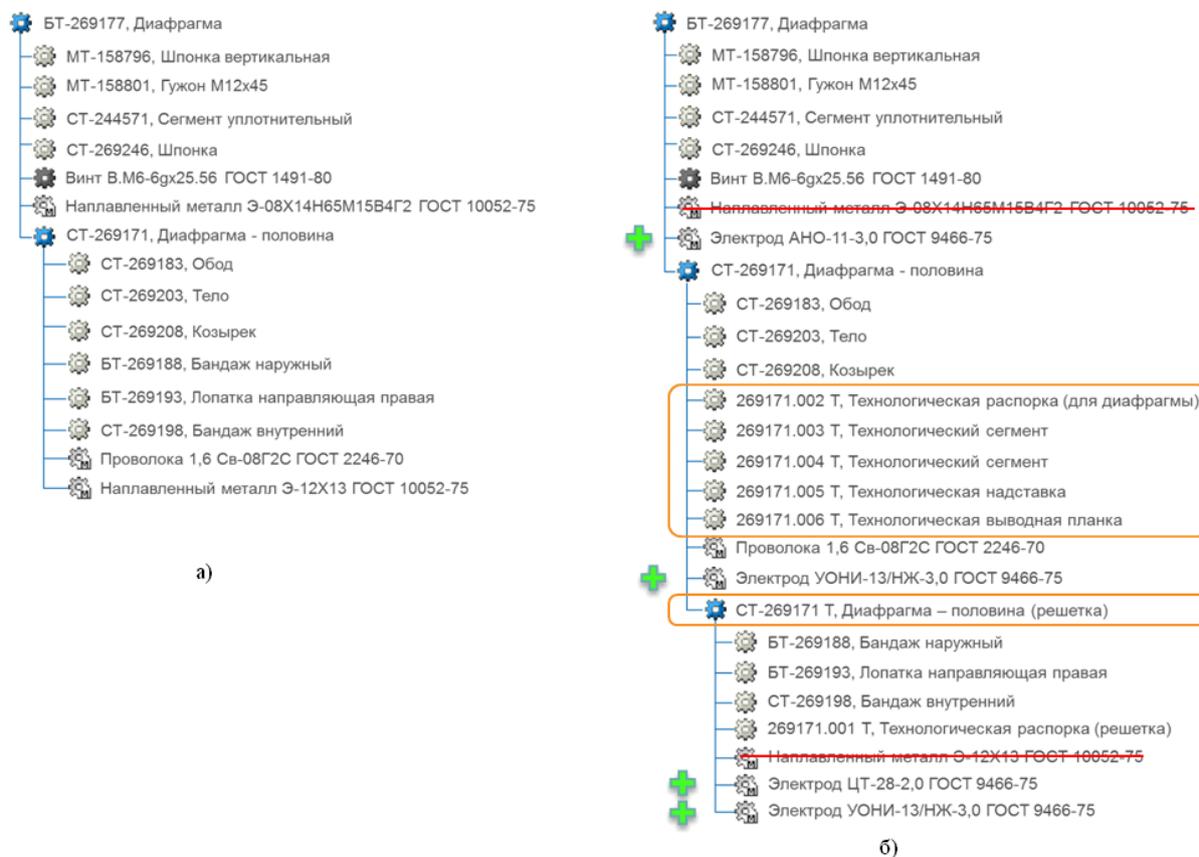


Рисунок 4.7 – Различие структур изделий в конструкторском и технологическом представлении на примере диафрагмы 17-й ступени турбины типа Т-63/76-8,8: а) конструкторское представление; б) технологическое представление

- выполнение конструкторами при КПП требований технологов к 3Д-моделям;

- правила выпуска конструкторских и технологических структур изделий для запуска работы сначала технологов, а затем закупщиков и производства.

Построение структуры паротурбинной установки и паровой турбины в ее составе требует учитывать правила построения базовой структуры и внедрение модульной концепции.

Разберем «старые» традиционные подходы к КПП и обозначим вектор развития инструментов и подходов к КПП.

Первоначально до появления САПР процессы концептуального проектирования, все этапы КТПП были разработаны для единственно доступной на то время, до 90-х годов, возможности выражения идей, направленной на оформление и выпуск документации на бумажном носителе. Технологии, применяемые в промышленности, также диктовали существенные ограничения для предоставления информации в производство. Юридически значимыми подлинниками были бумажные документы, которые применялись для обмена информацией между участниками процессов.

С появлением вычислительной техники и САПР, а в дальнейшем и персональных компьютеров, многие процессы и подходы КТПП были перенесены и автоматизированы с помощью специального программного обеспечения, но суть принципиально не изменилась – вычислительная техника использовалась, как «электронный кульман», который снимал рутинные операции ручного построения видов и разрезов на чертежах, помогал в ручном составлении спецификаций и прочих конструкторских документов. Юридически значимыми документами тогда оставались бумажные подлинники.

С появлением станков с ЧПУ возникла необходимость в 3Д-моделях как основном источнике геометрической информации для технологической подготовки производства, в том числе разработки управляющих программ, а также для использования в качестве эталона для контроля деталей на контрольно-измерительной машине (КИМ). Это стимулировало повсеместное

развитие САД-программ, направленных на построение 3Д-моделей, что позволило разрабатывать все более сложные изделия, сокращая время на создание проекционных видов и разрезов с 3Д-моделей автоматизированным способом, искать ошибки и коллизии по пересечению тел после моделирования и т.д. Но в дальнейшем создание сдаваемой документации сводилось к оформлению чертежей по традиционной технологии и печати документации на бумажные носители. Подлинником оставался чертеж, что ставило бессмысленным поддержание 3Д-моделей в актуальном состоянии и приводило к «двойному» разрыву информации: 3Д-геометрия – чертеж в электронном виде – бумажный чертеж, так как на каждом шаге информация могла измениться и изменялась без обновления источника: при согласовании правки могли вноситься непосредственно на бумаге, а при изменении файла чертежа не актуализировалась 3Д-модель. 3Д-модель не имела статуса и не могла быть передана потребителям, так как никто не гарантировал ее корректность соответствия бумажным подлинникам.

Все описанное выше свойственно и развитию УТЗ, на котором в конце 90-х годов начали внедряться САПР на персональных рабочих местах СКБт, а до этого вычислительной техникой пользовались для проведения тепловых и прочностных расчетов на рабочих местах в научно-исследовательских институтах Уральского отделения РАН. В 2003 году было образовано бюро нового проектирования и бюро САПР, а в 2004 году – целая дирекция, развивающая САПР. Для этого этапа развития характерно появление и внедрение совместно с УрФУ инженерного анализа в САЕ-пакетах [29-32] и применение станков с числовым программным обеспечением. 3Д-моделирование производится «снизу-вверх», когда сборочные единицы собираются из отдельно спроектированных деталей. Анализ возможен постфактум. Изменения проводятся в ручном режиме, что не гарантирует отсутствия ошибок, пропущенных в силу сложности конструкции.

Конечно, развитие подходов и принципов КПП, а также внедрение средств и инструментов эволюционировало, но далеко от «автоматизации» КПП не ушли за исключением отдельных улучшений, связанных с наполнением библиотек наработок 3Д-моделей по паровым турбинам и

элементам компоновок ПТУ. К 2010 году УТЗ прошел уровень цифровой зрелости «Управляемый» и перешел на уровень «Стандартизованный» по шкале оценки уровня цифровой зрелости энергомашиностроительного предприятия, разработанной одним из авторов на основании известных шкал и представленной в таблице 2.2.

Потребность предприятия как бизнеса, развитие инженерных программ, производственных технологий, а также вычислительной техники дает возможность коренного изменения подходов к проектированию. На данном этапе характерна трансформация процессов КТПП, направленная на получение ЦМИ, определяющего необходимый облик высокотехнологичного изделия, полностью соответствующего будущему физическому образцу, с возможностью влияния на его параметры с целью симуляции и оптимизации конструкции в целом на всех жизненных стадиях. Помимо осознанной оптимизации технических характеристик под целевые показатели, например, КПД, возможно применение принципиально новых технологий, например, аддитивных, направленных на получение новых потребительских качеств изделий, а также стоимостных характеристик. При применении вышеперечисленных технологий конструкционные решения могут не ограничиваться формами, пригодными для отображения традиционными способами вывода информации на чертеж.

Цифровая трансформация меняет продукт, бизнес-процессы предприятия, ее позиционирование, это отличает понятие «цифровая трансформация» от «автоматизации», которая что-то улучшает, но сохраняет способ ведения дел.

Повторим целевые положения и технологии «цифровой трансформации» предприятия в части КПП:

- подлинником является ЦМИ;
- бесчертежные технологии;
- системная инженерия и управление требованиями;
- сквозное нисходящее проектирование;
- выстроенные ассоциативные связи по всем процессам подготовки производства;

- инженерные расчеты развиваются до стадии виртуальных испытаний;
- многокритериальная оптимизация конструкции (оптимизация модулей/подмодулей и их сборка в оборудование);
- процессы протекают в цифровом виде;
- управление конфигурацией изделия.

Для осуществления проекта цифровой трансформации на предприятии выполняется обследование с целью оценки текущего состояния цифровой зрелости и уровня использования в КПП инструментов и подходов с анализом возможности реализации идей трансформации и достижения заложенных бизнес-целей.

Не погружаясь в детали проведения такого обследования, приведем результаты обследования НЗЛ/РЭПХ, выполненного в 2022 году в части КПП, проводимой перед реализацией проекта разработки и внедрения Концепции трансформации, которая затрагивает и цифровую часть, и суть ведения КПП на предприятии. При этом предприятие должно «шагнуть» с уровня цифровой зрелости «Управляемый», на котором процессы повторяющиеся, и между ними формируются четкие границы по единой методологии, что позволяет повторять успешные решения, пропуская «Стандартизованный», на котором процессы и ресурсы документированы, стандартизованы и интегрированы, что позволяет управлять ими на всех уровнях комплексно, так как переход на этот уровень не даст должного скачка развития процессов и инструментов, а также не позволит реализовать полноценно модульные подходы к конструированию на уровень «Предсказуемый». На этом уровне процессы, способности и эффективность контролируются и управляются на основе количественных параметров, и возможно будет полномасштабно перейти на модульный принцип КПП с полностью цифровыми средствами и инструментами управления ЖЦИ. Также при реализации такой концепции закладываются основы к переходу на следующий высший уровень по шкале «Инновационный», на котором идут непрерывные совершенствования бизнес-процессов, планирование и внедрение инноваций, что становится культурой, и все выполняется с использованием математических моделей.

На рисунке 4.8 представлена оценка уровня методологической зрелости НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам КПП.



Рисунок 4.8 – Оценка уровня методологической зрелости НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам КПП

На рисунке 4.9 представлена оценка уровня инструментов НЗЛ/РЭПХ, используемых для решения ключевых задач КПП.

На рисунке 4.10 представлена оценка уровня бизнес-процессов КПП на НЗЛ/РЭПХ, которая по результатам совпала с оценкой уровня инструментов.

Конечно, по результатам обследования выявлены проблемы процессов, инструментов и подходов КПП, но на стадии «автоматизация» их практически невозможно избежать, так как уровень цифровой зрелости не позволяет обеспечить их совершенство, которое возможно достичь на современном уровне техники и ПО.

Основные проблемы касаются следующего:

- подлинником разработанной конструкторской документации являются чертежи;
- конструкторская документация создается путем прямого копирования;
- разрозненное электронное согласование в разных форматах данных;



Рисунок 4.9 – Оценка уровня инструментов, используемых на НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам КПП

чертежи в «легком» САПР; чертежи в «тяжелом» САПР, выполненные по моделям; чертежи, конвертируемые в формат PDF. По маршруту согласования направляются все три формата данных, но проверяется только PDF;

- некачественное согласование – несоответствие атрибутивной и содержательной части: основная надпись чертежа с подписантами формируется до отправки на согласование и не обновляется по фактическому прохождению этапов: возможна ситуация, когда документ подписывает один сотрудник, но на чертеже стоит фамилия другого исполнителя;

- управление замечаниями и изменениями: текстовые замечания вносятся в комментарий к процессу, а графические замечания пересылаются по почте в отрыве от согласуемого объекта;

- планирование КПП происходит в ручном режиме в ПО, не связанном с САПР: графики не связаны между собой и с результатами деятельности, так как происходит ручной сбор и обновление данных;

- в базу PDM вносятся все приобретаемые ДСЕ, в том числе не используемые в основной продукции, например, запасные части для ремонта оборудования, поставляемого в рамках сервисных контрактов. Таким образом,



Рисунок 4.10 – Оценка уровня процессов КПП на НЗЛ/РЭПХ

конструкторам доступны неиспользуемые «мусорные» записи в PDM, что приводит к дублированию записей;

- формирование специализированных отчетов по разрозненным бизнес-процессам в рамках конкретной роли, что приводит к разрозненности бизнес-процессов и затруднению получения сводных интегрированных отчетов;

- размыты границы между этапами проектирования, по результатам которых не проводятся научно-технические советы, позволяющие принять концептуальные решения по конструкции, согласовав отдельные решения с заказчиком, генеральным проектировщиком или смежными подразделениями предприятия;

- работа с большими сборками осуществляется без применения специальных инструментов и методик, заложенных в «тяжелый» САПР;

- новые конструкции новых проектов разрабатываются на основании ранее разработанных аналогов вручную без средств автоматизации;

- при разработке изделия не создаются связи функциональных, логических, принципиальных схем с конструкцией оборудования и между собой;

- при формировании составов применяются последние утвержденные

версии документации, а методики и инструменты конфигурирования не применяются;

- управление требованиями производится в рамках ручного отслеживания в текстовых документах технических заданий, а при разработке головной конструкции оборудования работа с ТЗ проходит без связи с его требованиями;

- обозначение документации выполняется сквозной нумерацией в соответствии с классификатором ЕСКД, что не позволяет ДСЕ соотносить с конструктивными группами;

- проточная часть и продольный разрез основного турбинного и компрессорного оборудования выполняется в «легком» САПР, что не позволяет использовать наработки в качестве исходных данных для трехмерной параметрической модели всей конструкции оборудования с возможностью распараллеливания разработки отдельных составных частей оборудования;

- тепловые, газодинамические, прочностные и междисциплинарные расчеты производятся в отрыве от разработки модели оборудования (нет связи по параметрам между результатами расчетов, то есть не разработаны и не используются специализированные расчетные автоматизированные рабочие места (АРМ));

- составные части часто разрабатываются независимо друг от друга с «визуальной» ориентацией на их соединение, что приводит к низкой степени увязки ДСЕ, большому количеству извещений об изменении с высокой трудоемкостью на проведение глобальных изменений;

- изделия разрабатываются «вручную» без использования конструкторских АРМ с библиотекой параметрических моделей и шаблонов;

- разрабатываемые 3Д-модели не отправляются на первичное согласование на технологичность;

- сварные швы проектируются традиционным способом с доработкой чертежей, полученных по моделям, и не учитываются в самих 3Д-моделях;

- при разработке 3Д-моделей типовые элементы (проточки, профили и т.п.) делаются «вручную» без использования базы стандартизированных

нормализованных элементов;

- прокладка трубопроводов, электрических кабелей и жгутов производится «вручную» без автоматизации маршрутизации, что не позволяет создавать трассы по заданным правилам автоматизированно и проводится точный расчет количества материала;

- покрытия указываются «вручную» в виде технических требований без возможности в дальнейшем автоматизации создания техпроцесса.

Однако из результатов оценки видно, что информационная система на предприятии находится на достаточно высоком уровне зрелости автоматизации традиционных подходов КПП, то есть применение технологий, направленных на выпуск документации в виде чертежей и дальнейшая «оптимизация автоматизации», не сможет дать переход на качественно новый уровень и, как следствие, не представляется возможным достижение бизнес-целей и целевых технико-экономических показателей оборудования и КПП. Аналогичные выводы после прохождения этапов внедрения инструментов автоматизации КПП были сделаны в 2015 году на УТЗ. При этом на УТЗ на более высоком уровне зрелости находились все процессы взаимодействия между участниками процессов разработки и подготовки производства оборудования, система управления конфигурациями и система управления изменениями, так как все это было внедрено в рамках выполненного проекта автоматизации. Поэтому результаты аналогичного предпроектного обследования показали необходимость движения к новым более амбициозным целям реализации «цифровой трансформации».

Часть проблематики и ограничение возможностей всегда связаны с используемой на предприятии техникой, которая ограничивает количество высокопроизводительных мест, используемых для работы с большими сборками, инженерным анализом, хранением больших данных и другими процессами, требующими значительных вычислительных ресурсов.

Целевая модель КПП оборудования в рамках проектов «цифровой трансформации» реализовывает следующие основные принципы:

- процессы разработки и подготовки производства изделия, внедренные на предприятии, будут пересмотрены и изменены для достижения целей. Все

процессы, связанные с разработкой и подготовкой производства оборудования, предполагается выполнять под управлением системы PLM (Product Lifecycle Management, то есть управление ЖЦ продукта). При этом все программные продукты, используемые для разработки изделия, будут интегрированы в систему PLM;

- развитие процессов проектирования предполагается реализовывать при помощи концепции сквозного нисходящего ассоциативного проектирования с ранних стадий разработки изделия. При этом на начальных этапах разработки изделия будет развиваться использование подходов системной инженерии и системного моделирования. Результаты системного проектирования и системного моделирования будут использованы в качестве исходных данных для разработки БС изделия на уровне связей через параметризованные шаблоны;

- все процессы взаимодействия между участниками процессов разработки и подготовки производства изделия будут формализованы и описаны, а также реализованы посредством рабочих процессов в PLM, в том числе и в части планирования работ;

- будет внедрена система управления конфигурациями, и развита система управления изменениями;

- все технические требования к изделиям будут как можно более формализованы в рамках системы CAD/PLM, с приоритетом к объектно-ориентированному определению технических требований;

- конструкторская документация разрабатывается в электронной форме в системе PLM на основе геометрических моделей изделия;

- технологическая документация разрабатывается в электронной форме в системе PLM на основании электронных моделей деталей и сборочных единиц (при этом для сборочных единиц будет развиваться использование интерактивных сборочных технологических процессов в связке с технологическим процессом в системе PLM, а для деталей будут разрабатываться технологические процессы в PLM с 3Д-технологическими эскизами, разработанными на основании электронных моделей и ассоциативно с ними связанными);

- вся вновь разрабатываемая конструкторская и технологическая документация будет электронной, бумажная документация разрабатывается в качестве исключения в технически обоснованных случаях, но ассоциативно связана с электронными моделями или электронными документами;

- для организации работы с данными общего применения используется информационная система НСИ. Прочие информационные системы предприятия интегрированы с информационной системой НСИ и используют хранящиеся в ней данные общего применения;

- взаимодействие с внешними организациями в части передачи конструкторской и технологической документации для согласования предполагается организовывать с использованием технологии 3Д в формате PDF или нейтральных форматов в соответствии с ИСО.

Развитие процессов проектирования заключается в освоении и применении новых подходов в части «ассоциативного нисходящего контекстного» проектирования, а также выстраивания сквозного неразрывного процесса проектирования изделия начиная от замысла и заканчивая передачей документации на этап подготовки производства в среде системы управления ЖЦИ.

В рамках развития цифрового процесса концептуального проектирования после завершения создания виртуальных интегрированных моделей и проверки функционирования систем изделия структура требований и архитектурные модели декомпозируются на концептуальное представление изделия, которым является базовая структура (БС), представляющая собой сборку в САД-системе, содержащая информацию для проработки, согласования, утверждения и изменения информации о базовой геометрии основных составных частей проектируемого оборудования, их относительном пространственном положении и геометрических взаимосвязей между ними начиная с ранних стадий ЖЦИ. Все работы по созданию БС и проведению изменений в ней проводятся в рабочем пространстве системы PLM и САД. БС служит для координации работы больших групп конструкторов путем отделения критерия верхнего уровня от подробностей конструкции. БС является управляющей структурой по отношению к ЦМИ.

На рисунке 4.11 представлен показательный пример БС паровой турбины типа К-100-8,8 ЛМЗ, выполняемой пилотно по проекту цифровой трансформации.

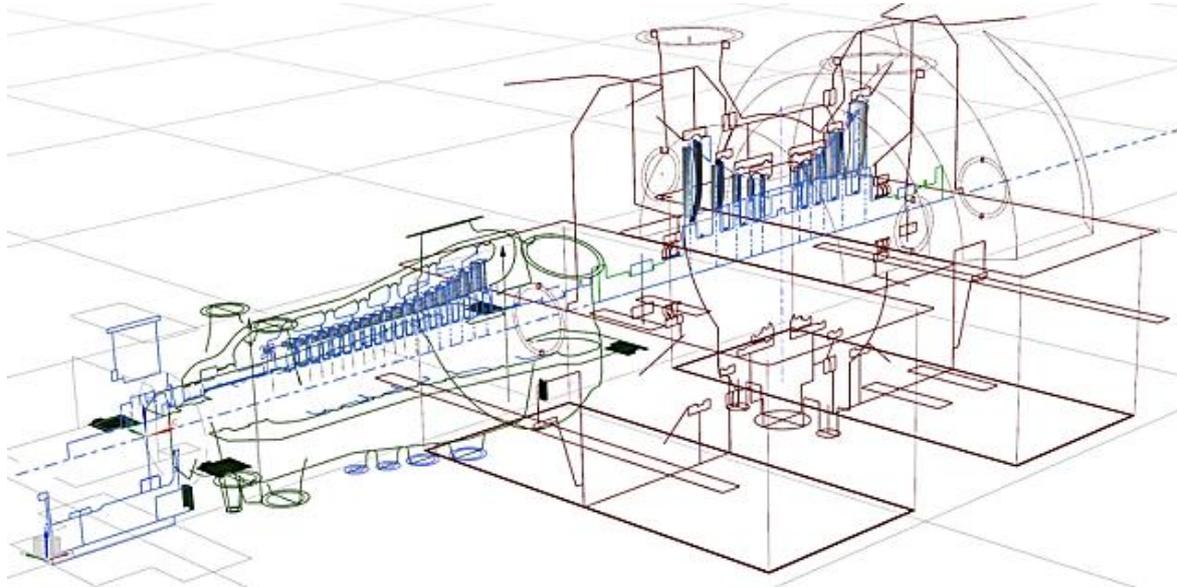


Рисунок 4.11 – Базовая структура паровой турбины типа К-100-8,8 ЛМЗ

БС создается на начальном эскизном этапе проектирования и отражает конструкторские требования, которые можно выразить в виде геометрии. Например, абсолютные системы координат проекта и агрегатов, базовые плоскости, оси и системы координат, размеры и допуски пространственного расположения между ними, габаритные модели и расположения применяемых узлов и агрегатов с указанием допусков формы и расположения элементов стыковки с ними и т.д.

БС выполняет несколько дополнительных функций:

- содержит минимально достаточную исходную информацию для разработки рабочей конструкторской документации;
- осуществляет управляющую функцию по отношению к ЦМИ;
- обладает свойством интеллектуальности.

Касательно интеллектуальности БС – это такое свойство, которое позволяет за счет широкого использования ассоциативности, функций и параметризации заложить возможность автоматизированной обработки изменений, которые могут происходить как в результате итерационного поиска при проектировании конкретного изделия, так и заложить правила, которые позволят формировать БС на целый модельный ряд или класс. За счет

наличия управляющей функции по отношению к ЦМИ можно управляемо провести изменения в ЦМИ, то есть множество логических отношений.

Вышеописанные подход и принципы позволяют:

- проектировать целые модельные ряды или классы оборудования, получая БС под конкретную модель путем изменения глобальных параметров и переменных в 3Д-модели оборудования, что особенно актуально при проектировании новых модельных рядов, классов или целых ограниченных номенклатурных рядов;

- управляемо проводить изменения на уровне БС-ЦМИ и быстро, без дополнительной «переувязки» получать ЦМИ на новые экземпляры ряда.

Кроме всего описанного выше, возможно включать в БС все базы для позиционирования ДСЕ и выполнять на основе этой информации анализ размерных цепей на этапе концептуального проектирования.

БС используется всеми участниками процесса КПП на всех этапах разработки для:

- определения основных осей, плоскостей, систем координат и т.д. разрабатываемого изделия и задания требований к точности их взаимного расположения;

- определения основных осей, систем координат и других базовых элементов отдельных узлов и агрегатов, и задания требований к точности их расположения относительно основных осей и систем координат изделия;

- резервирования пространства под узлы и агрегаты;

- определения, задания пространственного положения узлов и агрегатов с учетом сборки оборудования;

- определения взаимосвязи узлов и агрегатов между собой, схем базирования, точности взаимного расположения, допусков размеров основных размерных цепей;

- задания и согласования обстановки проектируемого оборудования;

- задания размеров и согласования положения и габаритов различных соединений составных частей (модулей/подмодулей), например, фланцев;

- управления концептуальной разработкой изделия путем анализа и сравнения альтернативных решений;

- публикации и привязки в общее пространство основополагающих исполнительных поверхностей, например, теоретических поверхностей дисков, колес и осей;

- задания кинематических схем;

- задания на трассировку, коммуникации и резервирование места для их прокладки;

- задания зон досягаемости и безопасности при монтаже, пусконаладке, эксплуатации и обслуживании;

- оценки трудоемкости проведения изменений на различных стадиях проектирования;

- проведения изменений на концептуальном уровне;

- клонирования типовых структур и адаптации их для различных проектов.

Так как проработка конструкции изделия на всех этапах проектирования (эскизно-технический проект, технический и рабочий проекты) проводится с использованием БС, то все этапы проектирования связаны друг с другом посредством ассоциативных связей.

Проектирование в соответствии с приведенной идеологией позволяет:

- осуществлять параллельное рабочее проектирование в актуальном контексте всего проектируемого оборудования;

- гибко автоматизированно и контролируемо проводить изменения в процессе проектирования оборудования;

- исключить вероятность порчи подлинника конструкторской документации некорректными действиями исполнителей;

- проектировать несколько тел в одном рабочем компоненте, гибко управлять количеством тел в рабочем компоненте (в том числе с помощью функций), а уже после окончания проектирования, после принятия окончательного конструктивного решения размещать каждое тело в отдельный компонент посредством ассоциативных связей;

- гибко менять структуру ЦМИ без разрыва ассоциативных связей между рабочей и результирующей 3Д-моделями ДСЕ в случае перемещения компонента, например, из одной сборки внутри ЦМИ в другую;

- гибко прорабатывать несколько конструктивных вариантов с возможностью в любой момент времени на любом этапе проектирования вернуться к любому из вариантов;

- гибко управлять обозначением и наименованием компонентов. Обозначение и наименование рабочих частей может быть произвольным, в том числе автоматически назначаемым. Окончательное наименование компонентов производится для результирующих частей;

- защитить интеллектуальную собственность предприятия при передаче ЦМИ в сторонние организации, так как передается только ЦМИ и не передается история построений, параметризация, ассоциативные связи и исходные данные в виде БС. Все интеллектуальное содержание находится в структурах БС-ЦМИ, которые остаются в конструкторском подразделении и не передаются на этап ТПП.

- удобство отработки и проведения изменений за счет возможности тестирования изменений в «изолированном» ЦМИ без влияния на «боевой» ЦМИ.

Важным принципом при выполнении КПП паровой турбины является организация взаимодействия конструкторов с расчетными подразделениями, поэтому в рамках проекта цифровой трансформации и с описанной выше концепцией создания ЦМИ на УТЗ также поэтапно с 2015 года реализуется проект создания «Единого расчетного комплекса» (ЕРК). Объединение имеющихся методик, алгоритмов, наработанных баз аналитических расчетов, численных расчетов, включая расчетные АРМ и оптимизационные АРМ в единый комплекс, позволит выполнять «сквозные» расчеты как при конкурсных проработках, так и при рабочем проектировании турбин. ЕРК обеспечивает выполнение «обликовых» исследований, тепловых балансовых расчетов, тепловых расчетов с подбором ступеней, прямых и обратных прочностных расчетов, моделирование теплового состояния, моделирование напряженно-деформированного состояния, моделирование газодинамических процессов и вибрационных расчетов, а также выполнение сложных многофакторных оптимизационных задач.

Тем самым на УТЗ поэтапно реализовывается создание информационной среды предприятия, включающей в себя: программные, технические и организационные составляющие, позволяющие выполнять «сквозную» разработку оборудования с применением нисходящего и модульного проектирования, расчетов (тепловые, прочностные, газодинамические, вибрационные) и интеграцию с существующей системой управления инженерными данными с использованием ЦМИ, выполненной на современных программных решениях: междисциплинарные расчеты → КПП → ТПП → производство на ПО станков с ЧПУ → контроль изделий на КИМ.

Контрольные вопросы к главе 4

1. Назовите основные принципы целевой модели КПП оборудования в рамках проектов «цифровой трансформации» промышленного предприятия.
2. Перечислите целевые положения «цифровой трансформации» предприятия в части КПП.

ГЛАВА 5. ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Максимальный уровень цифровизации подготовки производства и изготовления энергетического оборудования возможно добиться при оптимальной его конструкции, которая достигается использованием модульной концепции. При конструкторской подготовке производства оборудования необходимо закладывать модульный принцип создания с одновременной цифровой трансформацией предприятия: внедрение управления ЖЦИ, инструментов инженерного анализа, цифрового макета изделия с приданием твердотельным моделям статуса альтернативного подлинника, ассоциативных связей на едином информационном поле, формированием библиотек НСИ и модулей.

Опыт реализации проектов по созданию паровых турбин показал, что для достижения максимального развития разработки, производства и сопровождения паровых турбин и турбоустановок необходимо уделять внимание решению задач по каждому из этапов стратегической идеологии.

Аналогично экспериментальному исследованию предшествует изготовление экспериментального стенда и измерительных участков заданной формы. Первым этапом расчетно-аналитического исследования является построение и задание области исследования с разделением геометрических элементов на используемые в исследовании и неиспользуемые.

Геометрия 3Д-модели для построения расчетной модели с сеткой была ранее построена в САД-системе с учетом конструкторских проработок, а затем импортирована в САЕ-систему. Внешний вид расчетной модели типового внутреннего корпуса паровых турбин УТЗ в САЕ-системе представлен на рисунке 5.1.

Такая модель, детально отражающая геометрию и воспроизводящая условия, фактически является численным экспериментом с описанием того или иного физического явления к заданной расчетной области с целью получения в качестве результата значений параметров в определенных точках расчетной модели.

Подобное моделирование физических процессов в современных реалиях создания паровых турбин является обязательным действием этапа КПП, что

позволяет выполнять различные исследования, включая междисциплинарные, и избежать ошибок при конструировании, повысить эффективность работы оборудования, а главное, избежать большого объема длительных и затратных натурных экспериментов. Последнее обстоятельство является наиболее важным, поскольку измерения параметров при натурных экспериментах представляют не просто большую сложность – иногда такие измерения практически невозможно осуществить, в особенности при моделировании и исследовании вращающихся элементов проточной части, исследованием и оптимизацией которых авторы также занимались в рамках трудовой деятельности [29, 30, 33].

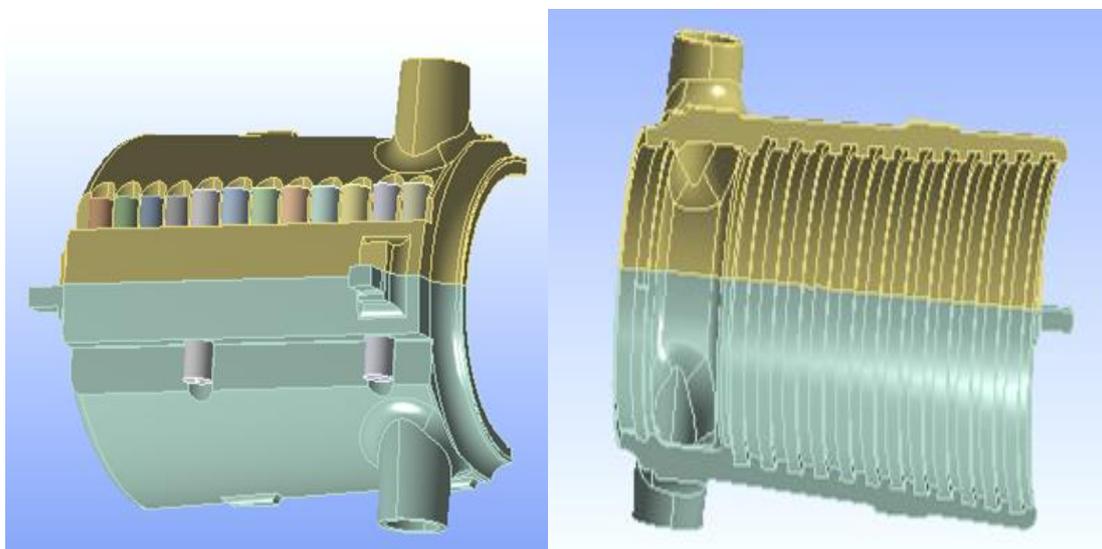


Рисунок 5.1 – Внешний вид расчетной модели унифицированного типового внутреннего корпуса паровых турбин УТЗ

Такие исследования сталкиваются с быстроизменяющимися параметрами, снятием параметров со вращающихся элементов турбины, измерением прямых и косвенных параметров без внесения отклонений в поток, что требует значительного инструментального натурального оснащения, а также вынуждает использовать допущения, приводящие к значительным упрощениям, снижению качества и точности эксперимента.

Необходимо отметить, что такие численные инженерные исследования конструкций следует выполнять с глубокой интеграцией CAE-расчетов в CAD-системы, что не только упростит процесс исследования и сократит затраты на него, но и позволит с учетом заложенной параметризации моделей

и налаженных ассоциативных связей использовать такое АРМ для последующих разработок оборудования и оптимизации модулей, а также для совершенствования последующих этапов ЖЦ оборудования. Вот только часть примеров:

- отработка режимов работы в процессе эксплуатации оборудования по итогам выполнения тепловых, прочностных и вибрационных задач;
- разработка критериев систем мониторинга, прогностики и диагностики оборудования;
- решение оптимизационных задач для повышения показателей технологичности ДСЕ и модулей;
- модернизация/замена ДСЕ и модулей при модернизации или реновации оборудования.

Решение таких задач по совершенствованию конструкции и функционирования оборудования на этапе КПП как раз позволяет «устраивать принцип домино» с положительным эффектом на всем протяжении ЖЦ, а описанный выше подход с параметризацией и ассоциативными связями только приводит к преумножению эффекта от положительных результатов проведенных расчетно-аналитических исследований.

В большинстве случаев структура расчетного исследования состоит из следующих ключевых этапов:

- разработка 3Д-модели с геометрией исследуемого пространства (расчетной области);
- построение расчетной сетки;
- разработка и задание граничных условий;
- решение задач исследования;
- получение и обработка результатов исследования.

Такие этапы иногда требуется итерационно зациклить с целью уточнения граничных условий или оптимизации геометрии.

Аналогичные инженерные расчеты в САЕ-пакетах, в самописных модулях и верифицированных программах с заложенными апробированными валидированными методиками реализуются на УТЗ в рамках выполнения стандартных типовых и индивидуальных специализированных расчетов с

целью разработки, модифицирования, модернизации и оптимизации ДСЕ, стандартных библиотечных модулей и паротурбинного оборудования в целом. По возможности для ходовых элементов и расчетов создаются АРМы с потенциалом связывания по смежным расчетам и объединением в дальнейшем их в Единый расчетный комплекс.

С точки зрения анализа идеологических основ и систематизации подходов к конструкторско-технологической подготовке производства энергомашиностроительных предприятий необходимо говорить об актуальности и важности цифровой трансформации таких предприятий с одновременной разработкой и внедрением методологии модульного принципа разработки и производства основного и вспомогательного оборудования. При этом закладывание таких наукоемких принципов на этапах КТПП оборудования позволяет получить значительный экономический эффект на всех этапах ЖЦИ, то есть в том числе на стадиях: закупка, логистика, производство, эксплуатация, сервис, реконструкция объекта использования, модернизация оборудования, частичная и полная утилизация. Авторами показано, что чем детальнее проработаны используемые принципы, тем больший экономический и временной эффект в цикле достигается от внедрения, и больших технико-экономических показателей оборудования удастся добиться.

Каждый раз при совершенствовании или кардинальном перестроении модели процессов проектирования изделия, изменении инструментов и средств конструкторско-технологической подготовки производства и управления ЖЦ оборудования формулируются цель и задачи такого изменения или целого проекта трансформации. О таких целях и задачах можно говорить на каждом этапе развития энергомашиностроения, каждый из которых, в свою очередь, связан с рядом событий или проводимых мероприятий. Например, переход от единичного индивидуального производства к серийности с типовыми подходами, переход на управление процессами и ресурсами задокументированными, стандартизованными регламентами, формализующими управление ими на всех уровнях комплексно, переход с «кульмана на персональные компьютеры», внедрение

САПР и т.д. Каждое такое событие и мероприятие имело образмеренные целевые состояния, которые как раз описывались их целями и задачами. Проекты постановки на производство цифрового макета изделия (ЦМИ), или в других проектах он назывался электронным макетом изделия (ЭМИ) с внедрением цифрового процесса управления ЖЦИ, укрупненно на первых этапах ставит перед собой следующие ключевые цели, на результатах достижения которых базируются следующие проекты развития управления ЖЦИ от производства до сервиса:

1. Сокращение продолжительности КТПП нового изделия на 30%;
2. Повышение качества конструкторской и технологической документации;
3. Повышение качества продукции;
4. Сокращение количества изменений конструкторской документации по причинам конструкторских и технологических ошибок в 3 раза;
5. Сокращение отклонений от конструкторской и технологической документации в производстве по причинам конструкторских и технологических ошибок в 3 раза;
6. Повышение качества планирования конструкторских и технологических работ;
7. Внедрение управления конфигурациями изделия;
8. Автоматизация использования библиотек НСИ;
9. Повышение качества эксплуатационной документации;
10. Повышение вовлеченности и компетенций инженерного персонала.

Достижение этих целей, безусловно, позволяет повысить конкурентоспособность выпускаемой предприятием продукции, то есть конкурентоспособность предприятия в масштабах его потенциального рынка сбыта. Фактически мы говорим о цифровой трансформации, которая, как было обозначено выше, является фактором конкуренции государства и предприятия, которые смогут опередить других на этом пути и воспользоваться возможностями цифровизации в полной мере, становиться лидерами. Энергомашиностроительные предприятия находятся на

стратегическом фронте развития государств, поэтому они просто обязаны занимать лидирующие позиции в промышленности и в государстве в целом.

На самом деле обозначенные выше ключевые цели можно ставить при любой значимой трансформации процессов и средств КТПП как фундаментальных этапов ЖЦ оборудования, которые закладывают базовые улучшения и возможности для последующих изменений ЖЦИ.

Так изначально процессы концептуального проектирования, все стадии КТПП и были разработаны для единственно доступной в то время возможности выражения идей, направленных на разработку и выпуск документации в бумажном виде. Дальнейшее использование на следующих этапах ЖЦИ документации на бумажных носителях, имеющиеся в производстве технологические возможности диктовали существенные ограничения для эффективного обращения информации в производстве, эксплуатации и сервисе оборудования.

Обозначенные выше цели ставились перед предприятиями с появлением вычислительной техники (даже цель по снижению продолжительности выполнения КТПП ставилась на 30%), а в дальнейшем и персональных компьютеров (и снова на 30% снижение продолжительности разработки за счет уже не только инструментов, но и возможностей формировать, сохранять и использовать наработки и первые электронные архивы и библиотеки!). Тогда многие процессы и подходы КТПП были перенесены и с помощью САПР автоматизированы, но суть принципиально не изменилась – вычислительная техника в тандеме с САПР продолжала использоваться как «электронный кульман», который снимал рутинные операции ручного построения видов и разрезов на чертежах, помогал в ручном составлении спецификаций и других документов. Подлинниками оставались бумажные документы, применяющиеся для обмена информацией между участниками процессов промышленного предприятия.

С появлением станков с ЧПУ возникла необходимость в 3Д-моделях как основном источнике геометрической информации для разработки управляющих программ. Это стимулировало повсеместное развитие САД-программ, направленных на построение 3Д-геометрии, что позволило

разрабатывать все более сложные изделия, еще (!) сокращая время на создание проекционных видов и разрезов с 3Д-моделями автоматизированным способом, искать ошибки по пересечению тел после моделирования и многое другое, но в дальнейшем создание сдаваемой документации сводилось к оформлению чертежей по традиционной технологии и печати документации на бумаге. Подлинником оставался чертеж, что ставило бессмысленным поддержание 3Д-модели в актуальном состоянии и приводило к «двойному» разрыву информации: 3Д-модель – чертеж в электронном виде – бумажный чертеж, так как на каждом шаге информация могла и изменялась без обновления источника: при согласовании изменения могли вноситься непосредственно на бумаге, а при изменении файла чертежа не актуализировалась модель. 3Д-модель не имела статуса даже условного формального подлинника и не могла быть передана потребителям, так как никто не гарантировал ее корректность соответствия бумажным подлинникам.

Для подобного этапа развития в паротурбостроении характерно также активное использование САЕ-инструментов инженерного анализа и применение станков с ЧПУ. 3Д-моделирование оборудования при освоении САД-инструментов производится «снизу в вверх», когда сборочные единицы собираются из отдельно спроектированных деталей, а анализ конструкции производился постфактум. Изменения разработок проводились в ручном режиме, что не гарантировало отсутствие ошибок, пропущенных в силу сложности и наукоемкости конструкции оборудования.

Развитие современных принципов, подходов, средств и инструментов разработки изделий и управления их ЖЦ позволяет также пересмотреть ЖЦ паротурбинного оборудования и стремиться к новым, в том числе цифровым трансформациям предприятий, участвующих в ЖЦ. Требования конкурентоспособности, развитие инженерных программ, технологий, а также компьютерной техники определяет в первую очередь возможность коренного изменения подходов к проектированию оборудования, что, как неоднократно отмечалось, позволяет заложить и добиться максимального эффекта на всех этапах управления ЖЦ оборудования. Важно осуществить трансформацию процессов КТПП, направленную на получение ЦМИ, определяющего необходимый облик оборудования, полностью соответствующего будущему

физическому образцу, с возможностью влияния на его параметры с целью симуляции и оптимизации его конструкции в целом на всех этапах ЖЦ. Помимо осознанной оптимизации технических характеристик под целевые показатели, например, возможно применение принципиально новых технологий, например, аддитивных, направленных на получение новых эксплуатационных качеств оборудования, а также стоимостных показателей. При применении вышеперечисленных технологий технические решения могут не ограничиваться формами, пригодными для отображения традиционными способами, то есть печатью документов на бумажном носителе.

Современная цифровая трансформация предприятия, которую можно реализовать с использованием имеющихся сейчас инструментов, изменяет разрабатываемые изделия, бизнес-процессы предприятия, и такая «цифровая трансформация» отличается от «автоматизации», которая что-то улучшает, но сохраняет способ ведения дел.

Для «цифровой трансформации» в части КТПП характерны следующие технологии:

- подлинником является ЦМИ;
- бесчертежные технологии;
- системная инженерия и управление требованиями;
- сквозное нисходящее проектирование;
- выстроенные ассоциативные связи по всем процессам подготовки производства;
- инженерные расчеты развиваются до стадии виртуальных испытаний;
- многокритериальная оптимизация конструкции (оптимизация модулей/подмодулей и их сборка в оборудование);
- процессы протекают в цифровом виде;
- управление конфигурацией изделия.

Реализация этапа «цифровой трансформации» в части цифровизации процессов КТПП позволит предприятию выйти на новый уровень развития – использование цифровых двойников и позволит заложить основу в проведение аналогичных изменений во всех подразделениях всех компаний-

участников ЖЦ оборудования, что дает возможность построения сквозных цифровых процессов, протекающих в финансово-экономических, конструкторских, технологических, производственных и других подразделениях.

Процессы ЖЦИ, реализуемые на PLM-инструментах неразрывно связаны с процессами, реализуемыми на ERP-инструментах, отвечающими за планирование ресурсов предприятия. Обмен данными производится в цифровом виде, гарантирующем корректность и доступность актуальных данных в любой момент времени, как для анализа с целью оптимизации происходящих процессов, так и принятия оперативных и стратегических управленческих решений. То есть все подразделения разработчика-производителя, а также, возможно, и компаний, эксплуатирующих и осуществляющих сервисное обслуживание оборудования, находятся в едином информационном поле без потерь информации и дублирования затрат на ее разработку или использование.

Следующие цели по цифровой трансформации предприятия лежат в периметре освоения перспективных технологий, которые относятся к понятиям проекта развития «Индустрия-4.0» в Германии, концепции «Connected Factories» – в Японии, проекты по направлению «интернет вещей» – в США и программы «Цифровая экономика» – в России [6]:

- киберфизические системы (цифровые двойники);
- предиктивная аналитика оборудования и качества;
- большие данные;
- промышленный интернет вещей;
- виртуальная и дополненная реальность;
- аддитивные технологии – 3Д-печать;
- машинное обучение;
- искусственный интеллект.

Итак, учитывая эволюционные этапы развития КТПП и производства в РСФСР и России паровых турбин, а также современные возможности реализации на отечественном предприятии, разрабатывающем, производящем и выполняющем сервис такого оборудования, цифровой трансформации,

модульного проектирования и оптимизации конструкции, позволяющим двигаться ему в трех направлениях эффективного развития энергомашиностроительного предприятия, представленных на рисунке 1.1.

Выше обозначена необходимость использования в разработанной концепции **системный и комплексный подход** к реализации мероприятий и решений по разработке и модернизации паротурбинного оборудования, что безусловно вытекает в необходимость обеспечения одного из основных положений разработанной концепции:

«15. Использовать системный подход с комплексными обобщенными решениями конструкторских, технологических и других подразделений турбинного предприятия и всех участников этапов ЖЦ оборудования».

Для этого участниками ЖЦ следует быть всем представителям турбинного предприятия: от конструктора до сервис-инженера. Перечислим основные системы, обеспечивающие базу для реализации инструментов и средств сопровождения ЖЦ оборудования:

- САД-система (computer-aided design – компьютерная поддержка конструирования) предназначена для выполнения КПП и оформления конструкторской документации;

- САМ-система (computer-aided manufacturing – компьютерная поддержка изготовления) предназначена для проектирования обработки изделий на производственном оборудовании с ЧПУ и разработки программ для этого оборудования, то есть САМ-системы предназначены для ТПП, при выполнении которой используется 3Д-модель изделия, разработанная и оформленная в САД-системе;

- САЕ-система (computer-aided engineering – поддержка инженерных расчетов и анализа) предназначена для решения расчетно-аналитических задач: расчеты на прочность и вибрационную надежность, тепловые, газодинамические и междисциплинарные, расчеты для процессов литья. В САЕ-системах используется адаптированная 3Д-модель изделия, созданная в САД-системе. Как правило, САЕ-системы называются системами инженерного анализа;

- PDM-система (Product Data Management – управление данными о

продукте) используется в основном на этапах КПП и ТПП;

- EDM-система (Engineering Data Management – управление инженерными данными);
- TDM-система (Technical Data Management – управление технической документацией);
- MRP-система (Materials Requirement Planning – планирование потребностей в материалах);
- ERP-система (Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предприятия);
- CRM-система (Customer Relationship Management – управление отношениями с заказчиками);
- CPM-система (Corporate Performance Management – управление эффективностью работы предприятия);
- SCM-система (Supply Chain and Logistics Management – управление цепочкой поставок);
- TQM-система (Total Quality Management – глобальное управление качеством);
- CAPE-система (Computer-Aided Process Engineering – автоматизированная разработка производственных процессов);
- DMU-система (digital mock-up – цифровое макетирование);
- PM-система (Project Management – управление проектами);
- BPM-система (Business Process Management – управление бизнес-процессами);
- WF-система (Workflow – управление потоками заданий).

В параграфе описаны ключевые детали совершенствования выбранных инструментов КТПП турбинного оборудования на соответствующих базовых конфигурациях систем, используемых, как правило, в комплексе с многочисленными типовыми, специализированными и «самописными» модулями, что позволяет максимально повысить эффективность обеспечения ЖЦ паротурбинного оборудования и с внедрением методологии добиться высоких технико-экономических показателей оборудования при его эксплуатации и сервисе.

Ранее показано, что оптимизация «автоматизации» проектирования без обозначенной в работе цифровой трансформации всего предприятия и одновременном внедрении модульной концепции не сможет дать переход на качественно новый уровень, и, как следствие, не представляется возможным достижение бизнес-целей предприятия и высоких технико-экономических показателей выпускаемого оборудования. Такая трансформация меняет продукт, процессы предприятия, ее позиционирование на рынке, это отличает понятие «цифровая трансформация» от «автоматизации», которая что-то улучшает, но сохраняет способ ведения дел.

Итак, положения цифровой трансформации предприятия, следующие:

- подлинником является 3Д-модель, а точнее, ЦМИ, то есть происходит переход на бесчертежные технологии;
- системная инженерия и управление требованиями;
- сквозное нисходящее проектирование;
- инженерные расчеты развиваются до стадии виртуальных испытаний, что достигается переводом под единую оболочку всех аналитических расчетов, выполняемых на предприятии на собственном программном обеспечении по собственным методикам расчетов, численного инженерного анализа и многокритериальной оптимизации на коммерческих программных продуктах;
- процессы протекают в цифровом виде;
- управление конфигурацией заказа турбоустановки;
- ассоциативные связи на производственных стадиях ЖЦИ от конструктора до инспектора ОТК;
- использование современной актуализированной библиотеки НСИ;
- интерактивные средства сборки, эксплуатации и сервиса.

Помимо описанных выше инструментов и их специализированной адаптации под паротурбинную продукцию важным вопросом является вопрос совершенствования и оптимизации инструментов в соответствии с целевыми бизнес-процессами предприятия и развитием влияния участников сопровождения ЖЦ на эффективность КТПП с минимальными затратами и продолжительностью выполнения мероприятий по разработке оборудования

и совершенствованию его конструкции и ЖЦ.

Важно обеспечение не только единого информационного поля для всех подразделений предприятий – участников сопровождения ЖЦ оборудования, но и настроенного общего доступа к объему информации с исключением риска того, что разные участники могут использовать в работе неактуальную информацию (например, устаревшую версию документа). Без общего доступа к данным возможна ситуация, когда КД разрабатывается внутри подразделения до тех пор, пока на этапе выпуска документации не обнаруживаются коллизии при последующей сборке (в сопряженных узлах, разрабатываемых смежными подразделениями).

Таким образом, недостаток информации может привести к дублированию работы в процессе разработки и серьезным недоработкам в конструкции, вызванным недостатком информации на начальном этапе КТПП.

Детально настроенная PLM/PDM-система решает следующие проблемы:

- сохраняет данные в защищенном хранилище;
- отслеживает доступ к данным;
- хранит все изменения.

После того, как информация сохранена в PLM/PDM-системе, она становится доступна всем подразделениям предприятия для просмотра и повторного использования.

Если в документации произошли изменения, PLM/PDM-система сохраняет измененную копию документа в своем хранилище наряду со старой версией документа, сохраняя всю историю проектирования.

Правильно и детально настроенная PLM/PDM-система – это инструмент для совместной работы пользователей, построенный на базе современных веб-технологий, которые были разработаны, чтобы обеспечить более эффективную разработку и управление информацией об изделии.

PLM-система с функциями PDM-системы предоставляет механизм совместного использования информации, который обеспечивает хранение информации (защищенное хранилище, ежедневное резервное копирование), управление информацией (управление доступом, согласование и утверждение), управление развитием информации (хранение всей истории

проектирования, проведение изменений), совместную работу с данными.

Несмотря на то, что данные об изделиях, как правило, сложны, многогранны и содержат сотни связей, PLM-система позволяет управлять всеми этими данными и связями. На рисунке 5.2 представлены примеры основных связей, которыми управляет PLM-система: в рамках проекта цифровой трансформации настраиваются все связи в едином информационном поле.

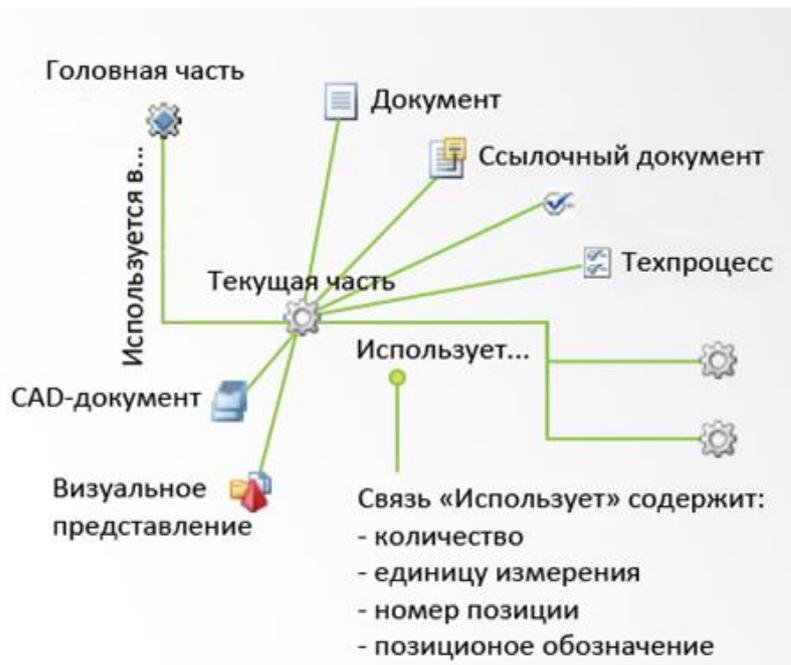


Рисунок 5.2 – Примеры основных типов связей в PLM-системе

С учетом большого объема данных и необходимости настроить связи между различной информацией, часто ассоциативные, следует обеспечить структурирование данных в соответствии с методиками и подходами, укладывающимися в основные положения концепции создания и сопровождения оборудования. Поэтому необходимо оптимально сформировать архив единого информационного поля, структурировав его в соответствии с типом информации, которую несет в себе объект, и навести связи.

На рисунке 5.3 представлена предлагаемая укрупненная структура контекстов архива, реализованного на УТЗ.

В каждом контексте организовывается своя структура папок и связей данных.

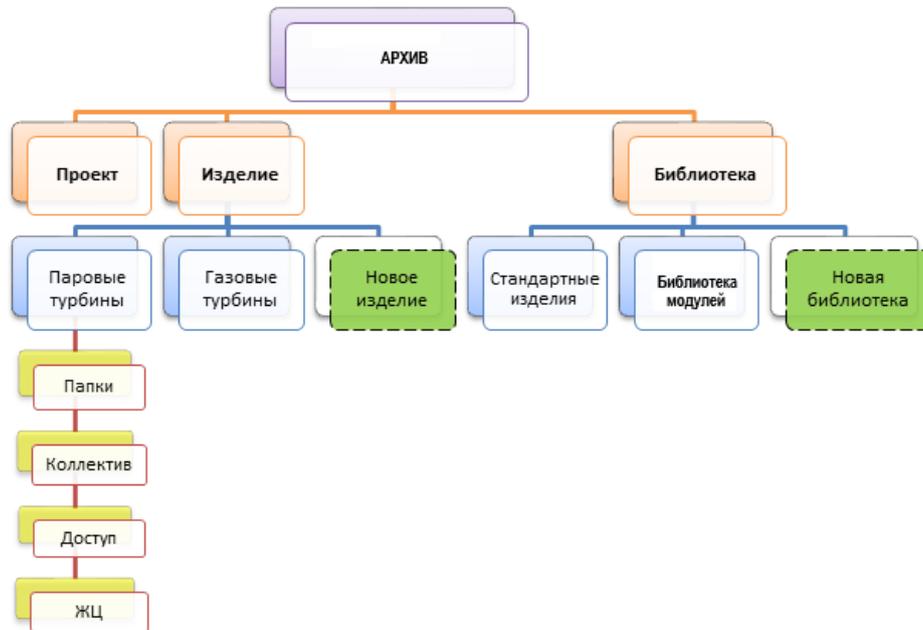


Рисунок 5.3 – Укрупненная структура контекстов в архиве
PLM/PDM-системы

На рисунке 5.4 представлена структура для типового проекта. Доступ к отдельной информации настроен и ограничен.

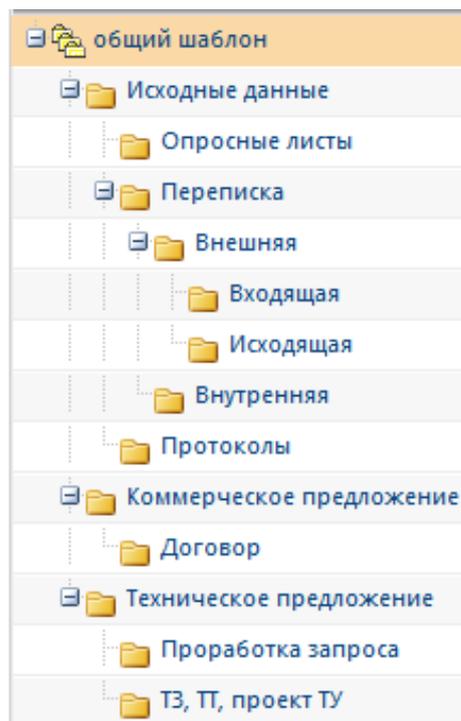


Рисунок 5.4 – Верхнеуровневая структура папок типового проекта

На рисунке 5.5 представлена структура библиотеки «Стандартные изделия». Доступ к отдельной информации настроен и ограничен с учетом условий по ограничению НСИ.

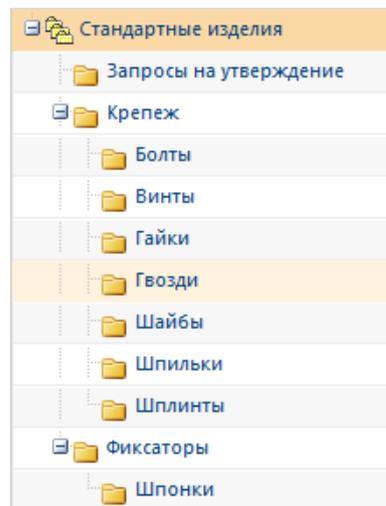


Рисунок 5.5 – Верхнеуровневая структура папок библиотеки «Стандартные изделия»

На рисунке 5.6 представлена структура библиотеки по изделию «Паровые турбины».

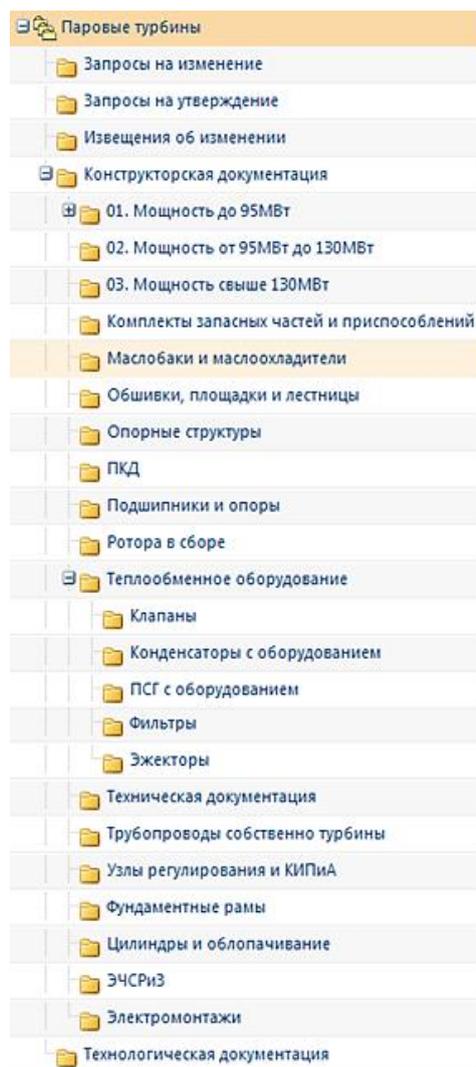


Рисунок 5.6 – Верхнеуровневая структура папок библиотеки «Паровые турбины»

Итак, в PLM-системе с функциями PDM необходимо реализовать концепцию создания паровых турбин и паротурбинного оборудования с обеспечением единого информационного пространства с настроенным ограниченным доступом участников различных подразделений разных предприятий, сопровождающих ЖЦ оборудования, а также адаптацией и формированием инструментов наполнения, сохранения, конфигурирования и использования информации по ЖЦ.

На рисунке 5.7 представлен пример одного из настроенных под конкретную номенклатуру оборудования и информации с атрибутами диалоговых окон расширенного поиска.

История поиска и сохраненные поиски | **Расширенный поиск** ?

[Сохранить этот поиск](#)

Ключевое слово:

1. Задать ключевое слово

Тип: [Добавить](#)

2. Более гибко определить типы для поиска (расширенный список)

Все типы Часть Запрос на изменение CAD-документ

Проект Извещение об изменении Отчет о проблемах

Документ

Контекст: [Опции](#) ▾

Все контексты Настройки CAD Стандартные изделия

Критерии: [Добавить](#) ▾

3. Определить, где искать

Номер =

Создал =

4. Определить, дополнительные критерии, например, создателя объектов

Найти: [Со всеми этими критериями](#) ▾

5. Задать строгость поиска

[Сохранить этот поиск](#)

Рисунок 5.7 – Диалог расширенного поиска информации в PLM/PDM-системе

Для внедрения концепции модульного создания паротурбинного оборудования жизненно важно внедрить в PLM/PDM-системе средства управления конфигурациями.

Управление конфигурацией – это управленческие средства, связанные с разработкой, производством и сопровождением ЖЦ сложных изделий, которые производятся в различных вариантах, компоновках и модификациях с учетом требований заказчика и используются для установления и поддержания эксплуатационных, функциональных и физических показателей оборудования по требованиям ЖЦ оборудования.

Основная задача процесса управления конфигурациями – это обеспечение согласованности между текущим описанием оборудования, его физической конфигурацией и многочисленными записями о вносимых изменениях в конфигурацию на протяжении всего ЖЦ.

Процесс управления конфигурацией включает в себя следующие процессы:

- фиксация структуры изделия/оборудования в заданный момент времени;
- создание конфигурации и экземпляров (серийных номеров) для конечных потребителей;
- контроль изменения конфигурации и экземпляров конфигурации для предоставления точных сведений о физическом состоянии экземпляров потребителя.

На рисунке 5.8 представлен пример создания конфигураций в процессе разработки УТЗ паротурбинной установки типа Т-63/76-8,8.

Рациональная и безопасная реализация проектов внедрения в опытно-промышленную и промышленную эксплуатацию на предприятии новых подходов заключается в разработке методологии внедрения «новых» инструментов, конструкций, принципов КТПП с постепенным исключением от проекта к проекту вовлечения «новых» конструкций и отказа от «старых» инструментов и бизнес-процессов.

Уро- вень	Обозначение	Наименование	Развитие версий с течением времени		
			15.01	15.02	15.03
0	 МТ-268700	Паротурбинная установка Т-63/76-8,8	0.6	1.0	1.0
1	 МТ-268701	Конденсатор К-6000-XII с оборудованием	0.1	0.1	0.1
2	 БТ-268710	Конденсатор К-6000-XII	0.1	0.2	0.2
2	 СТ-215878	Форсунка	0.1	0.1	0.1
1	 МТ-268702	Турбина паровая Т-63/76-8,8 с оборудованием	0.13	0.14	1.0
2	 БТ-237110	Фильтр решетчатый ФР-400-6-1	0.2	0.2	0.2
2	 БТ-244430	Эжектор пароструйный ЭПУ-0,9-900-1	0.2	2.0	2.0
2	 БТ-247300	Эжектор пароструйный ЭПП-1-0,9-790-1	0.1	1.0	1.0
2	 БТ-248200	Фильтр сетчатый ФС-80-40-1	0.0	0.2	X
2	 БТ-248200-01	Фильтр сетчатый ФС-80-40-1	X	X	0.0
2	 БТ-268703	Трубопровод дренажей	0.0	0.5	0.5
2	 БТ-268705	Трубопровод отсоса пара от шт/кл	0.0	0.4	0.4

Рисунок 5.8 – Создание конфигураций в процессе разработки УТЗ паротурбинной установки типа Т-63/76-8,8

Учитывая, что даже плановая переработка конструкций всей действующей номенклатуры оборудования является трудоемкой, невостребованной, неактуальной и неподъемной задачей для любой компании, то старт, развертывание проекта по внедрению новой концепции с наполнением архива библиотеками модулей должны осуществляться под конкретный План товарного выпуска (ПТВ) продукции видимого горизонта проектов (2-3 года). При этом разработка «точечно» модульных конструкций только части выпускаемого оборудования является серьезной стратегической ошибкой, так как такой подход даже с целью достижения краткосрочной временной и экономической выгоды приведет к нецелевым потерям трудовых ресурсов, пробуксовке внедрения концепции, снижению охвата использования и унификации модулей/блоков/элементов с потерей их функциональности, остановке наполнения библиотеки, снижению доли использования типовых отработанных библиотечных позиций. Все это приводит к значительным среднесрочным и долгосрочным потерям и не

только временным, трудовым, экономическим, но и потерям оборудования в качестве, надежности, технологичности и технико-экономических показателей, то есть эксплуатационным показателям объекта использования на протяжении всего ЖЦ до утилизации, потому что усложнится в том числе реконструкция, модернизация и сервисное обслуживание оборудования.

В целом принципы и подходы, а также этапность цифровой трансформации с развитием вопросов совершенствования бизнес-процессов предприятия, а также с изменением подходов к проектному и интегрированному планированию, были разработаны и итерационно доработаны на АО «УТЗ» в рамках реализации нескольких этапов такой трансформации.

В дальнейшем аналогичный сценарий с учетом опыта был разработан участниками проекта и внешними консультантами в рамках реализации проекта в ПАО «Силловые машины», а также такой несколько доработанный сценарий был поддержан внешними консультантами при разработке и закладывании в концепцию проекта цифровой трансформации ЖЦИ на АО «НЗЛ»/АО «РЭПХ».

На рисунке 5.9 представлено сравнение «старого» традиционного и «нового» подходов к КПП паровой турбины.

Для планомерного освоения «нового» подхода и принципов разработки изделия, а также для снижения рисков срыва сроков коммерческих проектов на начальных этапах внедрения системы предлагается сначала реализовать опережающий проект, в рамках которого выполнить подготовку производства и собственно производства нескольких изделий разной функциональности и сложности изготовления, например, лопатки, диска, корпуса цилиндра или стопорного клапана, а затем проводить поэтапный переход к запуску в производство оборудования, со следующей долей «нового» от общей трудоемкости реализуемого проекта:

- пилотный проект – не менее 20%;
- опытно-промышленная эксплуатация – не менее 30%;
- первый проект в промышленной эксплуатации – не менее 50%; далее наращивание доли в зависимости от наработок стандартных библиотечных элементов различного уровня деления, сложности проекта и доступности трудового и временного ресурсов.

Опыт проведения цифровой трансформации с постепенным переходом на модульную концепцию создания паровых и газовых турбин и турбоустановок показывает для предприятия следующие результаты:

- сокращение трудоемкости и сроков разработки и производства нового изделия на 30%;
- повышение качества конструкторской и технологической документации;
- повышение качества продукции;
- сокращение количества изменений конструкторской документации по причинам конструкторских и технологических ошибок в 3 раза;
- сокращение отклонений от конструкторской документации в производстве по причинам конструкторских и технологических ошибок в 3 раза;
- повышение качества планирования конструкторских и технологических работ;
- внедрение управления конфигурациями изделия;
- повышение качества эксплуатационной и сервисной документации;
- повышение вовлеченности и компетенций инженерного персонала.

На рисунке 5.10 представлено сравнение «старого» традиционного и «нового» подходов к управлению ЖЦИ на стадии производства.

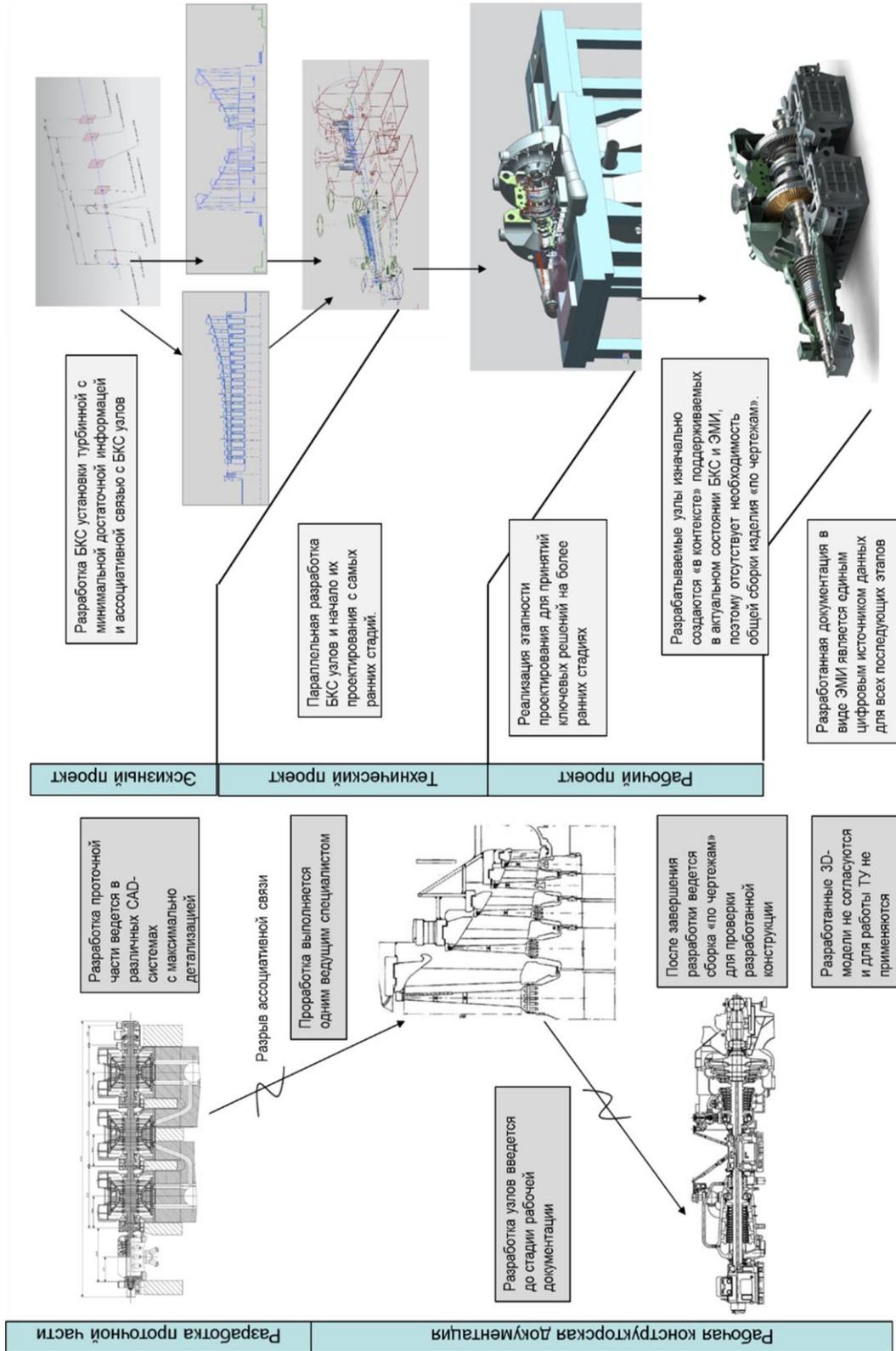


Рисунок 5.9 – Сравнение «старого» традиционного и «нового» подходов к проектированию турбины

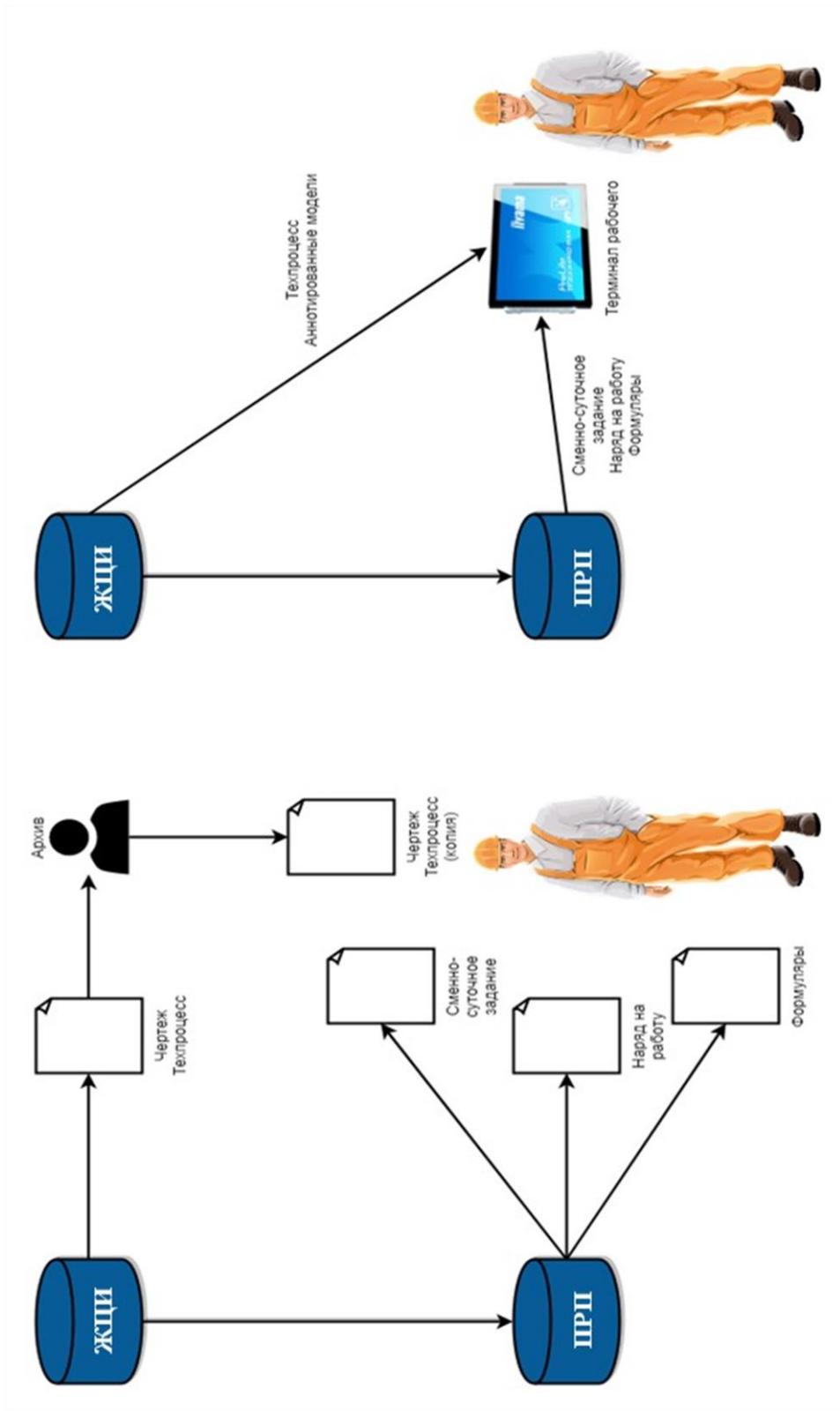


Рисунок 5.10 – Сравнение «старого» традиционного и «нового» подходов к управлению жизненным циклом изделия на стадии производства: ПРП – планирование ресурсов предприятия

Инструменты параметрического моделирования. При разработке паровых турбин, тем более с учетом внедрения конструкторской базовой структуры и с ассоциативными связями между 3Д-моделями, используемыми на последующих этапах ЖЦ, эффективно использовать параметрическое представление ДСЕ. Параметры геометрических конструктивных элементов взаимосвязаны между собой: радиусы, грани, отверстия и другое, что позволяет перестраивать 3Д-модели, не нарушая целостности. Фактически такой подход параметрического моделирования можно эффективно использовать для ДСЕ, находящихся на стыке стандартных библиотечных модулей с постоянными геометрическими размерами и параметрическими модулями с постоянными геометрическими обводами. Использование тех и других модулей с постоянными габаритными и присоединительными размерами с их сохранением как раз возможно за счет применения таких параметрических стыковочных ДСЕ. Параметрические 3Д-модели параметрических модулей и стыковочных ДСЕ, например, прокладок, вставок, проставок, вкладышей и втулок, становятся АРМами по проектированию таких ДСЕ и модулей.

АРМы инженерного анализа в САЕ-системах. При разработке, модификации или модернизации 3Д-моделей стандартных библиотечных модулей перед переходом к производству и испытанию физических образцов, макетов или прототипов целесообразно пройти стадии компьютерного инженерного анализа и отработки для уменьшения количества итераций, необходимых для изготовления оригинальной окончательной конструкции или облика. Такой инженерный анализ является самым наукоемким среди всех процессов КТПП в связи с необходимостью моделирования изделий и физических процессов в них. Поэтому при проектировании некоторых ДСЕ и модулей целесообразно создать и использовать расчетно-аналитические АРМы, например, для расчета и отработки клапанов, патрубков, паровпускных, средних, выхлопных частей. Причем стоит отметить, что с 2000 года в отечественном машиностроении наблюдается интеграция САЕ/CAD и совершенствование САЕ-систем, что позволяет снижать требования к квалификации пользователей САЕ-систем, так как нет

постоянной необходимости интерпретировать результаты такого анализа специалистами-расчетчиками. Конструкторские службы все чаще производят базовые САЕ-расчеты, ассоциативно связанные с 3Д-моделями разрабатываемых узлов и модулей, что является требованием целевых моделей цифровой трансформации и модульной концепции создания паровых турбин и паротурбинного оборудования. Применительно к работам согласно опыта авторов необходимо отметить следующие источники [29-32, 34, 35].

Многофакторная оптимизация. Конструкторские службы турбинных заводов все чаще прибегают к автоматической многофакторной оптимизации, в том числе интегрированной с САЕ-системами. Такая многофакторная оптимизация использовалась УТЗ под руководством одного из авторов в рамках проекта создания паровой турбины типа Т-295/335-23,5 при совершенствовании проточной части [36-38].

Развитие процессов проектирования фактически заключается в освоении и применении новых подходов в части ассоциативного нисходящего контекстного проектирования, а также выстраивания сквозного неразрывного процесса проектирования изделия, начиная от замысла и заканчивая передачей документации на этап подготовки производства в среде системы управления ЖЦИ.

Как было обозначено ранее, важным принципом при выполнении КПП паровой турбины является организация взаимодействия конструкторов с расчетными подразделениями, поэтому в рамках проекта цифровой трансформации и с описанной выше концепцией создания ЦМИ на УТЗ также поэтапно с 2015 года реализуется проект создания ЕРК.

В таблице 5.1 приведены основные подходы к выполнению расчетов с распределением наибольшей применимости на стадиях эскизного (ЭП), технического (ТП) и рабочего проектирования (РП) для улучшения характеристик разрабатываемого оборудования и сокращения затрат на выполнение расчетов.

В ЕРК объединяются разработанные, разрабатываемые и использованные заводом методики, алгоритмы, наработанные базы

аналитических расчетов, численных расчетов, включая расчетные АРМы и оптимизационные АРМы в единый комплекс, который позволит выполнять «сквозные» расчеты как при конкурсных проработках, так и при рабочем проектировании турбин. ЕРК обеспечивает выполнение «обликовых» исследований, тепловых балансовых расчетов, тепловых расчетов с подбором ступеней, прямых и обратных прочностных расчетов, моделирования теплового состояния, моделирование напряженно-деформированного состояния, моделирование газодинамических процессов и вибрационных расчетов, а также выполнение сложных многофакторных оптимизационных задач.

Таблица 5.1 – Подходы к выполнению конструкторских инженерных расчетов паротурбинного оборудования

Подходы к выполнению расчетов	ЭП	ТП	РП
Автоматизация обмена данными между ЕРК, БС и ЦМИ	+		
Автоматизация типовых расчетов в АРМах	+		
Новые подходы к расчетам и инструменты выполнения расчетов	+		
Предварительные расчеты конструкторами		+	
Автоматизация процесса взаимодействия конструктор-расчетчик под управлением САД/PLM-систем при выполнении САЕ-расчетов с использованием 3Д-моделей/ЦМИ		+	+

На УТЗ поэтапно реализуется создание информационной среды предприятия, включающей в себя: программные, технические и организационные составляющие, позволяющие выполнять «сквозную» разработку оборудования с применением нисходящего и модульного проектирования, расчетов (тепловые, прочностные, газодинамические, вибрационные) и интеграцию с существующей системой управления

инженерными данными с использованием ЦМИ, выполненной на современных цифровых системах. Фактически «выращивается» комплекс единого информационного поля с реализацией задач параметризации, АРМов конструкторов и расчетчиков с использованием современных цифровых средств с настроенными ассоциативными связями внутри и между этапами ЖЦ паротурбинного оборудования с возможностью выполнения многофакторной оптимизации модулей с целью повышения показателей оборудования и его ЖЦ.

Разберем «старые» традиционные подходы к ТПП и обозначим вектор развития инструментов и подходов к ТПП с учетом трансформации инструментов и подходов к КПП на примере различных предприятий.

Для осуществления проекта цифровой трансформации на предприятии в рамках обследования оценивается также текущее состояние уровня использования в ТПП цифровых инструментов и подходов.

По результатам обследования технологических служб и производства НЗЛ/РЭПХ также выявлены проблемы процессов, инструментов и подходов ТПП, которые также следует решить в рамках цифровой трансформации с учетом современного уровня техники, ПО и технологических возможностей.

На рисунке 5.11 представлена оценка уровня методологической зрелости НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам ТПП.

На рисунке 5.12 представлена оценка уровня инструментов НЗЛ/РЭПХ, используемых для решения ключевых задач ТПП.

На рисунке 5.13 представлена оценка уровня процессов ТПП на НЗЛ/РЭПХ.

Основные проблемы в части ТПП:

- неполный объем технологической документации заносится в информационную систему, что не позволяет оперативно ей пользоваться всеми службами предприятия;

- отсутствует действующая актуальная база режущего инструмента, применяемого на предприятии, что не позволяет назначать инструмент на переходы управляющих программ для станков с ЧПУ и корректно назначать



Рисунок 5.11 – Оценка уровня методологической зрелости НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам ТПП

режимы резания. Оператору станка не потребуется корректировать управляющие программы;

- не все бизнес-процессы ведутся в информационной системе (оснастка заказывается по карточкам на бумажном бланке и регистрируется в бумажном журнале), что не позволяет оценивать загрузку подразделений и оперативно находить информацию о статусе выполнения процесса;

- технологические процессы разрабатываются по упрощенной форме (без подробных переходов, без режимов, без стандартного инструмента и оснастки, без непроизводственных операций (транспортировка, охлаждение после термообработки и т.д.), без информации об оптимальном количестве исполнителей операции (для сборки и сварки), без указания информации о параллельном выполнении операций, не на все операции есть эскизы на промежуточное состояние изделия). Это не позволяет достигнуть повторяемости результата операций, проводить контрольную приемку деталей в неокончательно обработанном состоянии, проводить точное нормирование операций без завышения норм по усредненным режимам, приводит к дополнительным затратам времени рабочего не занимающегося подбором инструмента, поступающего заранее со склада, формировать



Рисунок 5.12 – Оценка уровня инструментов, используемых на НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам ТПП

потребность в закупке стандартного инструмента, корректно планировать производство и требует неоправданно высокие требования к квалификации исполнителей (рабочий подбирает инструмент и режимы);

- технологические процессы на типовые изделия создаются в системе копированием операций с уже разработанных технологических процессов вместо использования параметризованных шаблонов, которые значительно автоматизируют разработку и сократят количество этапов разработки;

- станки с ЧПУ не подключены к локальной сети, что приводит к затратам времени на доставку управляющей программы;

- выпуск упрощенных карт наладки, что приводит к ожиданию оператором привлекаемого программиста;

- нормирование технологии ведется не в системе или по электронным таблицам с усредненными нормами, заведенными в информационную систему, что увеличивает длительность и затраты на нормирование и повышает риск ошибок;

- производство работает по бумажным документам, что приводит к увеличению трудовых и материальных затрат на выпуск документации,



Рисунок 5.13 – Оценка уровня процессов ТПП на НЗЛ/РЭПХ

доставку документации до исполнителей работ, поиск и уничтожение экземпляров неактуальной документации в связи с проведенными изменениями;

- планирование загрузки производства фактически производится в «ручном» режиме.

На этап ТПП в целевой модели будут поступать аннотированные 3Д-модели, оформленные по определенному согласованному и утвержденному стандарту предприятия (СТП).

Аннотированная 3Д-модель полностью описывает изделие, является подлинником конструкторского документа и содержит в себе всю информацию, необходимую для организации ТПП и последующего производства. Разберем это на примере ЛМЗ.

На рисунке 5.14 представлена аннотированная 3Д-модель рабочей лопатки паровой турбины ЛМЗ, выполненной в рамках пилотного проекта на этапе опытно-промышленной эксплуатации.

Анализ 3Д-модели и согласование на технологичность проходят в PLM-системе. Все замечания к технологичности изделия заносятся и хранятся в PLM-системе. Процедура согласования замечаний к конструкторской документации выполняется по СТП, в соответствии с которым реализуются

полные и сокращенные маршруты согласования и изменения конструкторской и технологической информации.

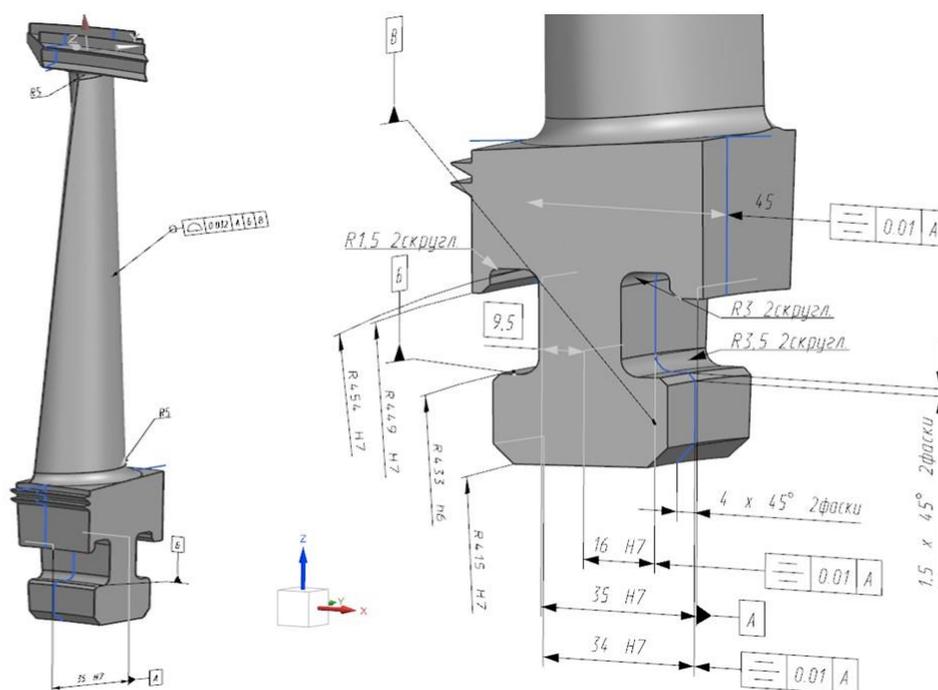


Рисунок 5.14 – Аннотированная 3Д-модель рабочей лопатки паровой турбины ЛМЗ

Важно отметить, что необходимо выстроить систему выявления замечаний к конструкции оборудования при осуществлении проверки и анализа конструкторской документации на технологичность, результаты которой фиксируются, анализируются, разрабатываются корректирующие мероприятия, которые разбираются на предмет предотвращения повторения допущенных ошибок или нетехнологичных конструкторских решений.

На рисунке 5.15 представлена закладываемая поэтапная логика согласования конструкторской документации на технологичность с выстраиванием системы фиксации замечаний, с разработкой и реализацией корректирующих мероприятий.

Технологические службы при необходимости создают технологические представления составов изделий, отличных по структуре от конструкторских представлений. Технологические составы изделий обеспечивают правильное и своевременное возникновение потребностей в комплектующих в зависимости от технологии изготовления этих изделий. Далее будут показаны примеры формирования конструкторских и технологических представлений

технолог учитывает припуски на механическую обработку и может унаследовать конструкторский материал либо переопределить его самостоятельно. Параметры выбранного материала могут быть использованы для дальнейшего автоматизированного расчета норм расхода.



Рисунок 5.16 – Схема автоматического процесса распределения заданий на разработку в зависимости от вида работ и цеха-исполнителя

Расчет плановой трудоемкости изготовления изделий выполняется в PLM-системе, в которой предусмотрена возможность вводить нормы времени.

В PLM-системе создается шаблон рабочего процесса расчета плановой трудоемкости, в котором предусмотрена возможность создания замечаний и прохождения их по рабочему процессу и организация настройки проверки объектов, доступных для запуска по рабочему процессу. Назначение ответственных за этапы/задачи рабочих процессов выполняется как автоматически по определенным в системе правилам, так и вручную в зависимости от логики, которая задается в шаблоне рабочего процесса. В PLM-системе разрабатывается шаблон автоматизированного отчета по плановой трудоемкости, который представляется как в печатной, так и в интерактивной форме.

Необходимо отметить, что PLM-система обеспечивает возможность назначать плановые трудовые нормы на ДСЕ и норму времени на технологический процесс целиком и дифференцировать по цехам и видам работ.

Разработка технологических процессов состоит из следующих подзадач:

- создание видов работ;
- создание операций;
- назначение атрибутов и ресурсов операций;
- создание переходов;
- разработка технологических эскизов и 3Д-моделей промежуточных состояний;
- формирование отчетной документации.

Весь процесс разработки технологических процессов увязывается с рабочими процессами PLM-системы для организации работы и управления правами доступа на этапах разработки и согласования технологических процессов, которые также разрабатываются в PLM-системе.

PLM-система позволяет автоматизировать работу технолога при разработке единичных, групповых и типовых технологических процессов. PLM-система учитывает особенности и требования отечественных стандартов разработки технологических процессов.

PLM-система позволяет целевым образом выполнять:

- создание операции для универсального оборудования и операции для оборудования с ЧПУ;
- создание операций вручную, из классификатора или по шаблону;
- создание операций в контексте;
- назначение ресурсов операций из классификатора;
- назначение рабочих мест выполнения операций;
- создание переходов операций вручную, из шаблона и позволяет формировать текст из типовых фраз;
- редактирование атрибутов переходов и привязывание к ним ресурсов операций.

Операции могут быть созданы вручную, из классификатора или скопированы по аналогу из шаблона. В случае операций для оборудования с ЧПУ обеспечена возможность хранения текста управляющих программ и назначенного инструмента.

Ресурсы операций назначаются из классификатора с возможностью быстрого доступа и назначения альтернативных ресурсов (замены). В качестве основных разновидностей ресурсов операции в приложении сгруппированы: оборудование, материалы, средства технологического оснащения (режущий и мерительный инструмент, приспособления, оснастка и т.д.), профессии, документация и рабочие места.

На основе информации из ресурсов операции для каждого перехода имеется возможность закрепить потребляемые ресурсы и назначить режимы, соответствующего метода обработки (резания, сварки, пайки и т.д.).

Для информационной поддержки технолога PLM-система позволяет сохранять компоненты технологического процесса (операции, ресурсы, переходы, тексты переходов) как «Избранное» и применять их при разработке других технологических процессов. Функционал системы позволяет структурировать «Избранное» в виде произвольно настраиваемого дерева, а также группировать несколько записей как один элемент избранного. Предусмотрена возможность ведения двух деревьев «Избранного»: индивидуального (каждым пользователем) и общего (администратором).

В PLM-системе можно построить диаграмму, которая будет соответствовать требуемой последовательности выполнения операций, в результате построения которой в свойствах каждого элемента диаграммы будут заполнены предшественники и преемники, определяющие последовательность выполнения видов работ и являться приоритетными по отношению к значению позиции каждой операции.

Разработка технологических эскизов выполняется в 3Д-формате в виде аннотированных моделей промежуточных состояний деталей и сборочных единиц на различных этапах технологического процесса.

Технологический процесс сборки содержит описание действий по установке и образованию соединений составных частей изделия.

Особенностями технологических процессов сборки являются:

- необходимость выбора метода достижения заданной точности на основании анализа собираемости сборочной единицы;
- работа с технологическим составом изделия;

- наличие этапов разборки-сборки;
- наличие этапов совместной механической обработки;
- наличие технологических деталей (подкладок, планок, ребер и т.д.).

Для решения задачи разработки технологических процессов сборки в PLM-системе используются те же средства, что и при разработке технологических процессов изготовления деталей. Для работы с ресурсами операций нужно правильно целевым образом разработать и использовать классификатор, позволяющий оперировать нормализованными рядами.

В случае внедрения PLM-системы описываемым методологическим образом, позволяющим оптимально развивать цифровую зрелость предприятия на этапах КПП, ТПП и далее, достигается синергетический эффект, а точнее появляется возможность эффективно внедрять модульную конструкцию оборудования, учитывая возможности качественного подхода к конструктивной и технологической преемственности, нормализации и автономной реализации задач оптимизации, модификации и совершенствования модулей и подмодулей. Задачи сокращения циклов этапа сборки отдельных изделий и оборудования решаются за счет:

- создания стандартных библиотечных модульных конструкций изделий, разработки типовых сборочных технологических процессов и их компоновки в процессе разработки технологических процессов конкретного изделия;
- управления технологическими составами изделия;
- создания циклограмм сборки, позволяющих проанализировать сквозной технологический процесс сборки изделия, выявить критический путь процесса, оценить возможность распараллеливания процессов, минимизировать количество операций перемещения.

Эффективность решения данной задачи при использовании ЦМИ и аннотированных 3Д-моделей сборки, которые являются подлинником конструкторского документа, достигается за счет:

- отсутствия необходимости повторного моделирования моделей промежуточных состояний (для технологических эскизов) по чертежам;
- возможности автоматизированного создания моделей промежуточных состояний сборки на основании конструкторского или технологического

состава изделия (в связи с тем, что проектирование выполняется в абсолютной системе координат и отсутствует необходимость повторного позиционирования компонентов);

- возможности автоматизированного расчета размерных цепей;
- возможности разработки моделей промежуточных состояний для заданий в смежные бюро (требования к позиционированию компонентов, припуски под механическую обработку в сборе и т.д.);
- визуализации технологических состояний этапов сборки в PLM-системе.

При разработке технологических операций в дополнение к ресурсам операций назначаются комплектующие ДСЕ, которые размещаются в структуре операции.

Технологические процессы сборки разрабатываются как на основании конструкторского, так и на основании технологического состава изделия.

В рамках решения задачи анализ собираемости ЦМИ используется для расчета размерных цепей (для случаев методов полной, неполной и групповой взаимозаменяемости). Метод пригонки ЦМИ может быть использован для определения припусков, достаточных для обеспечения точности совместной обработки.

Формирование сквозного технологического процесса в PLM-системе обеспечивается за счет создаваемого и настраиваемого рабочего процесса, позволяющего технологу, ответственному за выпуск сквозного технологического процесса, ставить задачи технологам смежных бюро и контролировать их выполнение.

В PLM и CAD-системах разработка промежуточных состояний (аналог технологических эскизов) осуществляется на основе ассоциативной копии, ранее утвержденной электронной конструкторской документации.

Важно при разработке промежуточных состояний осуществлять ассоциативные связи между конструкторской документацией, моделями промежуточных состояний и геометрической моделью заготовки, а также расстановку размерных связей.

При изменении конструктором конструкторской документации за счет ассоциативных связей происходит автоматическое изменение геометрических параметров промежуточных состояний без потери размерных связей, с сохранением последовательности выполнения операций, что приводит к уменьшению трудоемкости и повышению эффективности разработки технологических процессов. Для примера необходимо сказать, что «фотографирование» на УТЗ процесса минимального перестраивания рабочей лопатки паровой турбины по всей цепочке КТПП показало затраты в объеме 20 н/ч, что при проведении постоянных изменений или разработке новых лопаток на основании шаблонов, не имеющих ассоциативных связей, приводит к значительным временным и трудовым затратам, которые также, безусловно, сказываются на финансовых затратах. При этом в случае выстраивания правильно описанной выше методологии затраты на перестраивание составляют 20 минут, которые затрачиваются на проверку правильности обработки на имитационном симуляторе механической обработки лопатки на станке с ЧПУ.

На основе моделей промежуточных состояний ассоциативно проектируются объекты технологического оснащения и разрабатываются программы для станков с ЧПУ.

На рисунке 5.17 представлен пример 3Д-моделей промежуточных состояний производства рабочей лопатки паровой турбины.

Методологическим вкладом в оптимизацию и сокращение длительности выполнения этапа ТПП является унификация технологических процессов и переход к групповым и типовым технологическим процессам. В PLM-системе разрабатываются шаблоны технологических процессов с использованием параметризованных шаблонов условий.

Выше неоднократно обозначалась важность и методологическая неотъемлемость технологической преемственности и нормализации. Но стоит отметить, что при этом не только получится достичь максимального эффекта от их внедрения в методологию создания паротурбинного оборудования, но и практически полноценно и комплексно удастся обеспечить конструкторскую преемственность и нормализацию, что фактически возможно при реализации

описываемой модульной концепции разработки оборудования, которая включает модульные подходы создания и совершенствования конструкции оборудования и использования современных цифровых инструментов конструкторской и технологической подготовки производства.

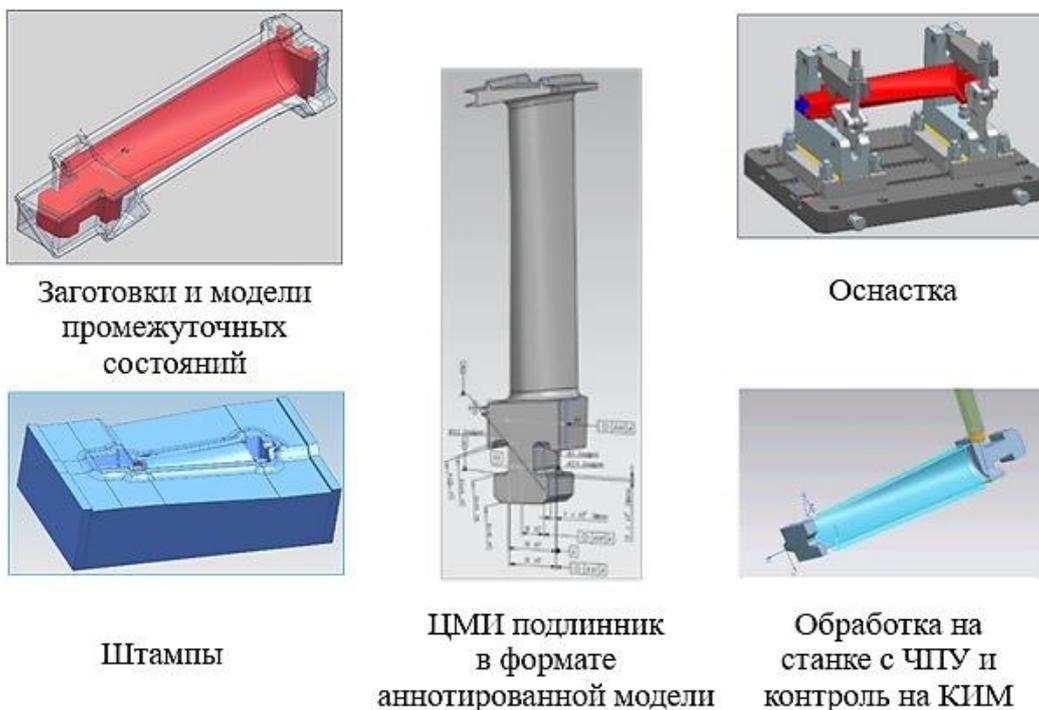


Рисунок 5.17 – 3Д-модели промежуточных состояний производства рабочей лопатки паровой турбины: ассоциативные связи между основной моделью и вспомогательными моделями оснастки и приспособлений

На рисунке 5.18 показана блок-схема ТПП энергомашиностроительного оборудования, раскрывающая причины значимости влияния модульной конструкции и доли унификации оборудования на стандартизацию и нормализацию ТПП, качество и масштабы которых, в свою очередь, влияют на эффективность реализации этого этапа ЖЦ оборудования. Такая схема справедлива для этапов ЖЦ паротурбинного оборудования.

В PLM-системе «сквозным» образом необходимо выполнять процесс трудового нормирования технологических операций и переходов, который автоматизированно может производиться либо расчетом с использованием нормировочных карт, отраженных в справочниках трудовых нормативов, либо расчетом с помощью формул. В PLM-системе есть возможность обеспечить высокий уровень автоматизации такой работы и выполнять все задачи нормирования труда в одном информационном поле с единым интерфейсом.



Рисунок 5.18 – Блок-схема ТПП энергомашиностроительного оборудования при создании модульных конструкций

Норма времени может быть рассчитана как на операцию целиком, так и по переходам. Введенные нормы времени дифференцируются по настраиваемым категориям (штучное время, основное время, вспомогательное время и т.п.). Сохраняется история нормирования – пользователь, добавивший норму, дата добавления, способ нормирования и т.д., что позволяет значительно автоматизировать и сократить процесс нормирования и корректировки норм.

Трудовое нормирование по картам предполагает расчет норм времени по картам нормирования – оцифрованным справочникам общемашиностроительных и отраслевых нормативов. В качестве исходных данных для поиска необходимой карты расчета, а также для расчета в карту передаются данные из PLM-системы. Трудовое нормирование по формулам предполагает укрупненный расчет норм времени по формулам, занесенным в PLM-систему. В качестве исходных данных для поиска формулы, а также в интерфейс расчета передаются данные из PLM-системы с возможностью введения поправочных коэффициентов, влияющих на расчет.

Расчет трудовых норм выполняется в следующей последовательности:

- 1) Загрузка объекта для нормирования.
- 2) Выбор компонента (операция или переход) для нормирования.
- 3) Расчет норм времени по категориям для выбранного компонента.

При выполнении нормирования выбранного элемента PLM-система визуализирует всю необходимую информацию (ресурсы операции (оборудование, профессии, и т.д.), режимы обработки, атрибуты нормируемого элемента, текст технологического перехода).

В PLM-системе присутствует форма временного анализа, позволяющая пользователю визуально оценить процентное соотношение категорий времен в общей длительности операции, без чего в том числе невозможно отрабатывать внедрение в методологию инструмент.

Выполнение задания осуществляется в PLM-системе и на различных этапах создания задания формируются его связи с:

- ДСЕ или модулями, для которых создано задание;
- операцией, на которой планируется использовать задание в первый раз;
- оборудованием, на котором предполагается производить обработку;
- промежуточными состояниями заготовки и результатами обработки, получаемыми на станке с ЧПУ;
- управляющей программой;
- перечнем инструмента и оснастки.

Проектирование моделей заготовок выполняется на основании электронных заданий, сформированных в PLM-системе. По актуальному ЦМИ технолог создает модель заготовки, используя технологию ассоциативного моделирования.

Проектирование моделей станочных приспособлений выполняется на основании электронных заданий, сформированных технологом. По актуальной ЦМИ технолог оформляет электронную модель обстановки (модель промежуточного состояния ДСЕ, набор поверхностей и т.п.), которая используется для задания конструктору. В случае отсутствия ЦМИ задание может быть сформировано в текстовом формате либо с использованием 2Д-эскизов.

В PLM-системе формируются задачи на проектирование оснастки и отслеживается статус их выполнения. Заказ создается для операции в рамках технологического процесса и четко идентифицируется в дальнейшей проработке.

При формировании заказа на проектирование технолог указывает целевую операцию, цех-потребитель, прикладывает ТЗ.

Проектирование и согласование конструкторской документации на оснастку, а также передачу результата технологу реализуется за счет рабочих процессов PLM-системы.

В PLM-системе создаются рабочие процессы проведения изменений в объектах ТПП, которые обеспечивают выполнение методологии проведения изменений в ТПП и включают:

- требования к созданию замечаний к ТП;
- порядок внесения изменений в ТП;
- правила управления статусами и ревизиями ТП.

На рисунке 5.19 представлена блок-схема процесса проведения изменений в ТПП.

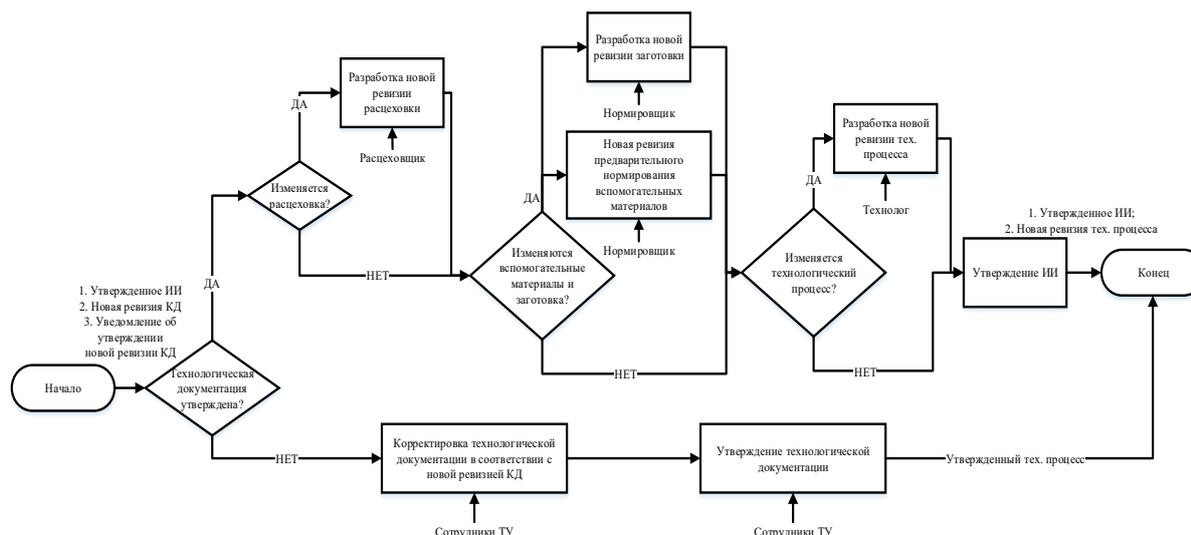


Рисунок 5.19 – Блок-схема процесса проведения изменений в ТПП

Итак, в PLM-системе обеспечивается частичное создание, хранение и согласование документации, созданной на этапе КПП и ТПП, а также хранение и согласование созданных в CAD и CAE-системах ЦМИ, БС и расчетно-аналитические модели с результатами и отчетами, между которыми по принадлежности и возможности выстроены ассоциативные связи. Система поддерживает работу с различными форматами документации и позволяет распределить документацию по типам и к каждому типу документа настроить свой набор атрибутов. Все это позволяет в едином информационном поле двигаться на следующие этапы ЖЦИ.

Как обозначено выше, ключевыми показателями технологичности являются: трудоемкость, материалоемкость и себестоимость, а общая трудоемкость изготовления продукции определяется количеством времени, затрачиваемым на производство единицы продукции. Коэффициент сокращения трудоемкости $K_{\text{сокр}}$ определяется как соотношение трудоемкости изготовления оцениваемой улучшенной продукции к базовой до ее улучшения.

При этом при ТПП стоит учитывать «косвенный» экономический эффект, который может состоять из:

- сокращения затрат вследствие снижения объема неокончательного и окончательного брака;
- снижения простоя производственного оборудования вследствие выхода из строя при неоптимальности выбранной технологии для этого оборудования или в целом;
- снижения износа инструмента, всевозможных штрафных санкций за невыполнение сроков контракта и т.д.

Развитие турбинного предприятия и его продукции по основным обозначенным трем направлениям, безусловно, позволяет выйти на новый уровень КПП, что, в свою очередь, по «принципу домино» позволяет совершенствовать описанные выше инструменты и подходы к ТПП и одновременно обеспечить:

- уменьшение объема технологической подготовки производства;
- сокращение номенклатуры производимых деталей и узлов;
- сокращение объема производимой оснастки и приспособлений;
- преимущественно сокращение перечня, производимого самостоятельно и приобретаемого инструмента.

Такое развитие позволяет повысить качество выпускаемой продукции в связи с тем, что [27]:

- представляется возможным глубоко прорабатывать проектируемые узлы;
- единовременно затрачивать необходимое и достаточное время на отработку серийных технологических операций;

- использовать типовые технологические процессы производства и сборки с возможностью их дальнейшей автоматизации;
- снижать количество переналадок технологического оборудования;
- разрабатывать и совершенствовать методы и способы технического контроля приобретаемых заготовок и производимых узлов и многое другое.

Все указанные позиции из подхода по унификации узлов с глубокой проработкой конструкции и постановки на производство позволяют добиваться у всех образцов продукции высокого качества и высоких технико-экономических показателей с одновременным снижением удельного расхода материалов за счет совершенствования деталей и узлов, окончательного выбора оптимального типа заготовок и снижения коэффициентов раскроя.

Из конструкторской части системы, интегрированной (!) в технологическую часть, передается информация об изделии, необходимая для технологического проектирования, и обратно из технологической части системы в конструкторскую передается информация о спроектированных оснастке, заготовках, операционных эскизах, программах ЧПУ.

Решение конструкторских задач разработки узлов паровых турбин и турбинного оборудования позволяет решать любые технологические задачи, такие как [27]:

- построение структуры техпроцесса;
- проектирование заготовок;
- выбор средств технологического оснащения (оборудование, приспособления, инструмент);
- назначение технологических операций и переходов;
- определение режимов обработки;
- материальное и трудовое нормирование;
- проектирование средств технологического оснащения;
- разработка управляющих программ для станков с ЧПУ.

При этом заявленные подходы параллельной работы конструкторов, технологов, закупщиков, производства и ОТК обеспечиваются в едином информационном поле в связке CAD/CAE/PDM/PLM/CAM, что позволяет начать выполнять ТПП до завершения КПП, и в случае вовлечения

стандартного библиотечного модуля или модифицированного на АРМе ДСЕ, то есть использования частичной унификации, обеспечить завершение ТПП значительной доли ДСЕ синхронно с завершением КПП оборудования, что максимально снизит себестоимость и сократит цикл производства оборудования.

В случае широкого применения Концепции модульного создания паротурбинного оборудования возможно поставить на производство новый образец оборудования с затратами, сроками и качеством, соизмеримым с серийно выпускаемым оборудованием.

Показательным примером эффективной и слаженной работы конструкторов и технологов, работающих в едином информационном поле, является разработка, подготовка производства и анализ целесообразности изготовления «венцовой» диафрагмы в определенных диапазонах высот направляющих лопаток при обеспечении не только сниженной трудоемкости изготовления, но и технологичности, эффективного использования оборудования и инструмента, а также качества исполнения, в том числе характеризующего выполнение каналов решеток и, как следствие, обеспечение расчетного газодинамического совершенства, достигая высоких показателей относительного внутреннего КПД. Параллельная работа по циклу «КПП-ТПП-производство» позволила на УТЗ провести исследования по изготовлению различных вариантов диафрагм ВД с различными технологиями и сделать вывод, что «границей эффективности» между «венцовой» и сварной диафрагмой является значение высоты направляющей лопатки – 67 мм, что, например, в турбине типа Т-100 с активной безбойменной конструкцией ЦВД позволяет эффективно изготовить степени 2-7 «венцовой» конструкции, а 8-9 – сварной.

Авторы считают важным отметить несколько ключевых тезисов, касающихся решений технологическо-производственных задач, позволяющих повысить технико-экономические показатели производимых турбомашин, в том числе паротурбинного, газотурбинного и компрессорного оборудования. Решение и внедрение таких задач позволяет на профильных предприятиях обеспечить развитие подходов и инструментов сопровождения ЖЦ,

оборудования, а также оптимизации внедряемых модульных конструкций проектируемого и производимого турбинного оборудования.

Модуль и подсистема управления ТПП должны получать от производства обратную связь по отклонениям, коллизиям, проблемам, связанным с конструкцией и технологией изготовления ДСЕ и оборудования в целом, и о возможностях усовершенствования бизнес-процессов, инструментов, конструкции и настройки системы.

Процесс контроля качества продукции при производстве состоит из определения количественного значения контролируемых критериев параметра и их сравнения со стандартами общества, отрасли, государства или международных, имеющих рекомендательный характер для сопровождения продукции по нормативным показателям, в соответствии с которыми «ведем» оборудование по всем этапам ЖЦ.

Итак, ключевые тезисы по мероприятиям данной технологическо-производственной группы:

- анализ показывает, что решения, находящиеся на стыке групп/этапов ЖЦИ дают значительный эффект от внедрения, и эффект от них распространяется на максимальное количество этапов ЖЦИ, поэтому целесообразно решать технологические и производственные задачи в связке, реализовывая и проверяя технологические задачи в производстве и наоборот, вводить быстрые корректировки на всех подэтапах ТПП по итогам изготовления ДСЕ, то есть должна быть реализована системная работа технологов-разработчиков и технологов производственных технологических бюро;

- для эффективной работы технологов в связке с конструкторами и производством следует всесторонне использовать визуализацию в электронном виде в специализированном приложении, позволяющем просматривать конструкторскую и технологическую документацию в производственных подразделениях на информационных терминалах и мобильных устройствах;

- производственные подразделения наравне с конструкторскими и технологическими подразделениями всегда должны иметь доступ к

актуальной цифровой конструкторской и технологической документации, что исключает производство по устаревшей конструкторской и технологической документации, сокращаются сроки подготовки к выполнению операций за счет отсутствия необходимости поиска и подбора бумажной документации, а также дополнительные трудозатраты, связанные с подготовкой и использованием такой документации; при этом высокий уровень интерактивности технологических процессов с 3Д-моделями позволяет эффективно получать всю необходимую для работы информацию;

- достижение максимального результата на производстве с комплексным использованием результатов КТПП оптимальным является внедрение практически одновременно проектов перехода к подлиннику конструкторской документации в формате ЦМИ и к цифровой технологической документации на базе аннотированных 3Д-моделей. При этом уже проверено опытом и обозначено выше, что грамотный процесс трансформации предприятия не требует единовременной цифровизации всех служб предприятия, а может быть выстроен планомерно в зависимости от объема номенклатуры узлов, запускаемых в производство на основе ЦМИ;

- помимо цифровой трансформации производственной цепочки надо отметить важность учета основных положений и подходов к внедрению концепции модульного создания паротурбинного оборудования как неотъемлемого направления развития ЖЦ: максимальный эффект от внедрения модульной конструкции оборудования будет достигать только в случае, если вся цепочка ЖЦ будет использовать преимущества модульности, поэтому необходимо идти к цели изменения информационного окружения производственного, эксплуатационного и сервисного персонала – сотрудник взамен большого объема печатной документации получает интегрированную информацию из различных систем с конструкторско-технологической информацией на основе аннотированных 3Д-моделей.

Контрольные вопросы к главе 5

1. Дайте определение термину «Цифровой макет изделия» (ЦМИ).
2. Опишите инструменты параметрического моделирования.
3. Перечислите примеры основных типов связей в PLM-системе.
4. Из каких основных этапов состоит структура расчетного исследования изделия/оборудования?

ГЛАВА 6. ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Для описания цифровизации изготовления энергетического оборудования понадобится отдельная книга, поэтому в рамках данной главы и данного издания, посвященного в целом цифровой трансформации энергомашиностроения и оборудования в энергетике дадим только основные понятия, термины, цели и задачи цифровизации производственных процессов. Дополнительно акцентируем внимание на важном тезисе – цифровизация инструментов изготовления должна учитывать уровень цифровой зрелости остальных этапов ЖЦИ и, в первую очередь, КПП и ТПП.

Цифровизация производства – это процесс преобразования традиционных производственных процессов в цифровые, управляемые с помощью «умных» систем. Суть цифровизации производства – перевод всех производственных данных в цифровую среду, которая позволяет оперативно получать информацию, анализировать и на основе этого принимать более точные и своевременные решения. В отличие от традиционных методов, где механизация отдельных процессов сводится к улучшению физической работы (например, автоматизация отдельных станков), цифровизация охватывает всю экосистему предприятия. Это означает не только применение технологий для управления производственными линиями, но и использование искусственного интеллекта.

Цель цифровизации – адаптировать производство под меняющиеся реалии, то есть сделать его более гибким, и, соответственно, конкурентоспособным. Цифровая трансформация предприятия позволяет его руководству понять, что требуется рынку в данное время, и отладить работу.

Цифровизация производства решает следующие задачи:

- увеличение производительности труда;
- рациональное использование ресурсов;
- снижение себестоимости продукции;
- повышение эффективности производства.

Комплексное влияние на производственные процессы помогает усилить позиции предприятия на рынке, ускорить выпуск новых изделий и повысить их качество, а также оперативно выполнять индивидуальные заказы.

Цифровые системы объединяют все процессы на предприятии в одно пространство, помогая быстро получать данные и контролировать деятельность в реальном времени. Это делает управление промышленной компанией эффективнее и нагляднее.

Цифровизация производства помогает предприятию улучшить результаты работы, снизить расходы, минимизировать влияние человеческого фактора и занять лидирующие позиции на рынке.

Многие компании уже закончили автоматизацию и теперь переходят к цифровой трансформации. При этом ее главным фактором остается искусственный интеллект. Решения на его основе помогают предприятию добиться впечатляющих результатов, так как сокращают число простоев и производственного брака, усиливают безопасность сотрудников и ускоряют процесс работы.

Преимущества внедрения «умных» решений следующие.

Увеличение эффективности производства и улучшение результатов технологических операций при одновременном снижении затрат. Цифровизация позволяет предприятиям сократить производственные простои, уменьшить расходы на техническое обслуживание, увеличить производительность труда. При этом она помогает снизить затраты на хранение материалов.

Создание «гибкого» производства. В условиях меняющегося рынка предприятиям важно адаптироваться к новым реалиям за счет быстрой перенастройки и изменений параметров производственных операций. Умение оперативно менять работу в новых условиях повышает качество обслуживания и лояльность клиентов.

Минимизация воздействия человеческого фактора. Цифровизация помогает автоматизировать и роботизировать все операции, снижая количество времени, затраченного сотрудниками на выполнение рутинных задач. Она не только увеличивает скорость работы, но и минимизирует число ошибок, обусловленных человеческим фактором, так как «умные» решения быстрее и эффективнее, чем люди, обрабатывают большие объемы

информации. Все это ускоряет выпуск новой продукции и повышает ее качество.

Усиление безопасности. Цифровизация позволяет проконтролировать рабочие процессы, поэтому снижает аварийность на производстве. Также она способствует повышению уровня защиты сотрудников, снижению травматизма и воздействия вредных производственных факторов.

Снижение затрат на производство. Цифровизация помогает значительно снизить общие затраты на производство. Это возможно благодаря улучшению управления ресурсами, точному прогнозированию потребностей в материалах и энергии, а также уменьшению времени, необходимого для переналадки и ремонта оборудования. Внедрение цифровых технологий помогает избежать излишних расходов и улучшить финансовые показатели предприятия.

Минимизация ошибок и улучшение качества продукции. Внедрение цифровых решений помогает сократить количество ошибок на всех этапах производства. Интеллектуальные системы могут анализировать данные в реальном времени и вовремя выявлять отклонения, предотвращая выпуск дефектных изделий. Это повышает качество конечной продукции и снижает затраты, связанные с браком и возвратами.

Контрольные вопросы к главе 6

1. Дайте определение термину «цифровизация производства».
2. Обозначьте цель и основные задачи цифровизация производства.

ГЛАВА 7. ПОСТАНОВКА ЦИФРОВОГО ПРОЦЕССА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЯ

В настоящей главе обозначена важность и эффективность научного подхода к исследованиям и совершенствованию процессов всего ЖЦ машиностроительного оборудования от разработки до обслуживания с закладыванием в конструкцию основ и возможностей использования инструментов эффективного управления ЖЦ не только при подготовке производства и изготовления, но и на этапах реконструкции и модернизации, эксплуатации и сервисного обслуживания как оборудования, так и объекта в целом.

Этапы ЖЦ для различных отраслей деятельности и, соответственно, продуктов фактически одинаковы и согласно [39] имеют следующую последовательность:

- замысел и планирование;
- анализ и постановка задачи;
- проектирование и разработка;
- развертывание, производство и внедрение;
- эксплуатация;
- сопровождение;
- модернизация;
- утилизация.

Применительно к промышленной продукции, в том числе к энергетическому оборудованию, можно использовать стандартное представление ЖЦИ по ИСО серии 9000, которое в соответствии с типовыми этапами представлено на рисунке 7.1.

Согласно ГОСТ Р [40] ЖЦИ имеет несколько другое разделение на этапы: «Жизненный цикл изделия – это совокупность этапов, через которые проходит изделие за время своего существования:

- маркетинговые исследования;
- составление технического задания;
- проектирование;
- подготовка производства;



Рисунок 7.1 – Типовой жизненный цикл продукции

- изготовление;
- поставка;
- эксплуатация;
- ремонт;
- утилизация».

Фактически ЖЦИ – это период времени от начала создания продукции до окончания его востребованности на рынке и прекращения производства.

Процессы, которые протекают в процессе ЖЦИ, в свою очередь, встраиваются в модель Системы менеджмента качества в соответствии с ИСО 9000:2015, которая представлена на рисунке 7.2 [41].

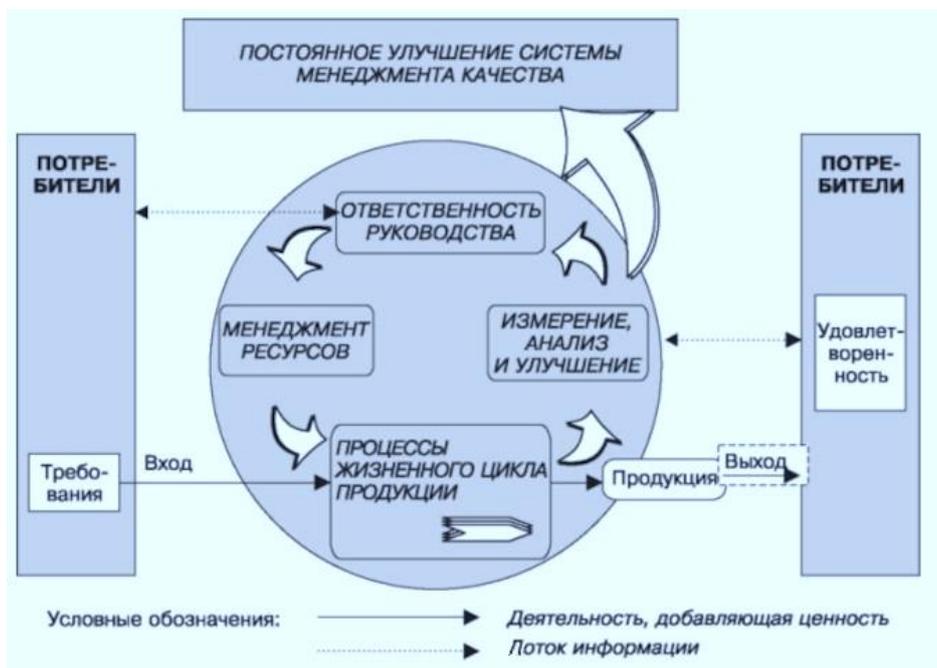


Рисунок 7.2 – Модель Системы менеджмента качества по ИСО 9001

Далее будут обозначены конструкторские и технологические технические решения, позволяющие оптимизировать модули, конструкцию, сборку паровых турбин и турбинного оборудования для достижения максимального эффекта от управления ЖЦ оборудования и, как следствие, от использования модульной концепции проектирования оборудования, цифровой трансформации предприятий, участвующих в ЖЦ, что позволяет достичь высоких технико-экономических показателей паротурбинных установок при эксплуатации на энергетических объектах.

Задачи по внедрению новых решений разделяются на группы в соответствии с местом приложения результатов их решения, то есть этапом ЖЦ оборудования. На рисунке 7.3 представлено разделение ЖЦ на группы.



Рисунок 7.3 – Разделение жизненного цикла изделия на группы приложения решений

Как показано в работе, именно решения по управлению ЖЦИ или оптимизации конструкции или средств разработки и управления ЖЦИ, находящиеся на стыке групп, например, конструкторской и технологической подготовки производства, приводят к положительному результату внедрения, дают максимальный эффект от внедрения, и эффект от них распространяется на максимальное количество этапов ЖЦИ. При этом чем к более раннему этапу ЖЦИ относится внедренное решение, тем больший эффект в течение

всего ЖЦ достигается, что можно сравнить с цепной реакцией или «принципом домино». Таким образом, именно внедрение «ноу-хау» конструкторско-технологической группы закладывает максимальные эффекты: от надежности до экономики, что объяснимо, так как именно конструктор или конструктор вместе с технологом прорабатывает потенциальное влияние закладываемого решения на весь ЖЦ. В наукоемком турбинном оборудовании, разработка которого зависит от глубоко проработанных научно-технических решений, такое «явление» максимально выражено.

Таким образом, надо еще и еще раз поставить акцент на важности эффективного управления ЖЦИ на всех этапах без исключения и «устраивать» «принцип домино», возвращая решение задач максимально на начальные этапы ЖЦ по ходу реализации проекта с разных стадий, соответствующих этапам, для чего, например, осуществлять:

- уточнение конструкции оборудования по итогам технологической подготовки производства или собственно производства;
- уточнение конструкции и переработка изделия по итогам строительно-монтажных или пусконаладочных работ на стенде или объекте;
- модернизацию оборудования или реконструкцию объекта по опыту эксплуатации или сервисного обслуживания данного оборудования;
- модернизацию оборудования или реконструкцию объекта по получению нового положительного опыта эксплуатации или сервисного обслуживания другого оборудования этого или другого, в том числе конкурирующего, предприятия.

Можно привести множество примеров решения таких задач по основному и вспомогательному энергетическому оборудованию, в результате которых выполняются доработки конструкции оборудования, пересматриваются схемы энергоблоков, изменяются технологии работы оборудования на переходных режимах, пересматриваются руководства по эксплуатации, формируются и перерабатываются регламенты сервисного обслуживания и многое другое.

Применительно к отечественному паротурбостроению представим один небольшой, но наглядный пример переработки УТЗ конструкции одного и того же ЦСД паровой турбины типа Т-185/220-12,8.

На рисунке 7.4 представлена эволюция конструкции ЦСД базовой турбины типа Т-185/220-12,8.

На эволюцию конструкции ЦСД, представленную на рисунке 7.4, влияло в разное время несколько факторов. На рисунке 7.4, а представлен продольный разрез ЦСД изначальной конструкции турбины типа Т-175/210-130, разработанной УТЗ и поставленной на Ново-Иркутскую ТЭЦ впервые в 1979 году и до 1984 года таких турбин было поставлено 7 штук. С 1984 года турбина поставлялась в новой модификации как Т-185/220-130-2, при этом была пересмотрена только проточная часть ЦВД с увеличением расхода свежего пара и мощности без изменения ЦСД, а, соответственно, без оптимизации конструкции корпуса цилиндра и концептуального изменения схемы цилиндра. Таких турбин завод с 1984 по 1999 год поставил 13 единиц, в том числе две в КНР на ТЭЦ Хуанен-Пекин.

При осуществлении КТПП использовались общепринятые в машиностроительной практике подходы к унификации и не использовались модульные принципы. При этом детали и сборочные единицы ЦВД и ЦНД широко применялись с других турбин номенклатурного ряда УТЗ: Р-100/105-130/15, Р-102/107-130/15-2, ПТ-135/165-130/15, а также использовались при разработке новых, например, типа ПТ-140/165-130/15-2.

На рисунке 7.4, б представлен ЦСД турбины типа К-110-1,6 переработанной конструкции, который разработан с унификацией проточной части турбины типа Т-185/220-130-2 (4), но со значительно измененной конструкцией цилиндра.

Паровая турбина типа К-110-1,6 представляет собой двухцилиндровый агрегат [42-44], проточные части которого разработаны на базе проточных частей ЦСД и ЦНД турбины Т-185/220-130-4.

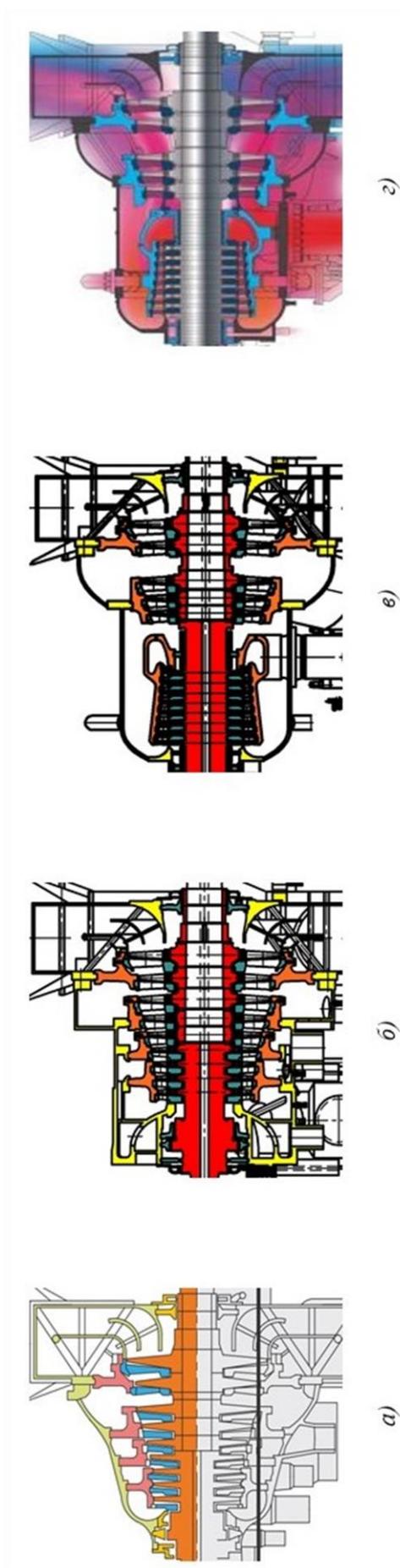


Рисунок 7.4 – Эволюция конструкции ЦСД паровой турбины типа Т-185/220-12,8 производства УТЗ: а) ЦСД турбины типа Т-175/210-130; б) ЦСД турбины типа К-110-1,6; в) ЦСД турбины типа Т-113/145-12,4; г) ЦСД турбины типа Т-185/220-12,8-NG

Турбина типа К-110-1,6 предназначена для питания отработавшим паром турбины типа Р-100/105-130/15, которая простаивала на ТЭЦ из-за отсутствия необходимости в производственном паре, потребность в котором исчезла на объекте в связи с изменением технологии крекинга нефти и после установки приключенной паровой турбины типа К-110-1,6 и небольшой реконструкции противодавленческой турбины типа Р-100, фактически вводится в эксплуатацию двухвальная паровая турбина типа Т-185 мощностью 210 МВт. Первая такая турбина была введена в эксплуатацию на Тобольской ТЭЦ в 2011 году. Две аналогичные турбины позднее в 2015 году введены в эксплуатацию на Нижнекамской ТЭЦ-2.

Изменения конструкции ЦСД двухцилиндровой паровой турбины типа К-110-1,6 относительно турбин типа Т-185 при полном сохранении проточной части связаны с тремя ключевыми факторами:

- необходимостью организации парораспределения турбины с подводом пара к ЦСД турбины, осуществляемым от двух стопорно-регулирующих клапанов;

- возможностью осуществления оптимизации конструкции корпуса цилиндра, выполненного сварным с использованием эллиптических днищ и уходом от использования крупногабаритного литья;

- изменением участия ЦСД в принципиальной схеме ПТУ с исключением теплофикационных отборов. При этом без закладывания модульной концепции и возможностью осуществления перевода турбины в теплофикационный тип Т-70/110-1,6. Необходимо отметить, что эксплуатирующие организации с 2022 года всерьез рассматривают перевод всех трех турбин на теплофикацию. При этом конструкция турбины и компоновочные решения не предполагают малозатратной реконструкции, так как такая возможность не была заложена проектом несмотря на настаивании со стороны УТЗ.

На рисунке 7.4, в представлен ЦСД турбины типа Т-113/145-12,4 [42, 45-47]. Такой ЦСД разработан для теплофикационной паровой турбины типа Т-113/145-12,4, предназначенной для работы в составе ПГУ-410 на Краснодарской ТЭЦ, в состав которой также входит первая в России большая

газовая турбина типа M701 F4 производства фирмы «Mitsubishi Heavy Ind.» номинальной мощностью 303 МВт и котел-утилизатор производства ОАО «ЭМАльянс» (Силовые машины). Паровая турбина типа Т-113/145-12,4 представляет собой трехцилиндровый агрегат и отличается значительной новизной конструкций цилиндров турбины, что обусловлено, прежде всего, тем, что она проектировалась для работы в составе трехконтурной ПГУ с промежуточным перегревом пара.

ЦСД выполнен двухкорпусным с петлевой схемой течения пара в проточной части. Необходимость такого решения продиктована главным образом, тем, что при этом зона повышенных температур (зона паровпуска) максимально отдалается от среднего подшипника. При этом в межкорпусное пространство цилиндра подается пар низкого давления из третьего контура котла-утилизатора. Внутренний корпус ЦСД выполнен сварно-литым, сборным, состоящим из сварно-литой верхней образующей корпуса с патрубками и фланцами горизонтального разъема и литой нижней образующей. Конструкция позволяет выполнить все задачи цилиндра, включая повышенные требования к маневренности работы турбины в составе ПГУ, является более технологичной по сравнению с конструкцией ЦСД турбины типа К-110-1,6, еще больше использует стандартные металлургические заготовки и упрощенные решения по сборке. Такая конструкция при правильном построении конструкторского, а следом и технологического, дерева изделия, позволяющего без затрат ресурса конструктора и технолога использовать его стандартные элементы, может максимально удовлетворить требования к вышеупомянутым турбинам, которые у УТЗ формируют Класс В.2 и дополнительный Класс Н.2. При разработке цилиндра впервые закладывались подходы модульного проектирования.

На рисунке 7.4, з представлен ЦСД турбины типа Т-185/220-12,8 NG для Красноярской ТЭЦ-3, отгруженной УТЗ в 2022 году. Данная конструкция ЦСД является показательным примером эволюции цилиндра, по которому была найдена концепция, позволяющая выполнить все требования по подводам и отводам пара, присоединительным размерам, разделению на

модули/подмодули с обеспечением взаимозаменяемости. На стадии разработки турбины фактически выполнялась оптимизация стандартных библиотечных модулей внутреннего и наружного корпусов, обойм, обтекателей и рассекателей, в рамках которой корректировались газодинамические обводы, толщины стенок и геометрия фланцев с пересмотром металлургических форм отливок и уточнением стандартизированных заготовок из штамповки и поковки.

Основное и вспомогательное паротурбинное оборудование является очень наукоемким изделием, но не только с точки зрения разработки и производства, но и не менее наукоемким на последующих стадиях ЖЦ: монтаж, пусконаладка, эксплуатация и сервисное обслуживание. Поэтому влияние подходов к КТПП, инструментов и средств сопровождения ЖЦ оборудования оказывает особое влияние на качество и эффективность сопровождения ЖЦ. При этом с развитием конструкции оборудования, технологий производства, инструментов и средств сопровождения ЖЦ, включая эксплуатацию и сервис, их влияние все более значительно на показатели управления ЖЦ, что указывает на все большую и большую актуальность внедрения современного научно обоснованного управления ЖЦ паротурбинного оборудования.

Как обозначалось ранее в обзоре развития отечественного паротурбостроения, эволюция, и ее скорость, и факторы (например, одновременная реализация проектов с решение зависимых вопросов металлургии, котлостроения и генераторостроения), безусловно, также оказали значимое влияние на формирование особенностей разработки и управления ЖЦ паротурбинного оборудования.

Ранее в предыдущем параграфе были обозначены особенности истории развития паротурбостроения, которое развивалось сразу по нескольким сценариям параллельно ускоренными темпами, не дожидаясь результатов предыдущих этапов развития. На особенности управления ЖЦ паротурбинного оборудования также оказывает влияние конструкторская школа турбостроения, отечественная технологическая школа, опыт эксплуатации действующего оборудования с учетом накопленного опыта во

всех смежных отраслях науки и промышленности. Перечислим такие основные факторы, влияющие на текущие особенности и возможности управления ЖЦ паротурбинного оборудования:

- развитие в отечественной школе паротурбостроения подходов к унификации;

- многофакторное развитие создания модельных рядов паровых турбин разных типов и принципиальных схем с одновременным ростом установленной мощности агрегатов, с переходом к разработке и производству крупных турбин с уменьшением числа ступеней и цилиндров;

- стремительный рост мощности энергетики, которая развивалась вслед за потребностью развития промышленности;

- развитие по синусоиде с периодическим формированием расширенного ряда паровых турбин различного типа, мощности и решений, что негативно приводило к разнообразию типоразмеров и к конструктивно-технологическим излишествам, увеличению стоимости, сроков разработки и изготовления, трудовых и производственных ресурсов со снижением унификации в пользу индивидуальных решений и увеличения технико-экономических показателей оборудования;

- одновременность решения задач развития паротурбостроения сразу и головным, и отраслевым научно-исследовательским институтам с разночтением внедряемых решений по разработке профилей турбоустановок;

- масштабная межзаводская, межотраслевая и межгосударственная кооперация производства;

- доведение до производства и эксплуатации сразу нескольких вариантов оборудования с дальнейшим выбором наилучшего;

- необходимость высокой скорости увеличения установленной мощности энергетики, что предопределяло срочность запуска неотработанных стандартных турбин с одновременным развитием межзаводской и межотраслевой кооперации и унификации;

- разный приобретенный опыт эксплуатирующего персонала, обслуживающего различное оборудование, которое разработано разными школами различной специализации;

- особенности производственного процесса изготовления турбинного оборудования, связанные с малым количеством одновременно находящегося в производстве однотипного оборудования, полным отсутствием или частичным исключением опытного производства.

Все особенности формирования номенклатуры, разработки, производства и сервиса, безусловно, связаны между собой.

В том числе такими факторами стали качество и глубина ранее обозначенных ключевых базовых принципов, используемых при внедрении унификации и модульных подходов: правильность определения границ унификации, разделения базовой турбины на модули и подмодули и качество обеспечения взаимозаменяемости/применимости модулей и подмодулей.

Дополнительно необходимо отметить «обратное явление», которое показывает, что любые технические решения, относящиеся к последующим этапам ЖЦИ, которые выявлены и реализованы уже только на этих стадиях ЖЦИ, дают, как правило, значительно увеличенный эффект, если проблема/решение учитывается в конструкции турбинного оборудования, то есть при новой разработке или более глубокой модернизации. Такое «обратное явление» очередной раз доказывает мегаважность «обратной» связи в адрес участников ранних этапов ЖЦИ, в первую очередь конструктора, имеющего возможность решения выявленной проблемы с максимальным эффектом. Именно поэтому авторы на всех энергомашиностроительных предприятиях «проповедают» положительную практику «блиц обратной связи», реализуемую и впервые реализованную на АО «УТЗ»: шеф-инженеры являются сотрудниками отдела внешнего монтажа конструкторского бюро (не коммерческого и не отдельного сервисного подразделения!), пусконаладкой и сдачей заказчику турбоустановки в составе энергоблока занимаются сотрудники отделов систем управления и исследования турбин в эксплуатации конструкторского бюро, сопровождением сервиса и производства тоже занимаются отдельные отделы конструкторского бюро с функциональным подчинением отдельному заместителю главного конструктора по сервису, в том числе курирующего проекты модернизаций, и заместителю главного конструктора по производству, курирующего производство и монтаж нового

оборудования на объекте. Таким образом, предлагается к внедрению концепция, когда конструкторское подразделение полноценно участвует во всех этапах ЖЦ турбинного оборудования, при этом на всех этапах подразделениями по принадлежности разрабатываются, внедряются и анализируются на последующих стадиях инженерные и научно-технические решения, что позволяет максимально эффективно автоматизировать и управлять ЖЦИ.

Особенности разработки и управления ЖЦ паротурбинного оборудования касаются специальных вопросов трех основных направлений развития бизнес-процессов турбинных заводов и особенностей эволюции конструкций такого оборудования, обозначенных на рисунке 4.2: 1) модульная концепция, использующая модульные принципы и подходы на протяжении всего ЖЦИ от разработки, производства до утилизации; 2) оптимизация конструкции и функций оборудования за счет совершенствования составляющих модулей; 3) цифровая трансформация предприятия с повышением уровня цифровой зрелости, влияющая на эффективность всех этапов ЖЦИ. Все это касается только управления ЖЦ оборудования, которое идет по этим направлениям развития оборудования вместе с предприятиями, на которых оно производится.

Типовой ЖЦИ промышленного предприятия с выделением последовательности в соответствии со стандартом ИСО серии 9000 представлен на рисунке 7.1.

На каждой стадии ЖЦ оборудование сопровождается трудовыми, временными, финансовыми и материальными затратами, а также определенной информацией с конкретными идентифицирующими наименованиями, условными обозначениями, кодами и номерами, позволяющими обеспечивать разработку, производство и сопровождение в эксплуатации и сервисе с необходимым качеством.

В таблице 7.1 представлены стадии ЖЦ промышленной продукции и соответствующие объекты идентификации, необходимые для их реализации, включая необходимые ресурсы и документацию.

Таблица 7.1 – Стадии ЖЦ промышленной продукции и их реализация

№ п/п	Стадия ЖЦИ	Объекты и документы
1	Маркетинг	Наименования и основные технические характеристики аналогов. Техническое задание
2	Проектирование и разработка	Составные части, покупные изделия и материалы. Конструкторские документы
3	Закупки/снабжение	Покупные изделия и материалы. Документы по материально-техническому снабжению
4	Подготовка производства	Оборудование, инструмент, средства контроля. Технологические документы
5	Производство	Материалы, инструмент, приспособления
6	Контрольные испытания	Средства контроля, методы испытаний, реальные характеристики, документ о качестве продукции
7	Упаковка и хранение	Потребительская и транспортная упаковка. Характеристики транспортирования и хранения
8	Поставка/реализация	Финансовые и товаросопроводительные документы
9	Монтаж и эксплуатация	Приспособления, оборудование, инструменты. Требования к монтажу и эксплуатации
10	Обслуживание и ремонт	Материалы, запасные части. Ремонтная и эксплуатационная документация
11	Утилизация	Приспособления, инструменты, расходные материалы. Документы по утилизации

Каждая стадия ЖЦ оборудования сопровождается бизнес-процессами предприятий – участников стадий, которые требуют совершенствования. Паротурбинное оборудование не только не является исключением, но и с учетом наукоемкости совершенствование позволяет добиться наибольшего роста эффективности ЖЦ.

Как ранее обозначено, значительное повышение эффективности оборудования и снижение затрат сопровождения его ЖЦ возможно только при движении по взаимно дополняемым направлениям развития: цифровые инструменты как высокопроизводительные средства организации и выполнения КТПП, производства, монтажа, пусконаладки, эксплуатации и сервисного обслуживания оборудования; разработка и внедрение модульной концепции как комплексная методология закладывания теоретических основ деталей и машин, позволяющих добиться максимальной стандартизации, типизации, классификации конструкции и унификации, обеспечивающих конструкторскую, технологическую и функциональную преемственность и возможность выстроить по критическому пути все бизнес-процессы создания и производства всей номенклатуры оборудования предприятия, а также средства и инструменты постоянного совершенствования и оптимизации конструкции модулей и подмодулей.

Потенциал сокращения всех видов затрат на сопровождение ЖЦ оборудования всего номенклатурного ряда предприятия необходимо оценивать по разрыву текущего уровня показателей и параметров ЖЦ оборудования номенклатуры предприятия с учетом его расширения к выходу на целевой уровень: «Высокий» или «Инновационный» уровни, обозначенные в [1, 2].

«Высокий» уровень при реализации проектов развития должен быть промежуточным, соответственно, эффект – также промежуточным, а «инновационный» уровень – целевым, при этом на этом уровне существования предприятия происходит непрерывное совершенствование методов, подходов, бизнес-процессов, инструментов и ресурсов модульного проектирования с разработкой и внедрением инновационных решений, что становится системой и культурой. Доля модулей в основном паротурбинном оборудовании по

численности ДСЕ составляет более 70%, унификация – более 80%. В каждом новом проекте доли модульности и унификации растут относительно средних показателей, и модули оптимизируются.

Сокращение всех видов затрат в рамках повышения эффективности возможно проводить на каждой стадии ЖЦИ или этапе ЖЦ оборудования, но авторы убеждены и ранее показали на практике, что внедрение решений на более раннем этапе ЖЦ оборудования приводит к наибольшему эффекту по «принципу домино», доказывающему причинно-следственными связями, что эффект, заложенный на этапе КТПП, дает эффект на всем протяжении ЖЦ, а в наукоемком турбинном оборудовании, разработка которого зависит от глубоко проработанных научно-технических решений, позволяющих снизить все виды затрат на этапах монтажа, пусконаладки, эксплуатации и сервисного обслуживания такое, «явление» максимально выражено и приводит к кратным эффектам.

Ранее показано, что нужно использовать и «устраивать» такое явление, возвращая решение задач максимально на начальные этапы ЖЦ по ходу реализации проекта с разных стадий, соответствующих этапам. При этом важно возвращаться к реконструкциям, модернизациям на реализованных проектах и модификациям оборудования для новых проектов по опыту монтажа, пуско-наладки, эксплуатации и сервисного обслуживания. Необходимо «выбирать» потенциал сокращения затрат, осуществляя совершенствуя подходы, принципы, средства и инструменты, а также выполнять:

- уточнение конструкции оборудования по итогам технологической подготовки производства или непосредственно самого производства;
- уточнение конструкции и переработку изделия по итогам строительно-монтажных или пусконаладочных работ на стенде или объекте;
- модернизацию оборудования или реконструкцию объекта по опыту эксплуатации или сервисного обслуживания данного оборудования;
- модернизацию оборудования или реконструкцию объекта по получению нового положительного опыта эксплуатации или сервисного

обслуживания этого или другого оборудования, в том числе конкурирующего, предприятия.

Применительно к отечественному паротурбостроению представлен пример переработки конструкции ЦСД паровой турбины типа Т-185/220-12,8 производства УТЗ, представленный на рисунке 7.4. Конструкция ЦСД эволюционировала по опыту производства, включая решение в разное время вопросов снабжения и технологии, а также эксплуатации и обслуживания действующего оборудования в разных условиях разными организациями.

Представим коротко описание стадий/этапов типового ЖЦ промышленного оборудования в соответствии с ИСО 9000 с учетом возможности «перекладывания» его на паротурбинное оборудование.

Маркетинг. На этом этапе ЖЦ происходит процесс планирования и управления разработкой оборудования, определение цен, продвижением оборудования клиентам, сбытом, чтобы полученная номенклатура предприятия удовлетворяла заказчиков. На этом же этапе при разработке нового оборудования определяются с наименованием, обозначением, характеристиками и показателями оборудования и анализируется аналогичное оборудование конкурентов, по результатам чего согласовывается профиль оборудования со смежными участниками ЖЦ (заказчик, генеральный проектировщик объекта, монтажная и пусконаладочные организации, поставщики смежного оборудования и др.). С учетом результатов маркетинговых исследований и анализа рынка разрабатывается техническое задание на проектирование (или сразу технические условия на поставку) нового оборудования, обладающего определенными характеристиками (качество, функциональные возможности, потенциал совершенствования при доступности ценовых показателей). Также на этом этапе формируются параметры, технико-экономические и эксплуатационные показатели, профиль и облик оборудования с учетом закладываемой надежности и безопасности с предоставлением гарантийных обязательств, а значит, на этой стадии формируются затраты поставщика, размеры которых будут зависеть от эффективности выполнения его обязательств на следующих этапах ЖЦ.

Проектирование и разработка. На этом этапе разрабатывается комплект конструкторской и частично технологической документации, в которой устанавливаются признаки оборудования (марка, тип, модификация), наименование, условное обозначение, обозначение документа, а также определяется его назначение и область применения и характеристики, необходимые и достаточные для согласования параметров оборудования с участниками ЖЦ.

На этой стадии, как правило (если не разработаны ранее), разрабатываются Технические условия (ТУ), являющиеся единственным конструкторским документом в пакете документов договора в качестве приложения, которое может уточняться в процессе проектирования.

Также на стадии определяются все составные части оборудования, а также покупные изделия и материалы, которые должны быть обеспечены на этапе закупки и снабжения и использованы в производстве, что указывает на важность этапа в части оптимальности формирования затрат.

Закупки/снабжение. Заказ покупных изделий и материалов осуществляется на основе их идентификации в конструкторских и технологических документах. Все виды затрат практически в полном объеме зависят от предыдущих этапов ЖЦ.

Подготовка производства. На этапе подготовки производства возникает потребность в приобретении технологического оборудования, оснастки, инструмента, средств контроля, необходимых для изготовления продукции, а также необходимость в разработке технологических документов и конкретных технологических операций. От этапа, также как от конструкторской подготовки производства, значительно зависят затраты, формируемые на следующих этапах ЖЦ, что указывает на важность этапа в части оптимальности формирования затрат.

Производство. При производстве продукции используются материалы, оборудование, обрабатывающие и измерительные инструменты, обеспечивающие соответствие изготовленных деталей и узлов требованиям конструкторских и технологических документов. Все виды затрат практически в полном объеме зависят от предыдущих этапов ЖЦ.

Контрольные испытания. Изготовленное оборудование подвергается контролю и различным видам испытаний в соответствии с руководящими нормативными документами и программами методиками испытаний с использованием конкретных приборов, стендов, специального оборудования, которые идентифицированы в технологической документации.

Результаты контроля и испытаний устанавливают соответствие изготовленных составных частей, систем и оборудования в целом требованиям конструкторской и технологической документации, что находит отражение в документах Отдела технического контроля (ОТК), подтверждающих качество продукции и ее соответствие предъявляемым к ней требованиям.

Упаковка и хранение. Изготовленная продукция с документами, подтверждающими ее качество, подлежит упаковыванию, транспортированию и хранению в соответствии с требованиями, установленными в документе, по которому она поставляется. К таким документам могут быть отнесены стандарты и технические условия, в которых установлены правила упаковки, транспортирования и хранения, а также указаны конкретные средства упаковывания, конкретные средства транспортирования (закрытый вагон, платформа, автофургон и др.), средства хранения (открытая площадка, навес, отапливаемый склад и т.д.). В стандартах и технических условиях на поставку указывают условия транспортирования и хранения, включая диапазон допустимых условий, возможность штабелирования упаковок, места крепления и т.д.

Поставка/реализация. На этапе поставки используются финансовые и товаросопроводительные документы, которые содержат большое количество идентификационных кодов и наименований, включая наименование и код предприятия или организации, адресные и банковские реквизиты.

Монтаж и эксплуатация. На этапе строительно-монтажных работ используются различные приспособления для монтажа и специальные инструменты, идентифицированные по наименованиям и обозначениям, а также расходные материалы, необходимые для эксплуатации оборудования. Все виды затрат в значительной степени зависят от разработки и подготовки

производства, то есть от профиля оборудования и его функциональных возможностей.

Обслуживание и ремонт. При послепродажном обслуживании и ремонте широко используются необходимые запасные части и различные материалы, подлежащие замене при их износе в процессе эксплуатации оборудования. Все виды затрат в значительной степени зависят от разработки и подготовки производства, то есть от профиля оборудования и его функциональных возможностей.

Утилизация. На этом этапе могут использоваться специальные приспособления для подготовки оборудования к утилизации.

Коммерческая тайна не позволяет раскрывать финансово-экономические показатели предприятия и их изменение в результате реализации проектов трансформации. Однако необходимо отметить, что сокращение финансовых затрат УТЗ и площадки ЛМЗ на стадиях ЖЦ от исследования и разработки до поставки оборудования привели к снижению себестоимости КТПП и собственно производства основного паротурбинного оборудования на 20%. Можно индикативно обозначить размеры финансовой экономии предприятия только на разработке основного оборудования. Разработка «с нуля», то есть без унификации, одноцилиндровой паровой турбины с использованием «электронного кульмана» в среднем составляет:

- конструкторская подготовка производства (КПП) – 50 000 н/ч;
- технологическая подготовка производства (ТПП), трудоемкость которой достигает от 3 до 4 раз от КПП (проработка, определение и сопровождение металлургических заготовок, инструментальная подготовка производства, сварка, предварительная и окончательная механическая обработка, сборка, подготовка испытаний) – 150 000 н/ч;
- разработка проектно-конструкторской документации (ПКД), то есть подготовка, согласование, переработка и передача исходных данных по «ячейке ПТУ» Генеральному проектировщику (принципиальные схемы, компоновка и площадки с разрезами, рабочие чертежи трубопроводов пара, воды, масла, задания на фундаменты, КИП, ЭЧСРиЗ и др.) – 50 000 н/ч.

Суммарно трудоемкость выполнения КПП, ТПП и ПКД одноцилиндровой паровой турбины в формате использования САПР как «электронного кульмана» без инструментов и подходов «тяжелого САПР» и без затрат на разработку вспомогательного оборудования составляет 200000 н/ч. При этом в случае использования «тяжелого САПР», концепции модульного проектирования с достижением уровня унификации конструкции до доли 85% и использование заделов библиотек, трудоемкость такого объема конструкторских и технологических служб может составить 50-60 тыс н/ч., половина из которых будет затрачена на разработку ПКД под конкретные требования объекта. Себестоимость 1 н/ч в разное время новейшей истории на различных отечественных турбинных предприятиях составляла от 1000 до 2500 рублей, а значит, экономия только на этапе подготовки производства может составить от 140 до 375 млн рублей, что в зависимости от предмета (мощность, параметры и функционал) и объема поставки ПТУ может составлять до 20% от стоимости поставки, то есть сопоставимо с полным размером экономии, которая в зависимости от ценовой политики может составлять прибыль по договору поставки оборудования ПТУ или формировать возможности по ценовой конкуренции.

Значимым фактором повышения конкурентоспособности УТЗ стало сокращение периода запуска нового образца паровой турбины от «осевой линии до выдачи рабочих чертежей критических длинноцикловых заготовок» с 7-9 месяцев до 2-3 месяцев. Справедливо добавить, что запуск изготовления таких заготовок в советское время при полноценном прохождении всех стадий проектирования (эскизно-технический проект, технический проект, рабочий проект) длился 5-6 лет. Такое сокращение сроков по запуску и дальнейшей разработке и производству позволило сократить продолжительность выполнения договорных обязательств поставке паротурбинного оборудования до 11-14 месяцев против 18-20 месяцев по одноцилиндровой турбине; до 13-18 месяцев по двухцилиндровой турбине против аналогичных 20-26 месяцев; до 22-24 месяцев по трехцилиндровой турбине против 30-36 месяцев до такой трансформации. При этом в 60-е, 70-е, 80-е годы такие обязательства выполнялись 5-8 лет. Продолжительность изготовления на УТЗ

серийной трехцилиндровой турбины типа Т-120/130-12,8-8 [48, 49] сократилась по отдельным проектам до 11 месяцев, что обеспечивалось достижением высокого уровня унификации к другим турбинам предприятия и достигающей по «спецификации продольного разреза паровой турбины» до 75% с последующим модифицированием турбины типа Т-125/150-12,8-9 [50] в еще большую конструктивную и технологическую преемственность ДСЕ, практически подводящую конструкцию турбины к модульной.

На рисунке 7.5 представлена зависимость влияния участников ЖЦ оборудования на повышение его эффективности сопровождения ЖЦ и затраты на такое совершенствование от начальных до конечных этапов ЖЦ.

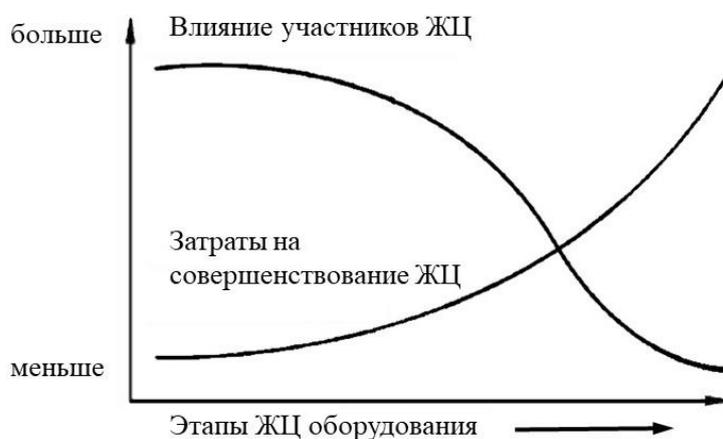


Рисунок 7.5 – Зависимость влияния участников ЖЦ оборудования на повышение его эффективности сопровождения ЖЦ и затраты на такое совершенствование от начальных до конечных этапов ЖЦ

Анализ ЖЦ паротурбинного оборудования показывает, что затраты на реализацию мероприятий по совершенствованию ЖЦ оборудования с аналогичным эффектом на поздних этапах значительно превосходят затраты начальных этапов ЖЦ, и, соответственно, влияние участников ЖЦ на совершенствование сопровождения оборудования уменьшается, как, собственно, и уменьшается количество участников сопровождения ЖЦ, влияющих на эффект.

Далее обозначены приоритетные группы мероприятий и решений совершенствования ЖЦ паротурбинного оборудования.

Первый и основной тезис по теме совершенствования ЖЦ паротурбинного оборудования – это **системный и комплексный подход**,

охватывающий все этапы и всех участников сопровождения ЖЦ оборудования. При этом, чем к более раннему этапу ЖЦИ относится внедренное решение, тем больший эффект в течение всего ЖЦ достигается, что ранее было сравнено с цепной реакцией или «принципом домино». Таким образом, именно внедренное конструктором «ноу-хау» позволяет достичь максимальных эффектов: от надежности до экономики, что объяснимо, так как именно конструктор или конструктор вместе с технологом прорабатывают потенциальное влияние закладываемого решения на весь ЖЦ, а в наукоемком турбинном оборудовании, разработка которого зависит от глубоко проработанных научно-технических решений, такое «явление» максимально выражено.

Для эффективного сопровождения и управления ЖЦ оборудования необходимо на всех этапах без исключения «устраивать» «принцип домино», возвращая решение задач максимально на начальные этапы. Максимально эффективными для рассматриваемого оборудования и для дальнейшего развития предприятий, участвующих в ЖЦ, будет уточнение, оптимизация, модернизация конструкции оборудования по итогам и получению опыта реализации последующих этапов технологической подготовки производства, производства, строительно-монтажных или пуско-наладочных работ, испытаний или эксплуатации и сервиса.

Качественное и своевременное выявление приоритетных направлений совершенствования ЖЦ паротурбинного оборудования как высоко наукоемкого на всех этапах ЖЦ возможно только с учетом качественно налаженной обратной связи в адрес начальных этапов ЖЦ, то есть в адрес конструкторов, имеющих возможность решения выявленной проблемы с максимальным эффектом. Поэтому уже описанное выше «обратное явление», которое показывает, что любые технические решения, относящиеся к поздним этапам ЖЦ турбинного оборудования, которые выявлены и реализованы уже только на этих этапах, дают увеличенный эффект от внедрения, если решение проблемы затронет изменение конструкции оборудования при его глубокой модернизации, то есть «частичный возврат» ЖЦ оборудования и объекта в целом на этапы КТПП и производства, где, как обозначено выше, можно

добиться максимального эффекта от внедрения при минимальных затратах.

Концепция модульного создания паротурбинного оборудования в обязательном порядке (!) должна учитывать полноценное участие конструкторского подразделения на всех этапах ЖЦ турбинного оборудования. При этом на всех этапах подразделениями по принадлежности разрабатываются, внедряются и анализируются на последующих стадиях инженерные и научно-технические решения, что позволяет максимально эффективно автоматизировать и управлять ЖЦ оборудования.

Необходимо отметить, что изначально процессы концептуального проектирования, все стадии КТПП были разработаны для единственно доступной в то время возможности выражения идей, направленной на разработку и выпуск документации в бумажном виде. Дальнейшее использование на следующих этапах ЖЦИ документации на бумажных носителях, имеющиеся в производстве технологические возможности диктовали существенные ограничения для эффективного обращения информации в производстве, эксплуатации и сервисе оборудования. А цифровые инструменты, модульные подходы к конструированию позволили эффективно параллельно участникам ЖЦ на едином информационном поле практически без ограничений, которые зависят от уровней цифровой зрелости предприятий и модульности/унификации оборудования, сопровождать и совершенствовать ЖЦ оборудования, поэтому выведение их на новый уровень описанными выше способами является приоритетным направлением.

Задачи по внедрению технических решений и анализу получаемого эффекта целесообразно разделить на группы в соответствии с этапами ЖЦ турбинного оборудования, что представлено на рисунке 7.6.

Уникальность инженерных технических решений или «ноу-хау» – практически все решения, нововведения относятся или к конкретной группе, или «лежат на стыке» смежных групп (конструкторско-технологическая, технологическо-производственная и т.д.), обозначенных на рисунке 7.6. Этот факт показывает именно такую «правильность, четкость» и законность разделения и последовательности групп ЖЦ паротурбинного оборудования. Анализ же показывает, что именно решения, находящиеся на стыке

групп/этапов ЖЦИ, дают значительный эффект от внедрения, и эффект от них распространяется и на максимальное количество этапов ЖЦИ. При этом чем к более раннему этапу ЖЦИ относится внедренное решение, тем больший эффект в течение всего ЖЦ достигается, что можно сравнить с цепной реакцией или «принципом домино». Таким образом, именно внедрение «ноу-хау» конструкторско-технологической группы закладывает максимальные эффекты: от надежности до экономики, что объяснимо, так как именно конструктор или конструктор вместе с технологом прорабатывают потенциальное влияние решения на весь ЖЦ, а в наукоемком турбинном оборудовании, разработка которого зависит от глубоко проработанных научно-технических решений, такое «явление» максимально выражено.



Рисунок 7.6 – Диаграмма технико-экономического эффекта от внедрения модульной концепции создания турбинного оборудования: деление на группы

Контрольные вопросы к главе 7

1. Дайте описание стадий/этапов типового ЖЦ промышленного оборудования в соответствии с ИСО 9000.
2. Перечислим основные факторы, влияющие управление ЖЦ турбинного оборудования.

ГЛАВА 8. МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

8.1. Основная нормативно-техническая документация, применяемая при разработке систем мониторинга и диагностики.

В настоящее время в отечественной промышленности реализуется значительное количество работ по диагностике оборудования, выполнение которых должно осуществляться с учетом действующей нормативно-технической документации РФ. Ниже представлены основные отраслевые стандарты, применимые при разработке систем мониторинга и диагностики паровых турбин, условно, объединенные в следующие группы.

Стандарты, устанавливающие основные термины и определения, а также общие положения в области технического диагностирования, контроля состояния и надежности:

- ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения»;
- ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения»;
- ГОСТ Р ИСО 13372-2013 «Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения».

Указанные стандарты содержат обширный перечень терминов и определений, например, таких как, отказ, дефект, повреждение, неисправность, диагностическая модель, диагностический параметр, диагностический признак, алгоритм диагностирования, мониторинг, прогнозирование.

Стандарты, устанавливающие основные организационно-технические принципы построения и реализации комплексных систем мониторинга, а также общие рекомендации по организации мониторинга состояния оборудования на основе анализа его критичности и надежности:

- ГОСТ Р 53563-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации»;

- ГОСТ Р 53564-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к

системам мониторинга»;

- ГОСТ Р ИСО 17359-2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство»;

- ГОСТ 30848-2003 «Диагностирование машин по рабочим характеристикам. Общие положения».

В группе стандартов приведена структурная схема и классификация систем мониторинга, представлены рекомендации по выбору объектов мониторинга (категории оборудования, подлежащие мониторингу; категории опасности оборудования), определены условия и процедуры получения и регистрации данных измерений рабочих (диагностических) параметров, относящихся к эксплуатационным качествам (характеристикам), техническому состоянию и безопасности машин.

Стандарты, устанавливающие руководство по применению методов интерпретации данных, диагностике и прогнозированию:

- ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Общее руководство».

- ГОСТ Р ИСО 13379-2-2016 «Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Подход на основе данных».

- ГОСТ Р ИСО 1338101-1-2016 «Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Общее руководство».

В указанных стандартах представлены основные требования к диагностированию в системе мониторинга оборудования, а также общие рекомендации по применению методов мониторинга на основе данных. Перечислены основные элементы системы диагностирования, процедуры контроля и диагностирования на основе данных.

Стандарты, устанавливающие руководство по обработке, передаче и предоставлению данных:

- ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011 «Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и предоставление данных. Общее руководство»;

- ГОСТ Р ИСО 13374-2-2011 «Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и предоставление данных. Обработка данных»;

- ГОСТ Р ИСО 13374-3-2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и предоставление данных. Передача данных».

Группа перечисленных стандартов устанавливает рекомендации в отношении программного обеспечения, используемого в связи с обработкой, передачей и предоставлением данных в целях контроля состояния и диагностики машин (форматы передачи данных, методы обмена информацией, форматы предоставления и отображения данных и др.). Так же изложены требования к передаче данных и требования к информационной архитектуре систем контроля состояния и диагностики.

Стандарты, устанавливающие руководство в области вибрационного контроля состояния турбомашин:

- ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Общие методы»;

- ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Обработка, анализ и предоставление результатов измерений»;

- ГОСТ Р ИСО 13373-3-2016 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Руководство по диагностированию по параметрам вибрации».

Данная группа стандартов устанавливает методы обработки и предоставления результатов измерений вибрации, анализа вибрационных характеристик, а также общие процедуры, применяемые при организации диагностирования машин по параметрам вибрации.

8.2. Цели и основные принципы проектирования систем мониторинга и диагностики.

ГОСТ Р 53564 определяет **систему мониторинга**, как совокупность процедур, процессов и ресурсов, реализованных с использованием **диагностической сети**, позволяющей по результатам измерений заданных параметров в заданных точках и наблюдений за работой оборудования получить информацию о текущем техническом состоянии оборудования, опасностях и рисках, связанных с его применением, требуемых действиях обслуживающего персонала и другие сведения, необходимые для реализации

установленных предупреждающих мер. Под диагностической сетью в ГОСТ Р 53564 понимается комплекс программно-аппаратных средств системы мониторинга состояния оборудования, обеспечивающий передачу, хранение, отображение, регистрацию на удаленных станциях пользователей информации о состоянии оборудования в реальном масштабе времени с выдачей необходимого предупреждения.

Целью оснащения оборудования опасных производств системой комплексного мониторинга, согласно ГОСТР 53563-2009, является обеспечение безопасной ресурсосберегающей эксплуатации оборудования путем своевременной выработки управляющих воздействий.

Комплексный мониторинг состояния оборудования опасных производств базируется на системе программно-технических средств, обеспечивающих непрерывное получение в реальном масштабе времени информации о техническом состоянии оборудования и принятие на основе этой информации решений о проведении необходимых корректирующих организационно-технических мероприятий.

Требуемая периодичность получения информации о техническом состоянии оборудования зависит от скорости развития в нем неисправностей и для обеспечения наблюдаемости состояния должна быть в несколько раз меньше характерного времени развития неисправности в объекте мониторинга до предельного состояния.

Записи о контролируемых (диагностических) параметрах должны содержать следующую информацию: описание машины (тип, паспортные данные), режим работы машины, место измерений, единицы измерений, описание процесса измерений, дату и время проведения измерений.

Программно-технические средства системы мониторинга включают в себя стационарные и переносные устройства, которые должны:

- иметь доступ к единой базе данных об оборудовании;
- функционировать в единой диагностической сети предприятия;
- представлять информацию о техническом состоянии оборудования опасных производств службам, отвечающим за его эксплуатацию и обслуживание, службам, отвечающим за эксплуатацию и обслуживание

системы мониторинга, а также другим заинтересованным службам предприятия.

Типичные элементы контролируемого оборудования и связанные с ними элементы управления контролем его состояния, а также обобщенная процедура, используемая при внедрении программ мониторинга оборудования согласно ГОСТ Р ИСО 17359-2015 представлены на рисунках 8.1, 8.2, соответственно.

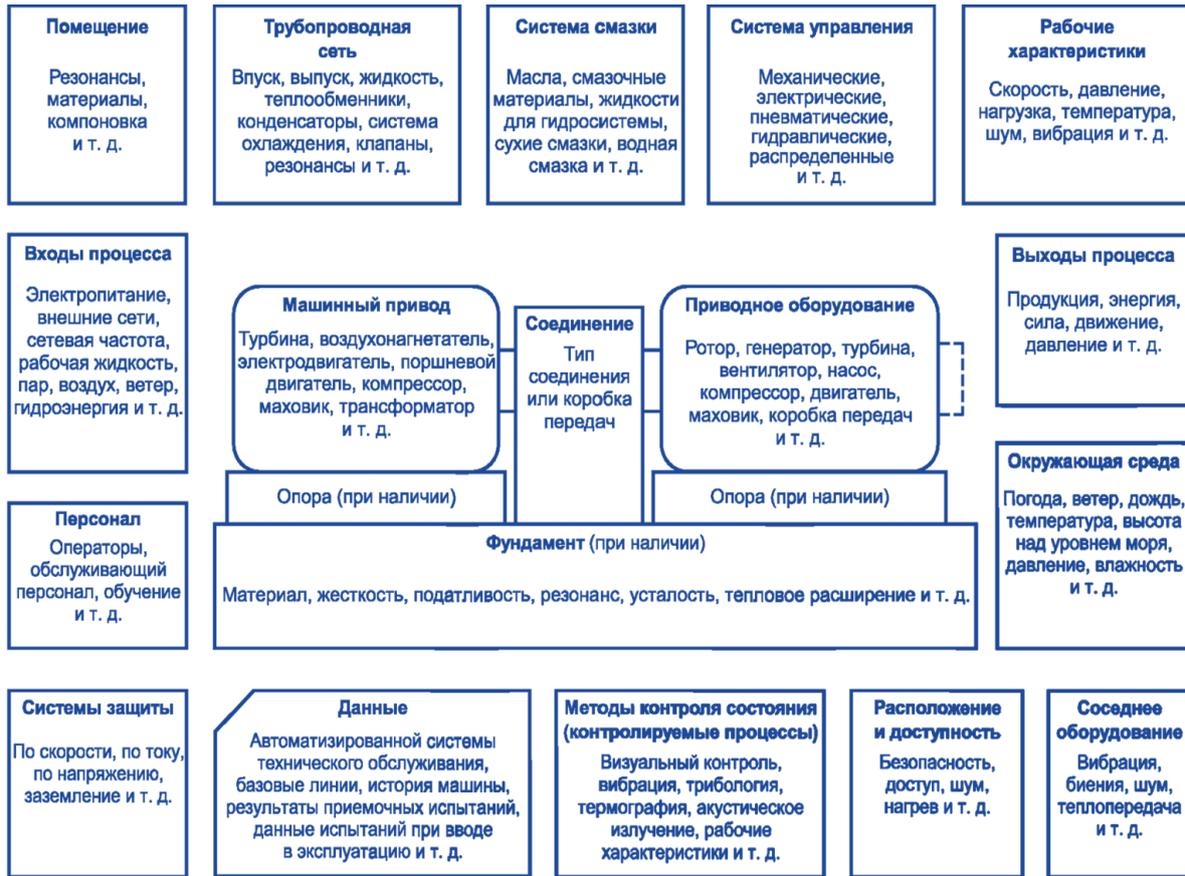


Рисунок 8.1 – Факторы, принимаемые во внимание при составлении программ контроля состояния оборудования

В ГОСТ 30848-2003 отмечается, что процедура диагностирования должна определяться специальной методикой, разрабатываемой, как правило, предприятием – разработчиком оборудования. Возможности выполнения диагностирования зависят от типа машины и рабочих условий. На неисправность указывают изменения в измеренных или вычисленных значениях одного или нескольких диагностических параметров по отношению к их базовым значениям. Для диагностирования используют специальные диагностические критерии (общие или индивидуальные для каждого вида

оборудования), в основе разработки которых лежат:

- опыт эксплуатации аналогичных машин или статистический анализ;
- результаты анализа технических характеристик машины;
- анализ степени допустимости отклонений от номинальных значений,

установленных стандартами или техническими условиями на машины данного вида.

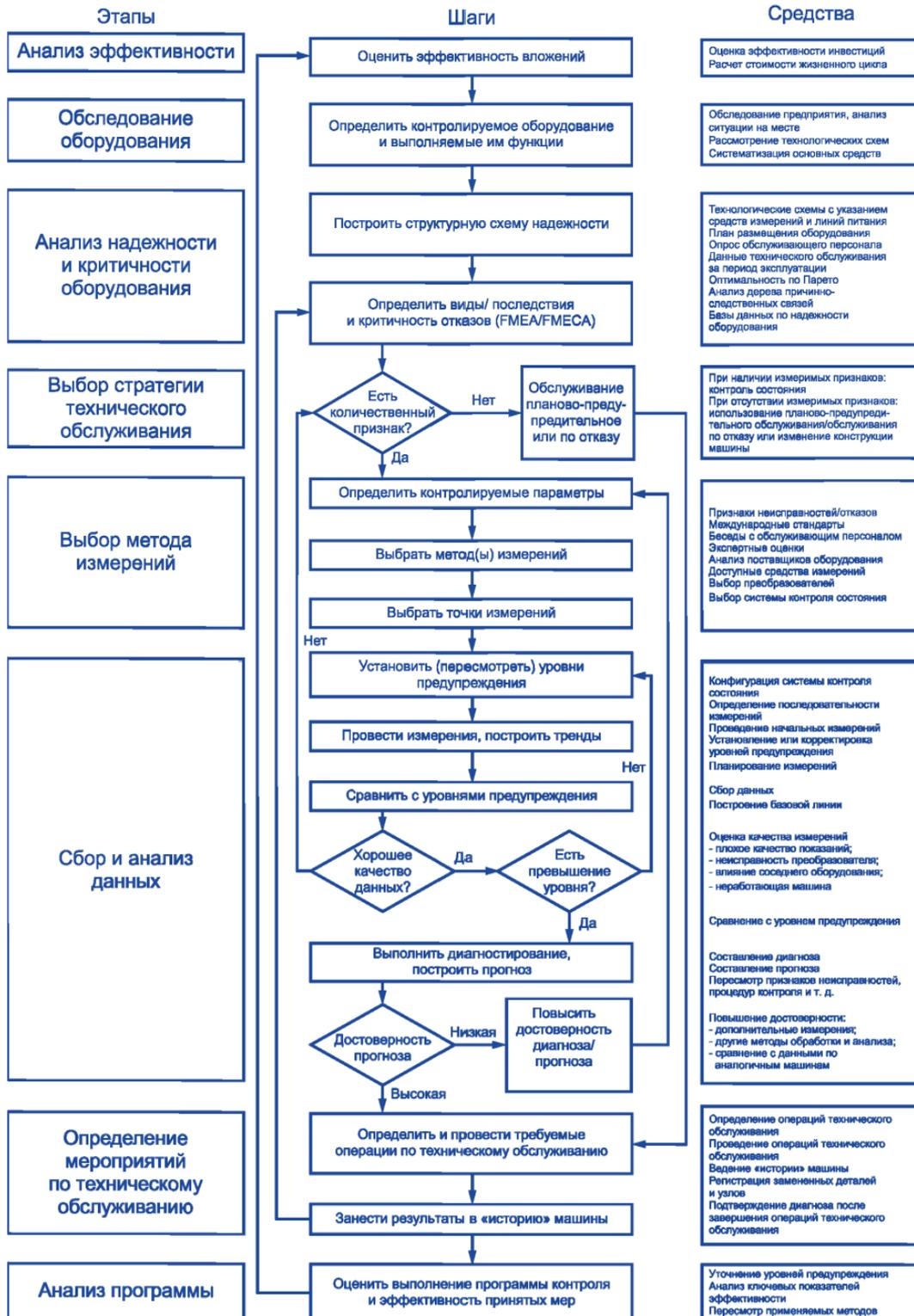


Рисунок 8.2 – Блок-схема программы мониторинга оборудования

8.3. Подходы к диагностированию оборудования.

Процесс диагностирования обычно начинается после обнаружения отклонений в поведении машины во время проведения штатных или нештатных процедур мониторинга или на основе субъективной оценки работника, обслуживающего машину. О наличии такого отклонения свидетельствует сравнение текущих значений контролируемых параметров с их эталонными значениями (обычно называемыми базовым уровнем), которые устанавливаются на основе опыта эксплуатации, по рекомендациям изготовителя, по результатам приемочных испытаний или на основе статистического анализа данных (например, усредняя их на большом интервале времени).

ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015 определяет два подхода к диагностированию оборудования:

- **на основе данных.** Включает в себя методы построения и анализа трендов, нейронных сетей, распознавания образов, статистического анализа, диаграмм Парето и прочие численные методы. Такие методы обычно автоматизированы, не требуют глубокого понимания механизма возникновения и развития неисправности, но нуждаются в периоде обучения и больших массивах данных наблюдений неисправностей разного вида;

- **на основе знаний.** Данный подход основан на представлениях, связывающих неисправности и соответствующие изменения признаков неисправностей. Данный подход включает в себя модели развития неисправности, модели нормального функционирования машины или описания типичных ситуаций в поведении машины.

Следует понимать, что четкого разграничения между указанными подходами не существует, и конкретное решение по диагностированию может включать в себя элементы разных подходов.

Выбор соответствующего подхода к диагностированию согласно ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015 (рисунок 8.3), зависит от:

- применения оборудования;
- конечного пользователя результатов применения диагностической модели;

- метода мониторинга;
- уровня сложности знаний, которые должны быть включены в модель;
- потребности в объяснении связи между неисправностями и их признаками;
- необходимости в регулярном переобучении модели;
- наличия данных наблюдений в нормальном и неисправном состояниях машины.

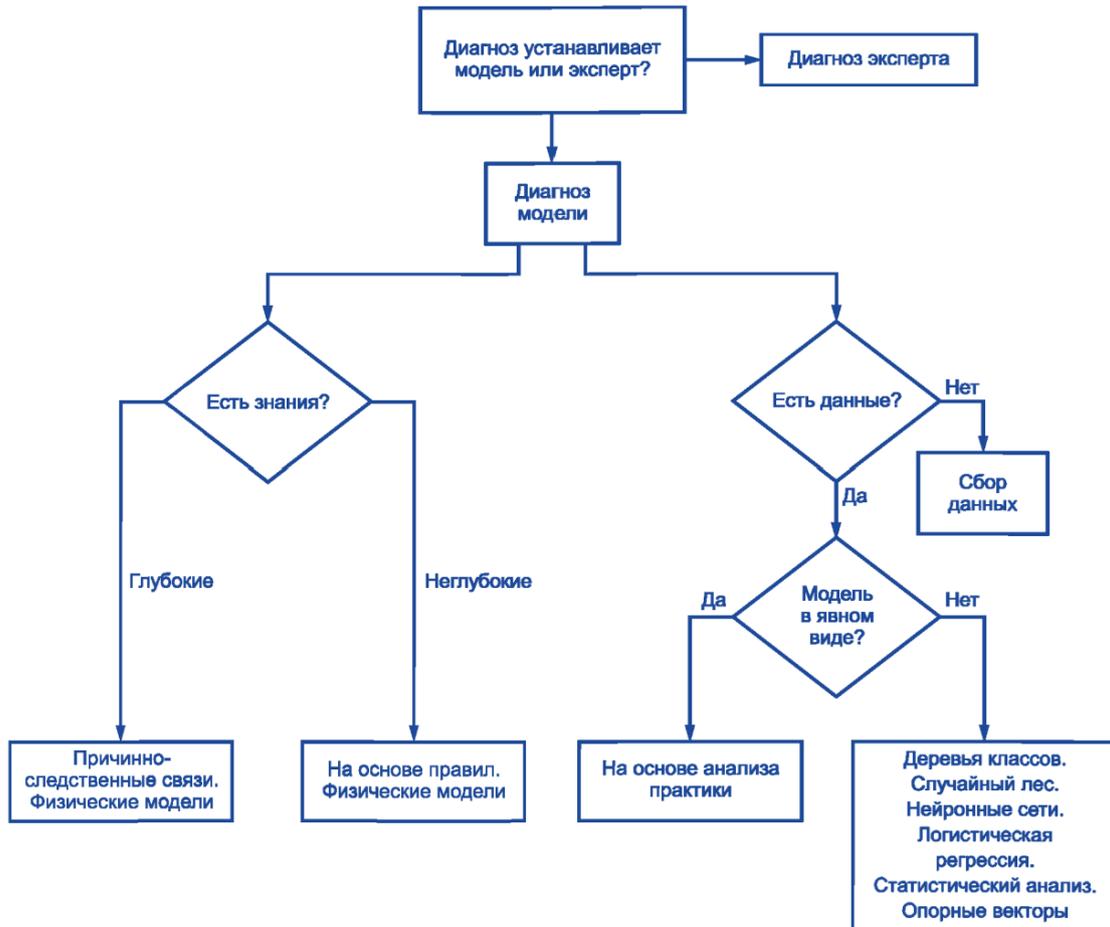


Рисунок 8.3 – Общий подход к выбору диагностической модели

Подход на основе данных.

Подход на основе данных включает в себя следующие методы:

- статистический анализ данных и анализ случаев из практики;
- нейронные сети;
- деревья классификации;
- случайный лес;
- логистическая регрессия;
- метод опорных векторов.

Данный перечень не является исчерпывающим, но включает в себя наиболее употребительные методы диагностирования. Основным принципом всех методов в рамках рассматриваемого подхода является использование модели для классификации различных условий работы машины: нормальных, с неисправностью одного вида, с неисправностью другого вида и т.д. Эти методы предполагают начальный этап обучения на основе имеющихся записей для каждого классифицируемого состояния с последующей классификацией состояния на основе поступающих данных.

По сравнению с подходом на основе знаний методы на основе данных не требуют глубокого знания процессов, происходящих в диагностируемом оборудовании.

Кроме того, эти методы не налагают ограничений на формат независимых переменных. Это означает, что состояние машины может быть описано через дихотомию (например, на нормальное и неисправное состояния), через несколько классов состояний (например, «прогрев», «нормальная работа», «максимальная выходная мощность», «работа в режиме холостого хода») или с помощью переменной состояния (например, температуры, давления, скорости), принимающей непрерывные значения.

К недостаткам методов диагностирования на основе моделей преобразования данных относятся:

- необходимость стадий обучения, калибровки и, возможно, подстройки модели перед ее использованием. При этом может оказаться необходимым пройти каждую стадию заново при модификации оборудования или при изменении его применения, а также при обнаружении нетипичных ситуаций, не рассмотренных на стадии обучения ранее;

- необходимость относительно большого числа выборок данных для нормального и каждого неисправного состояния, используемых при построении модели;

- неспособность модели указать причину появления неисправного состояния;

- возможная высокая сложность вычислений, требуемых моделью.

Некоторые методы (логистическая регрессия, нейронные сети, деревья классификации, случайный лес, метод опорных векторов) целесообразно использовать без математической формализации, а на основе примеров из практики или полученных с помощью имитационного моделирования (испытания по принципу «прошел – не прошел», испытания химических реакторов и т.д.).

Ниже представлено краткое описание указанных выше методов, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015.

Статистический анализ данных и анализ случаев из практики.

Общее описание метода. В основу метода положен принцип аналогии между наблюдаемой ситуацией и уже известными и рассмотренными случаями из практики.

Случаи из практики могут быть описаны через исходные наблюдаемые данные (одно- и многомерные величины, тренды, маски и пр.) или через результаты обработки этих данных, посредством которой сформированы признаки неисправностей.

Метод состоит в поиске случая или нескольких случаев из базы данных, похожих на текущее состояние, требующее диагностирования. Применяемые модели требуют стадии обучения с обратной связью и подробно описанными случаями из практики.

Построение модели. Вначале определяют данные, через которые описывают случаи из практики. Потом задают метрику, посредством которой описывают степень схожести различных состояний (обычно ее называют расстоянием между состояниями), и способ классификации состояний (объединения схожих состояний в классы эквивалентности). На последнем этапе обучения осуществляют калибровку (и, возможно, итеративную подстройку модели), в ходе которой все известные случаи объединяют в одну систему диагностирования.

Сильные и слабые стороны метода. По сравнению с другими методами на основе данных рассматриваемый метод требует более тщательного структурирования и описания случаев из практики.

Нейронные сети.

Общее описание метода. Нейронная сеть (часто называемая также искусственной нейронной сетью) представляет собой нелинейную статистическую модель, которая может быть использована для описания сложных отношений между объектами. Структурно нейронная сеть представляет собой объединение множества простых процессоров (нейронов), чье коллективное поведение позволяет аппроксимировать заданную функцию.

Построение модели. Построение нейронной сети предполагает стадию обучения, во время которого происходит настройка сети посредством предъявления данных для нормального и неисправных состояний машины, и подгонки весовых коэффициентов, позволяющей согласовать выход модели с состоянием, для которого получены входные данные. После завершения процесса обучения нейронная сеть ведет себя как «черный ящик», который после поступления на его вход новых данных генерирует выходной сигнал, соответствующий одному из возможных состояний машины (из тех, что рассматривались в процессе обучения).

Деревья классификации.

Общее описание метода. Деревья классификации представляют собой непараметрический метод рекуррентного разбиения данных на подмножества, относящиеся к разным состояниям машины (нормальное, первая неисправность, вторая неисправность и т.д.), в ходе которого проверяются все независимые переменные (признаки) и все возможные ветвления в каждом узле и осуществляется отбор одной наилучшей переменной и значений, при которых происходит ветвление. В разбиении исходных данных могут быть использованы не все переменные. Другие же переменные могут быть использованы по несколько раз в разных узлах ветвления. Деревья, у которых не установлено ограничение на число ветвлений, способны осуществить абсолютно точную классификацию для любой обучающей выборки, когда каждой конечной (терминальной) вершине будет соответствовать строго один класс состояния (так называемое «переобучение»). Чтобы избежать этого, используют процедуру кросс-проверки, удаляющей нижние ветви дерева и

делающей процедуру классификации менее чувствительной к новым тестовым данным. Данный процесс называют «отсечением».

Построение модели. Построение дерева классификации требует стадии обучения, в ходе которой сначала строят дерево, обеспечивающее точную классификацию по обучающей выборке, а затем совершают отсечение ветвей до достижения оптимального размера дерева. После завершения обучения и отсечения ветвей дерево оптимального размера используют для классификации новых данных.

Случайный лес.

Общее описание метода. Случайный лес представляет собой метод непараметрической классификации, в котором используется применение процедуры бэггинга (формирования ансамблей классификаторов из их исходной совокупности путем бутстрэп-выборки, к множеству деревьев классификации. Лес состоит из деревьев классификации, каждое из которых построено по одному наилучшему признаку. Деревья строят для совокупности бутстрэп-выборок (случайных выборок из общей выборки обучающих примеров с заменой) и ограниченного числа случайным образом выбранных признаков для каждой бутстрэп-выборки. Бутстрэп-выборки слегка отличаются одна от другой, при этом некоторые из обучающих примеров могут попадать в выборки по несколько раз, а ряд примеров – ни разу.

В противоположность методу деревьев классификации все деревья должны быть построены с переобучением (то есть без применения процедуры отсечения ветвей). Несмотря на то, что метод предполагает построение сотен деревьев, процедура обучения в нем осуществляется достаточно быстро (как правило, много быстрее, чем в методе нейронной сети с заданным числом примеров и процессоров). Окончательная классификация состояния осуществляется на основе классификаций, полученным по всем построенным деревьям (по принципу большинства голосов). Метод случайного леса обычно обеспечивает лучшую классификацию, чем метод одиночного дерева классификации.

Построение модели. Из полного набора обучающих примеров строится бутстрэп-выборка (выборка заданного числа примеров с замещением). Случайным образом выбирается несколько признаков из их общего числа (обычно число выбранных признаков приблизительно равно квадратному корню из общего числа признаков). По бутстрэп-выборке и выбранным признакам строится дерево классификации, причем каждое ветвление осуществляется по оптимальному признаку. Процедура ветвления осуществляется до тех пор, пока не будет получена абсолютно точная классификация для всех примеров бутстрэп-выборки. После этого формируется новая бутстрэп-выборка и на ее основе строится новое дерево классификации. Классификацию нового, неизвестного состояния получают на основе классификаций, сделанных всеми построенными деревьями, выбирая ту из них, что встречается чаще других.

Сильные и слабые стороны метода. Существенным преимуществом алгоритма случайного леса по сравнению с методом деревьев классификации является то, что первый позволяет получить оценку важности независимых переменных (признаков), которая может быть использована при отборе признаков.

Другим преимуществом является использование всех обучающих примеров в полном объеме, то есть нет необходимости резервировать ряд обучающих примеров для выполнения процедуры кросс-проверки.

К преимуществам относится также то, что, за редким исключением, в отличие от многих алгоритмов классификации данный метод не сталкивается с проблемой переобучения. Как правило, если обучение пополнять все новыми примерами, то погрешности классификации будут незначительно колебаться относительно некоторого установившегося значения.

Наконец, в отличие от многих других алгоритмов классификации, данный метод требует настройки только по двум параметрам (числу деревьев и числу переменных, проверяемых при построении ветвления), причем чувствительность к этим параметрам невысока (при отклонении указанных параметров от оптимальных качество работы алгоритма изменяется незначительно).

Слабой стороной метода является то, что, подобно многим другим методам классификации на основе данных, по принципу своего действия он представляет собой «черный ящик», то есть для каждого частного случая классификации трудно объяснить, почему она оказалась именно такой, а не другой.

Логистическая регрессия.

Общее описание метода. Логистическая регрессия моделирует соотношение между переменными (признаками) x_j и ожидаемым значением $E(y)$ через логистическую функцию:

$$E(y) = \frac{\text{Exp}(\alpha + \beta x)}{1 + \text{Exp}(\alpha + \beta x)}$$

В результате преобразования получаем

$$\ln \frac{E(y)}{1 - E(y)} = \alpha + \beta x$$

Ожидаемая величина определяет дихотомию состояний, т.е. должна принимать одно из двух возможных значений (0 или 1), в то время как логистическая модель дает значение ожидания между 0 и 1. Таким образом, для получения решающего правила, преобразующего выход логистической модели в одно из двух бинарных состояний, необходимо установить некоторое пороговое значение. Если метод должен обеспечить распознавание нескольких неисправных состояний, то необходимо построить еще несколько логистических моделей. Обычно основная модель соответствует дихотомии «исправно — неисправно», а остальные позволяют выделить какую-либо одну неисправность из набора всех возможных неисправностей.

Построение модели. Обычно для оценки параметров логистической регрессии используют метод максимального правдоподобия. На практике для этого используют один из пакетов статистической обработки данных.

Сильные и слабые стороны метода. Коэффициенты логистической модели позволяют получить представление о том, насколько результат классификации зависит от изменений независимой переменной. Следует обращать внимание на выбор данных для обучения модели. Обычно для подтверждения качества модели требуется процедура кросс-проверки.

Метод опорных векторов машины.

Общее описание метода. Алгоритм опорных векторов осуществляет нелинейное преобразование каждой точки исходных признаков в пространство их изображений более высокой размерности с последующим разделением точек, принадлежащим разным состоянием, линейной гиперплоскостью. После обучения (определения параметров гиперплоскости) алгоритм эффективен для классификации новых исходных данных.

Построение модели. Для построения оптимальной разделяющей гиперплоскости обычно применяют метод градиентного спуска. На практике для этого используют один из стандартных пакетов обработки данных.

Сильные и слабые стороны метода. Метод опорных векторов обеспечивает единственное решение задачи классификации (в отличие от, например, нейронных сетей, для которых существует много локальных экстремумов). Кроме того, в отличие от метода нейронных сетей вычислительная сложность метода не зависит от размерности входных данных. Самым большим недостатком метода является то, что в исходном виде он применим только для разбиения данных на два класса. Если необходимо различать большее число состояний (например, выделять каждый вид неисправности по отдельности), то задачу классификации необходимо сводить к нескольким бинарным задачам.

Подход на основе знаний.

Модель «неисправность – диагностические признаки».

Общее описание метода. Данный подход основан на использовании модели связей неисправности с ее диагностическими признаками. Такой подход называют моделью ассоциативных знаний, поскольку соотношения между неисправностями и диагностическими признаками носят ассоциативный характер. Процедура получения диагноза включает в себя несколько задач, каждая из которых относится к определенному аспекту проблемы. Этапы диагностирования на основе модели «неисправность – диагностические признаки» согласно ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015 показаны на рисунке 8.4.

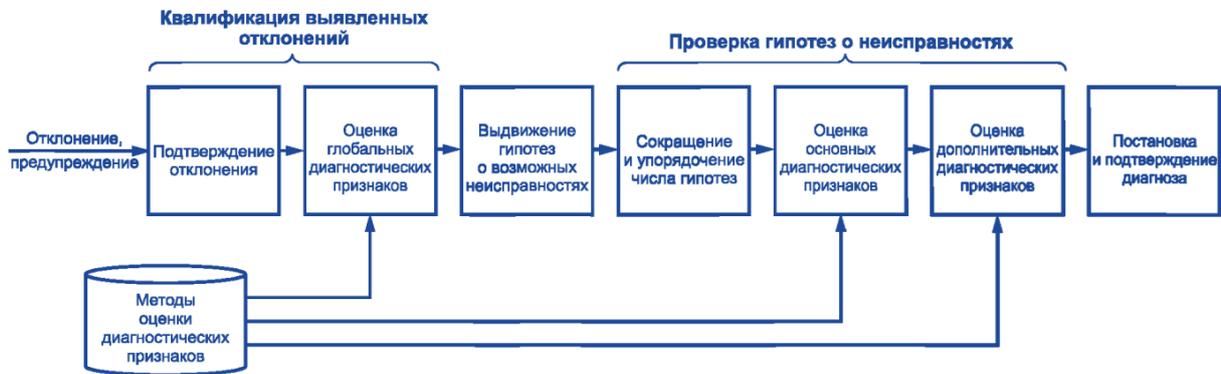


Рисунок 8.4 – Общий подход к выбору диагностической модели

Модель дерева причинно-следственных связей.

Общее описание метода. Подход на основе модели «неисправность – диагностические признаки» не может быть применен при необходимости получения более глубоких знаний о механизме возникновения и развития неисправности. В этом случае может быть использован подход на основе модели дерева причинно-следственных связей.

При использовании в целях диагностирования метод дерева причинно-следственных связей представляет собой процедуру определения основной причины неисправности на основе существующего перечня видов отказов. Составление блок-схемы модели в виде дерева причинно-следственных связей обычно используют, чтобы увидеть соотношения причин и следствий между отказами разных видов. Все данные для процедуры диагностирования уже существуют и не требуют повторной оценки. Если модель используют в целях построения прогноза, то соответствующие данные должны быть спрогнозированы.

Дерево причинно-следственных связей упорядочивает имеющиеся знания следующим образом:

- из прошлого опыта известна основная причина отказа одного или нескольких видов;
- соотношения между отказами разных видов могут быть описаны через факторы влияния или критерии инициализации;
- диагностические признаки отказа некоторого вида могут инициировать другие отказы, оказывать на них влияние или не оказывать на них влияния.

На рисунке 8.5 показан пример дерева причинно-следственных связей, применяемого в целях диагностирования согласно ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015.

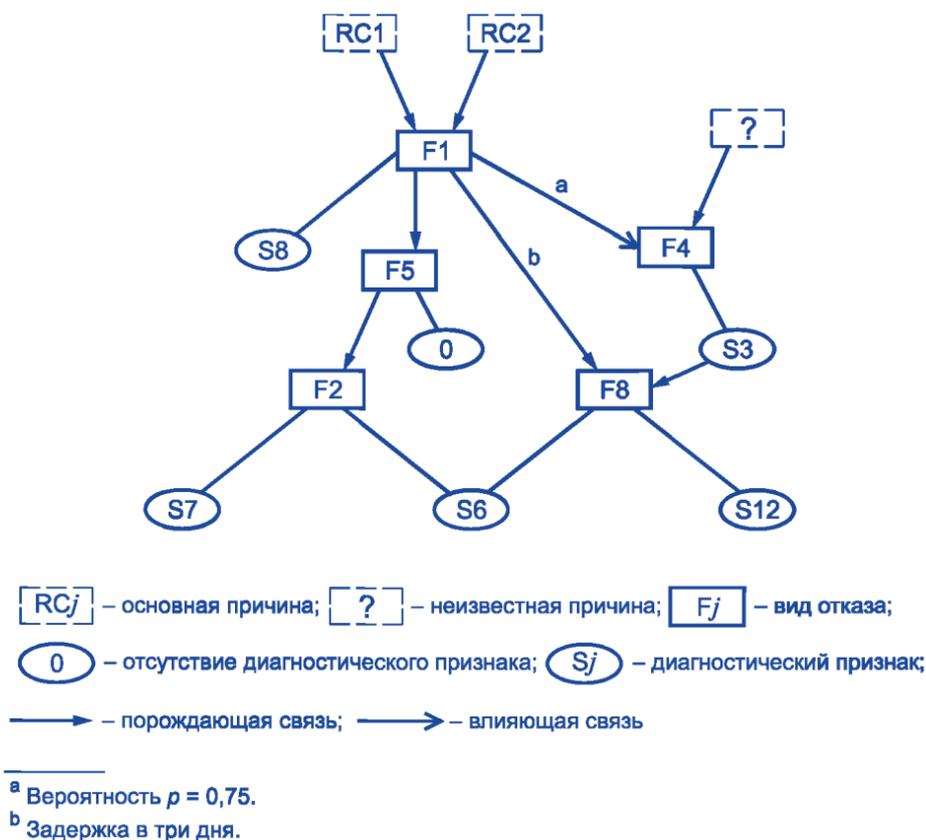


Рисунок 8.5 – Пример дерева причинно-следственных связей

Построение модели. Модели дерева причинно-следственных связей непосредственно основаны на переносе экспертных знаний о неисправностях. Поэтому первый шаг в построении модели заключается в выяснении, существуют ли необходимые экспертные знания в отношении рассматриваемой машины и к каким экспертам следует обратиться за консультациями. После чего мнения экспертов собирают воедино, формализуют и проверяют опытным путем.

Сильные и слабые стороны метода. Модели дерева причинно-следственных связей хорошо работают при следующих условиях:

- существует накопленный опыт и экспертные знания, позволяющие применить их к оборудованию, для которого ранее наблюдались существенные неисправности и проводился анализ этих неисправностей;

- может отсутствовать надежное описание неисправностей через их количественные признаки (например, для некоторых видов неисправностей турбины или насосного агрегата системы охлаждения реактора);

- желательно получение объясняющего диагноза, т.е. включающего в себя обоснование, почему идентифицированным неисправностям соответствуют результаты сделанных наблюдений;

- необходимы подробные знания о механизме и формах развития неисправностей.

При построении модели дерева причинно-следственной связи особую важность имеет определение оптимальной глубины модели (связь «признак – соответствующая неисправность» представляет собой глубину исследования 1-го уровня). Слишком малая глубина модели ограничивает ее «объясняющие» возможности. Наоборот, слишком большая глубина делает модель слишком сложной как для подтверждения ее работоспособности, так и для практического применения (для достаточно сложной модели может существовать слишком большое число возможных комбинаций связей, получаемых из обрабатываемой информации).

Физические модели.

Общее описание метода. Данный метод предполагает моделирование поведения работающего оборудования посредством соответствующих математических выражений (например, уравнения динамики ротора или уравнения состояния строительной конструкции).

Вначале составляется уравнение движения объекта и его узлов. Затем данное уравнение используется для вывода логических связей, описывающих поведение оборудования. В сочетании с данными реальных наблюдений эти связи позволяют сформулировать небольшое число гипотез, правдоподобно объясняющих причины отклонения в поведении оборудования от нормального.

Информация, получаемая с помощью модели об ожидаемом физическом поведении оборудования, может быть представлена как в количественном, так и в качественном виде.

Построение модели. Для построения модели требуется достаточно глубокая декомпозиция на подмодели, осуществляемая с привлечением специалистов-физиков и/или конструкторов оборудования. В зависимости от

сложности уравнений, описывающих работу оборудования, применяют соответствующие алгоритмы их решения.

Сильные и слабые стороны метода. Модели данного типа применяют, когда работа оборудования может быть описана через некоторое сочетание простых «передаточных функций». Это, в частности, подходит для ситуаций, когда функционирование оборудование может быть описано с помощью различных «потоков»: потоков данных или потоков физических (электрический ток, движение жидкости и т. д.). Такие модели не требуют настройки в зависимости от наблюдаемых отказов и поэтому применимы еще на стадии проектирования оборудования. Они нашли широкое применение в области электрических машин (в частности, для поиска неисправностей в цифровых схемах), а также для диагностирования автомобильных двигателей.

Недостатком метода является необходимость больших затрат на начальной стадии проектирования, а также его высокая стоимость. Однако этот недостаток компенсируется легкостью адаптации однажды построенной модели и широкими возможностями ее применения.

8.4. Прогнозирование технического состояния.

В процессе анализа контролируемых параметров и диагностических признаков может быть получена информация об ожидаемом развитии существующих или будущих неисправностей. Такой анализ называют прогнозированием. Методы прогнозирования развития неисправности установлены в ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016.

Согласно настоящему ГОСТ, термин «прогнозирование» означает анализ признаков неисправностей с целью оценки изменения состояния машины в будущие моменты времени и минимального периода ее безаварийной эксплуатации.

Общая процедура составления прогноза включает в себя следующие основные моменты:

- определение конечной точки (обычно точки останова машины);
- наблюдение изменения параметров и оценка скорости развития повреждения;

- определение текущего технического состояния;
- получение оценки времени до отказа или остаточного ресурса машины;
- установление горизонта прогнозирования события.

При этом важно отличать прогнозирование от диагностирования. Если диагностирование по своей природе ретроспективно, т. е. основывается на имеющихся данных в конкретный момент времени, то прогнозирование имеет дело с данными в будущем. Отдельными вопросами, представляющими интерес в рамках модели прогнозирования, являются: ухудшение показателей эффективности работы машин, прогнозируемое число циклов работы машины, остаточный ресурс. Рисунок 8.6, а показывает соотношение между прогнозированием и диагностированием на интервале развития отказов в машине. На рисунке 8.6, б те же понятия рассматриваются через исполняемые процедуры.

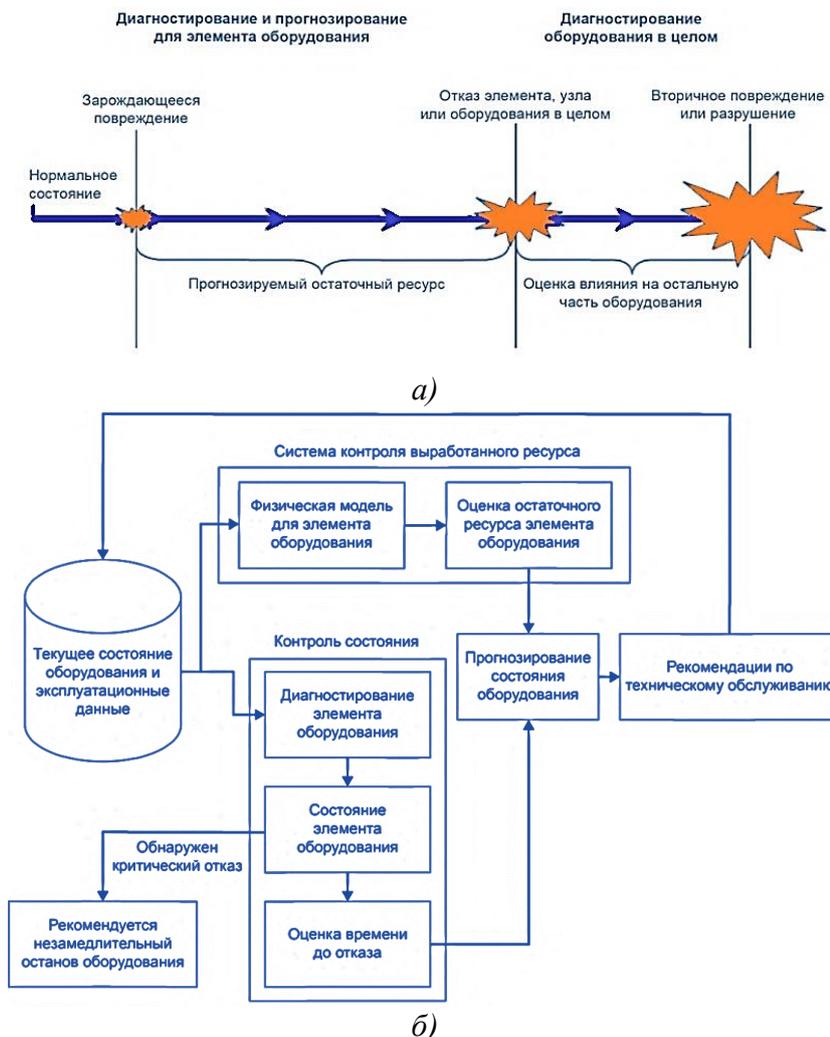


Рисунок 8.6 – Соотношения между диагностированием и прогнозированием: а) развитие повреждения со временем; б) процессы диагностирования и прогнозирования

В общем случае скорость развития неисправности (повреждения) зависит от комплекса факторов (параметров), таких как температура, вязкость масла, зазор в подшипнике, нагрузка, скорость, режим работы машины. Каждый влияющий фактор может рассматриваться как одна из движущих сил развития существующей неисправности конкретного вида, но он также влияет на развитие других неисправностей и на зарождение будущих отказов. На рисунке 8.7 показан пример, когда вибрация, усилившаяся вследствие повреждения подшипника масляного насоса (причины первичного отказа), вызвала повреждение уплотнения (причины вторичного отказа), развивающееся быстрее, чем исходное повреждение подшипника. По мере разрушения уплотнения и связанной с этой утечкой масла происходило падение давления подачи масла, что повлекло за собой медленно развивающееся повреждение крыльчатки насоса (причины третичного отказа).

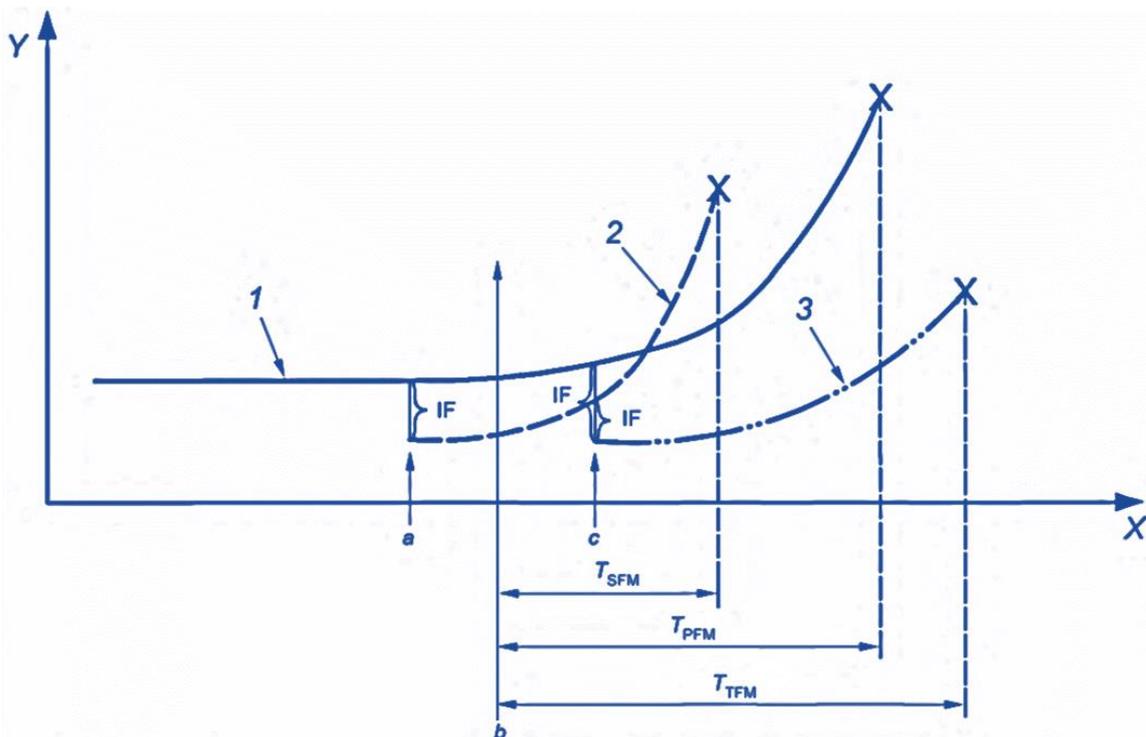


Рисунок 8.7 – Влияющие факторы: X – время; Y – контролируемый параметр; 1 – первичный отказ (сплошная линия); 2 – вторичный отказ (пунктирная линия); 3 – третичный отказ (штрихпунктирная линия); IF – влияющий фактор; T_{PFM} – оценка времени до первичного отказа; T_{SFM} – оценка времени до вторичного отказа; T_{TFM} – оценка времени до третичного отказа; a – момент зарождения вторичного отказа; b – текущее время; c – момент зарождения третичного отказа

Уровни предупреждения и уведомления обычно устанавливают ниже уровня останова, исходя из резерва времени, в течение которого появится возможность провести техническое обслуживание. При принятии решения о выборе уровня предупреждения необходимо располагать данными о:

- доверительном уровне прогноза;
- требованиях к дальнейшему использованию машины при производстве продукции;
- времени на доставку запасных узлов;
- времени для организации технического обслуживания;
- объеме работ по установлению причины неисправности;
- экстраполяционных и проектных трендах контролируемых параметров.

Основное различие между экстраполяционным и проектным трендами заключается в том, что построение проектного тренда требует модели для оценки параметра в будущем, а экстраполяционный тренд подгоняется под данные, полученные в прошлом (рисунок 8.8.).

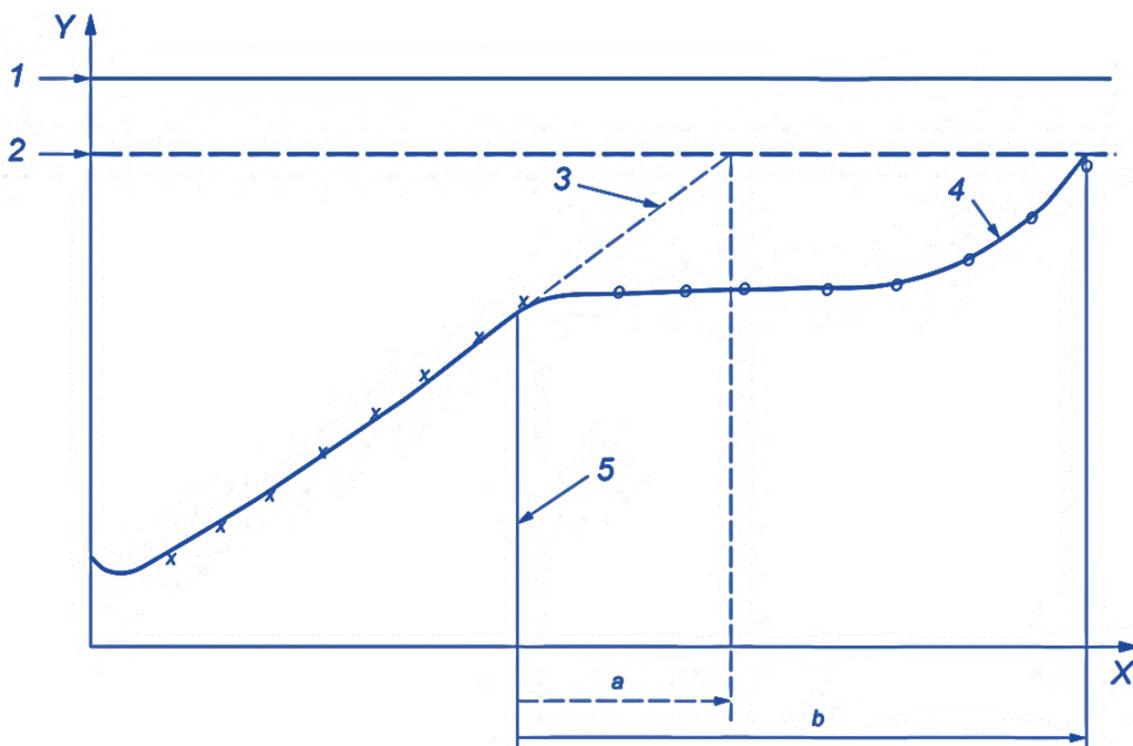


Рисунок 8.8 – Прогнозные тренды: X – время; Y – контролируемый параметр; x – известная точка; o – предсказанная точка; 1 – точка отказа; 2 – уровень предупреждения; 3 – экстраполяция; 4 – прогноз; 5 – текущее время; a – время до отказа по экстраполяционному тренду; b – время до отказа по проектному тренду

Процедура построения тренда требует знания поведения набора контролируемых параметров при развитии неисправности данного вида в данных рабочих условиях. При этом для построения проектного тренда необходимо знать уравнение движения, показывающее, как будет изменяться параметр, характеризующий повреждение данного вида, в заданных условиях.

Прогноз может быть составлен по одному или нескольким параметрам. Многофакторный анализ включает в себя одновременное использование соответствующих данных одной системой мониторинга. Такой способ анализа предпочтителен при прогнозировании технического состояния, поскольку позволяет не только наблюдать отдельные контролируемые параметры, но и сопоставлять их изменения. Особенно это важно, когда есть основания предполагать взаимосвязь между разными контролируруемыми параметрами, как, например, между температурой подшипника и вязкостью масла (рис. 8.9).

Одним из принципов многофакторного анализа является одновременное отслеживание изменений как исходных данных, так и полученных в результате их обработки контролируемых параметров. Так, использование узкополосных фильтров позволяет разбить исходный спектр вибрации на отдельные частотные составляющие, изменения амплитуд которых могут служить предметом анализа и сопоставляться с точками отказа – предельно допустимыми значениями для каждой из составляющих. Если построить график, откладывая по одной оси значения амплитуд каждой частотной составляющей, а по другой, например, какой-нибудь иной параметр вибрации, результаты анализа частиц износа в масле или одну из эксплуатационных характеристик машины, то это позволит установить наличие взаимосвязи между контролируемыми параметрами. Одна из проблем многофакторного анализа состоит в том, что каждая переменная имеет собственную единицу измерения. Ситуация еще более усложняется, если переменная в процессе наблюдения может несколько раз приобретать одно и то же значение (рис. 8.9). Дополнительная трудность в построении трендов и установке уровней предупреждения в многофакторном анализе связана с тем, что при неисправности значение переменной (например, расход или давление жидкости) может приобретать нулевое значение.

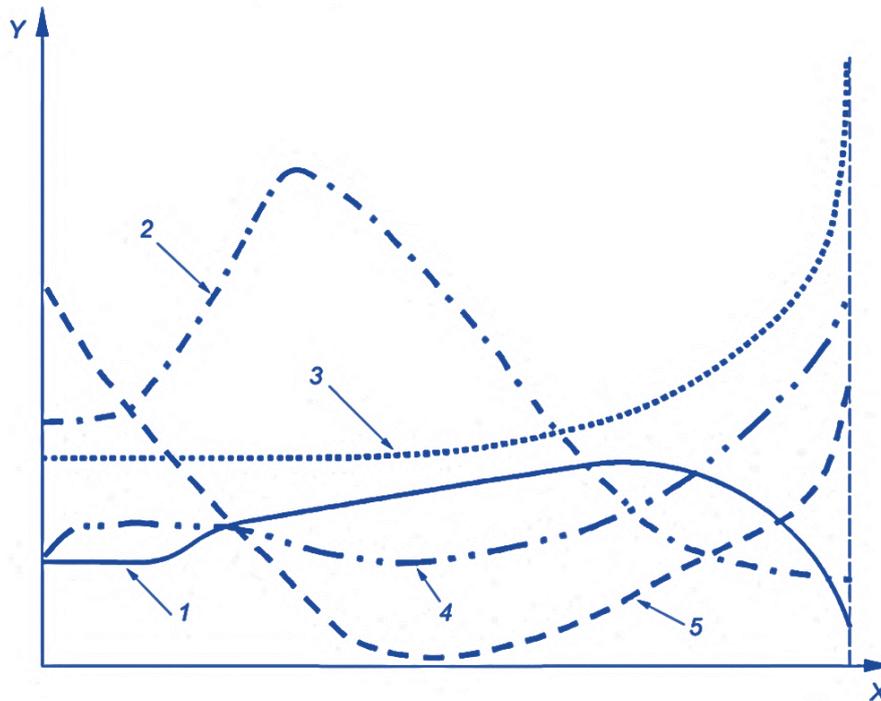


Рисунок 8.9 – Пример одновременного отображения нескольких параметров:
 X – независимый параметр; Y – зависимые контролируемые параметры;
 1 – первый параметр; 2 – второй параметр; 3 – третий параметр;
 4 – четвертый параметр; 5 – пятый параметр

При составлении прогноза важно, чтобы для каждого параметра, используемого в многофакторном анализе, было известно:

- начальное значение, соответствующее остаточному ресурсу 100 % (выработанному ресурсу 0 %) или новой машине (узлу);
- конечное значение, соответствующее остаточному ресурсу 0 % (выработанному ресурсу 100 %) или машине (узлу) после отказа;
- каким образом изменение параметра связано с наступлением отказа данного вида и сокращением времени до отказа.

Зарождение неисправности следует всегда отслеживать назад во времени в поисках основной причины ее появления. Эта основная причина может быть описана через набор условий и событий. При этом с условиями обычно связывают постепенные изменения контролируемых параметров, а с событиями – их скачкообразные изменения (рис. 8.10). Картина может быть «смазана» тем, что в некоторых случаях с определенного момента развития повреждения контролируемый параметр начинает вести себя так, как если бы это повреждение исчезло. В этом случае для построения прогноза используют другие параметры.

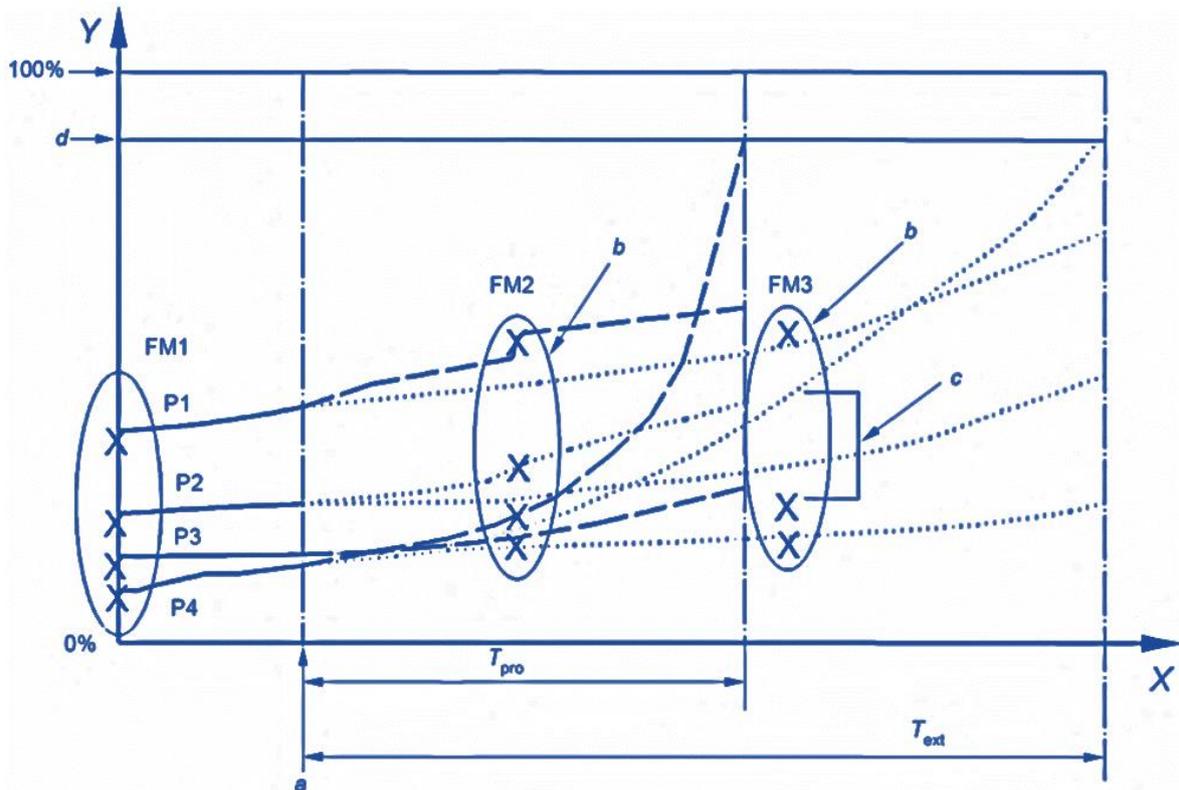


Рисунок 8.10 – Прогнозирование зарождения отказа (по проектным и экстраполяционным трендам): X – время; Y – выработанный ресурс (0 % – полный ресурс, 100 % – отказ); - - - – проектный тренд; ... – экстраполяционный тренд; P – контролируемый параметр; FM – вид отказа; T_{pro} – время до отказа по проектному тренду; T_{ext} – время до отказа по экстраполяционному тренду; a – текущее время; b – зарождение неисправности; c – превышение критерия; d – уровень останова

Наличие условий, событий и взаимосвязи между ними легко проследить с помощью многофакторного анализа. При достижении или превышении значений контролируемых параметров, установленных в качестве критерия зарождения неисправности, инициируется сигнал предупреждения о начале развития неисправности данного вида.

Таким образом, прогноз зарождения неисправности (повреждения), ведущей к отказу определенного вида, основывается на установлении критериев зарождения неисправности и использовании методов построения трендов контролируемых параметров. Точность прогноза в значительной степени будет зависеть от того, являются ли эти тренды экстраполяционными или проектными.

Подробное описание процедуры прогнозирования, а также требования к отчету о прогнозировании также изложено в ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016.

8.5. Развитие отечественных систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования.

Аналитический обзор работ по мониторингу и диагностике энергетического оборудования на примере паровых турбин.

Попытки автоматизации подходов и методов технической диагностики энергетического оборудования в отечественной практике начались с развитием средств промышленной автоматизации в конце 80-х начале 90-х гг. XX в. Работами в области мониторинга и диагностики занимались различные профильные организации: заводы-изготовители, научно-исследовательские институты, высшие учебные заведения, ремонтно-сервисные и эксплуатационные предприятия. С учетом этого на многих электростанциях различными организациями в течении последних трех десятилетий опробовались различные системы и методик диагностики отдельных элементов и узлов оборудования. Ниже на примере паровой турбины представлены основные работы по данному направлению, разделенные на следующие группы:

- проточная часть турбины;
- вибрационное состояние;
- системы регулирования и парораспределения;
- система тепловых расширений турбины;
- теплообменное оборудование.

Проточная часть турбины.

Теоретические основы автоматизированной диагностики состояния проточных частей и концевых уплотнений паровых турбин изложены в работах ОАО «НПО «ЦКТИ» [51-53].

Предложенные ОАО «НПО «ЦКТИ» методики позволяют выявить причины изменения экономичности, состояние лопаточного аппарата, состояние уплотнений. В качестве диагностического параметра при диагностике состояния лопаточного аппарата используется коэффициент полезного действия, определяемый по формулам как средневзвешенный, а также давление пара в контрольной ступени. Состояние периферийных

уплотнений отсеков ступеней оценивается по превышению температуры пара в регенеративных отборах над температурой в проточной части за соответствующей ступенью. Для диагностики работы концевых уплотнений трубопроводы каждого концевого уплотнения предлагается оборудовать датчиками температуры, по показаниям которых определяется возможность «пропаривания» в машинный зал или присоса воздуха. При проведении периодических испытаний определяется износ уплотнений определяется по соотношению температур окружающего воздуха, паровоздушной смеси, уплотняющего пара, пара в цилиндре. В качестве диагностического параметра угрозы возникновения задеваний в проточной части предлагается использовать величину радиальных зазоров, контроль за которой осуществляется на основе математической модели, учитывающей влияние различных параметров работы турбины (разности температур верхней и нижней половин цилиндра, разности температур перед цилиндром и метал ла корпуса цилиндра, скорость вращения ротора, мощность турбины и др.).

Вибрационное состояние.

Одновременно с диагностикой проточных частей паровых турбин реализовывались попытки автоматизировать диагностику вибрационного состояния. В конце 80-х гг. XX в. АО «ВТИ» представлены результаты автоматизации вибрационного контроля и диагностики турбоагрегата Т-250/300-240 [54], а затем обобщены и дополнены [55]. В свою очередь, ОАО «НПО «ЦКТИ» разработаны алгоритмы функционирования и распознавания дефектов для автоматической системы вибрационной диагностики [56-57]. Здесь же отмечено, что вибрационное состояние турбины при возникновении в ней дефектов характеризуется рядом особенностей, которые должны учитываться при разработке систем вибродиагностики:

- неоднозначность «вибрационного проявления» различных дефектов, когда различные дефекты имеют сходное проявление, а один и тот же дефект может проявляться по-разному;

- взаимозависимость многих причин вибрации, когда один дефект может приводить к возникновению другого;

- сложность локализации дефекта;
- длительный процесс развития ряда дефектов и как следствие изменения вибрационного состояния.

Сотрудниками Уральского федерального университета в разные годы также рассматривались вопросы диагностики вибрационного состояния паровых турбин [58-60]. В частности, в [60] рассматриваются проблемы организации мониторинга крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов на электростанциях и анализируются требования к построению систем их контроля. Приводится структурная схема системы мониторинга, установленной на реальном турбоагрегате Т-175/210-130 и первые результаты визуализации собственных крутильных колебаний валопровода.

Также в части мониторинга крутильных и изгибно-крутильных колебаний валопроводов паровых турбин следует отметить работы МГТУ им. Н.Э. Баумана [61], АО «ВТИ» [62-64] и НИУ МЭИ [65, 66].

Системы регулирования и парораспределения.

Основные положения по диагностике систем регулирования паровых турбин сформулированы в работах [67-74].

Один из первых шагов по внедрению элементов диагностики в системы регулирования и парораспределения реализован в конце 70-х гг. XX века в [67], где предложено контролировать работоспособность системы в процессе эксплуатации по отклонению зависимостей между давлением под поршнем и его положением от нормативных, выявляя тем самым увеличение сил сопротивления в гидравлических элементах и угрозу заедания. В [68] разработана методика функционального контроля в процессе эксплуатационных изменений режимов (плановые изменения нагрузки, плановые и неплановые остановки турбоагрегата, отключения от сети) с соответствующей временной дискретностью. Система обобщенных критериев использует не только указанный в [67] запас перестановочного усилия гидравлических элементов, но и динамический заброс частоты вращения ротора агрегата.

В это же время НИУ МЭИ показывает, что существующие системы регулирования слабо приспособлены к автоматическому контролю работоспособности [69]. Чтобы такой контроль стал всеобъемлющим и решающим средством повышения надежности, необходимо при разработке средств регулирования и защиты, включая органы парораспределения, предусматривать следующий комплекс научных, технических и организационных мероприятий:

- организация сбора и обработки данных об уровне надежности системы-прототипа и определение на базе научно обоснованной методики значений количественных показателей требуемой надежности разрабатываемой системы;

- анализ характера отказов элементов и системы в целом и их последствий, составление перечня объектов диагностики;

- определение алгоритма управления агрегатом (аварийная остановка, ввод резерва, сигнализация и т.д.) при каждом возможном виде отказа;

- применение научно обоснованных критериев для выбора принципов диагностирования узлов всей системы, способов сопоставления контролируемых параметров и других характеристик метода диагностики для данной системы;

- распределение реализации задач диагностики системы между жестко программируемыми и свободно программируемыми средствами и разработка конкретных алгоритмов диагностики узлов и системы в целом;

- определение преимущественно на основе математического моделирования значений параметров и периодичности контроля для каждого из разработанных алгоритмов диагностики;

- разработка аппаратного и программного обеспечения автоматической диагностики систем регулирования и защиты, в том числе средств измерения величин, необходимых для контроля работоспособности;

- определение технико-экономической эффективности диагностики на основе расчета ожидаемого повышения надежности с учетом конечной надежности средств диагностики и принятого уровня резервирования.

Указанный подход был использован НИУ МЭИ при разработке средств автоматической диагностики системы электрического привода регулирующих клапанов турбоагрегата [69]. Контроль обрыва штока клапана может быть реализован согласно [70].

С внедрением электрогидравлических систем регулирования паровых турбин на базе современной микропроцессорной техники, получивших широкое распространение с 2000-х гг. XXI в., работы в автоматизации средств диагностики состояния систем регулирования и парораспределения паровых турбин приобрели актуальность и получили свое продолжение в [71-74].

Например, специалистами ПРП «Ростовэнерго» разработана переносная система диагностики, позволяющая автоматизировать сбор и анализ характеристик системы регулирования паровой турбины в ходе ее эксплуатационных испытаний после монтажа и ремонта [71].

Сотрудниками Уральского федерального университета в работе [72] показано, что в случае применения микропроцессорных систем регулирования и защиты могут быть автоматически получены (рассчитаны) в процессе эксплуатации ее основные параметры, представленные в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Формулярные зависимости и характеристики, получаемые в результате работы системы диагностики

№	Наименование зависимости	Характеристика системы регулирования
1	Статическая характеристика регулирования частоты вращения (ЧВ)	Степень неравномерности регулирования ЧВ
		Степень нечувствительности регулирования ЧВ
		Области и значения местной неравномерности регулирования ЧВ
2	Характеристики кулачкового парораспределительного устройства (КРУ) и соплового аппарата	Техническое состояние КРУ
		Качество настройки положения РК
		Состояние соплового аппарата
		Состояние проточной части (занос солями)
3	Запасы усилия сервомоторов системы регулирования	Выявление областей неустойчивой работы СР
		Выявление заклиниваний регулирующих органов
		Оптимизация режимов работы турбины
4	Характеристики автозатворов стопорных (защитных) клапанов	Техническое состояние автозатворов стопорных (защитных) клапанов
		Нечувствительность автозатворов стопорных (защитных) клапанов

Опираясь на это в работе [74] представлены базовые текстовые описания алгоритмов автоматизированной диагностики элементов систем регулирования и парораспределения паровых турбин. Алгоритмы диагностики предполагают постоянное в процессе эксплуатации формирование зависимостей параметров (корреляционных признаков) электрогидравлической системы регулирования: расход пара на турбину – положение сервомотора ЧВД; давление за клапанами ЧВД (ЧСД) – положение сервомотора ЧВД (ЧСД), мощность турбины – положение сервомотора ЧВД, и др., а также таких базовых характеристик как степень нечувствительности и степень неравномерности регулирования частоты вращения турбины. Полученные статические нормативные зависимости дополняются динамическими характеристиками исполнительных механизмов (сервомоторов, автозатворов): их быстродействие, развиваемые усилия.

Система тепловых расширений.

Вопросам диагностики системы тепловых расширений посвящены работы АО «ВТИ» и ООО «УК Теплоэнергосервис» совместно с Уральским федеральным университетом [75-79].

В работе [75] отмечается недостаточность оснащения паровых турбин приборами контроля для полноценной диагностики системы тепловых расширений. В связи с этим в [76] представлены рекомендации по объему оснащения паровых турбин средствами измерения, достаточными для достоверной работы модуля диагностики системы тепловых расширений, а также разработана концепция модуля автоматизированной оперативной диагностики, позволяющего выявлять три группы дефектов:

- повышенные силы трения на поверхности скольжения корпусов подшипников;
- заклинивание корпусов подшипников на продольных шпонках;
- заклинивание одной из пары опорных лап на поперечной шпонке/

С учетом этого сформирован и обоснован перечень параметров, необходимых для достоверной диагностики нарушений в работе системы тепловых расширений, определены необходимая дискретность проведения измерений и точность измерительных приборов.

В работах [79-80] представлены результаты разработки АО «ВТИ» системы диагностики абсолютных температурных расширений корпусов цилиндров паровых турбин (СДАРТ). Для измерения угла наклона и перемещения корпусов подшипников в составе СДАРТ применяются оригинальные датчики, в которых в качестве первичного преобразователя используется линейный дифференциальный трансформатор. В общем случае СДАРТ предназначена для оперативной или предремонтной оценки состояния оборудования при решении задач, касающихся обеспечения его вибрационной надежности, выявления причин отклонения текущих значений механических показателей от допускаемых Руководящими документами, а также для определения объема и содержания восстановительных работ в условиях ремонта.

Теплообменное оборудование.

Вопросам диагностики теплообменных подогревателей посвящено большое количество работ сотрудников Уральского федерального университета [81-84].

В общем случае, любая система диагностики теплообменного оборудования предполагает определение основных фактических и нормативных характеристик работы аппаратов – тепловой нагрузки, недогрева до температуры насыщения греющего пара, гидравлического сопротивления. При этом согласно [85] диагностика конденсационной установки должна дополнительно осуществлять следующие оценки:

- загрязненность конденсатора (как следствие, определяет отклонение давления от норматива, термическое сопротивление слоя отложений, потерю мощности турбины и пережог топлива на станции);

- эффективность работы конденсатных и циркуляционных насосов;

- эффективность системы воздухоотсоса (оценивается разрежение, создаваемое эжекторами, состояние трубопроводов отвода и подвода рабочей среды, плотность вакуумной системы);

- состояние элементов циркуляционного тракта (напорного и сливного водоводов, водяных камер).

На основе единого подхода разработаны системы диагностики для конденсационной установки, подогревателей системы регенерации турбин, сетевых подогревателей и реализованы на ряде ТЭС. Отличительной особенностью этих систем является использование экспертных систем вероятностного типа, а также результатов решения ряда прогнозных задач.

Опыт разработки комплексных систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования.

Как было показано выше, на сегодняшний день имеется достаточно большое количество разрозненных предложений по разработке систем мониторинга и диагностики для различного оборудования, основанных на разных принципах построения и назначения.

С одной стороны, увеличение числа систем диагностики повышает полноту и достоверность диагностирования сложного энергетического оборудования, с другой стороны, отсутствие общей идеологии затрудняет объединение существующих наработок в единую комплексную систему мониторинга и диагностики. Первые попытки сформировать единый подход и требования к комплексным системам диагностики теплоэнергетического оборудования изложены АО «ВТИ» в работах [86-88].

В [86] отмечается, что стремление к всемерному увеличению объема, полноты и глубины комплексного диагностирования может привести к снижению его реальной эффективности, а в ряде случаев сделать его практически неработоспособным. В связи с этим предлагается перечень задач, входящих в список обязательных функций диагностирования применительно к паротурбинной установке, котлу и трубопроводам. Остальные задачи предлагается оставлять на усмотрение заказчика. С учетом этого в работе [86] предлагается комплекс задач диагностики турбинного оборудования, включающий:

- диагностику вибрационного состояния турбоагрегата;
- диагностику проточной части (по пропускной способности и КПД отсеков);
- диагностику концевых уплотнений;

- диагностику системы регулирования и органов парораспределения (по их статическим характеристикам);
- контроль термонапряженного состояния и оценку повреждаемости металла элементов конструкции с математическим моделированием наиболее термонапряженных элементов;
- диагностику тепловых расширений;
- диагностику тепловой изоляции высокотемпературных корпусных деталей и паропроводов;
- диагностику трубных систем конденсатора.

Отдельные алгоритмы этих задач были реализованы и апробированы на Зуевской ГРЭС-2 и Запорожской ГРЭС [89, 90].

В работах ОАО «НПО «ЦКТИ» и Уральского федерального университета [91-95] представлены примеры реализации комплексных систем мониторинга и диагностики, а также результаты апробации отдельных модулей в составе этих систем. В [91] выполнено обобщение проблем, возникавших при внедрении и эксплуатации систем диагностики отдельных узлов турбоустановки и показана возможность интеграции этих систем в комплексную систему эксплуатационной диагностики ПТУ.

Необходимо отметить, что помимо технических трудностей объединения разрозненных методик и отдельных диагностических систем в единую комплексную систему существуют и организационные трудности, связанные с правами на интеллектуальную собственность. Не все разработчики систем диагностики готовы отдать созданные ими методики диагностирования в виде понятных алгоритмов и текстовых описаний третьим лицам, например, проектировщикам и разработчикам АСУ ТП. Решением данной проблемы могла бы стать государственная стандартизация методик диагностики того или иного оборудования.

Анализ работ по системам мониторинга и диагностики за последние пять лет.

Анализ работ по вопросам диагностики энергетического оборудования за последние несколько лет показывает, что с развитием цифровых технологий

все большее распространение получают системы и методы мониторинга и диагностики, построенные на основе статистической обработки «больших» данных [96-105].

К примеру, в [96] рассматриваются два исторически сложившихся направления построения систем искусственного интеллекта – экспертные системы и нейронные сети. Рассмотрены примеры использования нейросетей и систем искусственного интеллекта в электроэнергетике для мониторинга состояния электрооборудования, для оперативного диспетчерского управления электросетями, при анализе нештатных ситуаций, интеллектуальные функции автоматизированных систем диспетчерского управления.

В работе [97] рассматриваются использование больших данных в энергетике для контроля технического состояния энергетического оборудования, а также основные принципы работы программно-аппаратного комплекса прогностики и удаленного мониторинга ПРАНА компании «РОТЕК» и необходимость создания классификатора аномалий. Описаны типовые проблемы и варианты их решения при его создании в условиях дефицита данных о работе оборудования. Кроме этого, рассмотрены различные подходы в создании классификатора аномалий работы энергетического оборудования ряда компаний. Показано, что статистические методы контроля позволяют обнаружить изменения в техническом состоянии системы на ранних стадиях, а также указать наиболее важные факторы, влияющие на них.

С другой стороны, в [98] на основе анализа опыта реализации проектов по развертыванию интеллектуальных сетей в Европе и США отмечается, что большинство реализованных проектов по развертыванию интеллектуальных сетей пока не являются коммерчески эффективными, так как их положительные внешние эффекты (экстерналии), как правило, не учитываются в доходной части по причине отсутствия универсальных методик монетизации общественных выгод. Результаты исследования могут быть использованы в практике планирования мероприятий по модернизации и

развитию существующей сетевой инфраструктуры как на федеральном уровне, так и на уровне отдельных регионов и территорий

Не смотря значительный рост работ по вопросам диагностики на основе обработки «больших» данных также следует выделить исследования в области «традиционной» диагностики, основанной на экспертных правилах, моделях физических процессов и дополнительных средствах измерения [61, 62, 65, 66, 106-113].

В работах НИУ МЭИ [65-66] представлен обзор отечественные системы мониторинга и диагностики технического состояния турбоагрегатов. Отмечены, с одной стороны, прогресс в создании технологической части систем сбора и обработки информации, с другой, – отсутствие качественных критериев для своевременной постановки диагноза развития и автоматического поиска дефектов.

Также рассматривается роль искусственного интеллекта (нейронных сетей) для их применения при анализе технического состояния. Отмечено, что нынешние системы, развиваемые в России на базе нейронных сетей, пока далеки от совершенства. В [106] показаны противоречия и недостатки, присущие как отечественным, так и зарубежным нормативным документам в области вибрации, вибромониторинга и диагностики технического состояния турбоагрегатов. Приведено обоснование необходимости совершенствования нормативной базы в части применения датчиков вала для оценки технического состояния турбоагрегатов в эксплуатации и разработки систем контроля всплытия вала и расцентровок опор.

Исследованиям в области вибрационной диагностики также посвящен ряд работ сотрудников АО «ВТИ», МГТУ им. Н.Э. Баумана и АО «Силовые машины» [61, 62, 106-113].

По результатам применения современных методов диагностики и цифровых технологий в [112-113] предлагается пересмотреть ряд подходов к организации технологических процессов, в том числе при реализации ремонтных программ энергетических предприятий.

На примере системы сетевого планирования и управления рассмотрено применение сетевого графика капитального ремонта генерирующего

оборудования с учетом «журналирования» исполнительной документации в цифровой системе, представляющей собой программно-технический комплекс из централизованной системы хранения данных и децентрализованного реестра.

Применение системы сетевого планирования и управления в виде сетевого графика и предлагаемого алгоритма проведения технического надзора и фиксации этапов при выполнении ремонтных работ позволит объективно определять количество трудовых ресурсов, необходимых для выполнения запланированного объема работ в заданный срок, выявлять критические работы, задерживающие окончание ремонта, активно управлять ремонтом путем анализа хода ремонтных работ и принятия обоснованных организационно-технических решений, обеспечивающих выполнение работ в плановые сроки с наименьшими затратами.

Примеры современных отечественных систем мониторинга и диагностики, внедренных на объектах электроэнергетики РФ.

Системы мониторинга и диагностики АО «НПО ЦКТИ».

Среди комплексных систем, получивших наибольшее распространение на электроэнергетических объектах, можно выделить разработки ОАО «НПО ЦКТИ» (более 20 внедренных систем) и систему прогностики и удаленного мониторинга «Прана» разработки АО «Ротек» (ныне «РДС»).

Например, в ОАО «НПО ЦКТИ» более 30 лет разрабатываются алгоритмы, аппаратные и программные средства систем непрерывной эксплуатационной диагностики состояния турбоагрегатов.

Результат этих работ – создание автоматизированных систем вибродиагностики турбоагрегатов (АСВД «ВИДАС»), диагностики состояния лопаток (АСДЛ «СКАЛА»), а также программа оперативной оценки экономичности и надежности работы паровой турбины «Ментор» [114-116].

АСВД «ВИДАС» предназначена:

- для измерения уровней абсолютной вибрации турбины, спектров, частот и фаз колебаний на опорах подшипников;
- измерения уровней относительной вибрации турбины, спектров, частот

и фаз колебаний шеек ротора; выдачи тревожного сигнала для предупреждения персонала или для отключения турбины (в зависимости от уровня вибрации);

- отображения и хранения вибрационных параметров;
- анализа вибрационного поведения турбины с диагностикой значимых неполадок в режиме реального времени.

На рисунках 8.11, 8.12 представлены основные экраны АСВД «ВИДАС».

Выявление неисправностей в АСВД «ВИДАС» осуществляется экспертным методом на основе разработанных сотрудниками ОАО «НПО ЦКТИ» диагностическими критериями с весовыми коэффициентами.

Сумма баллов, полученная по каждому повреждению, делится на максимально возможную сумму баллов для соответствующего повреждения и умножается на 100. Таким образом, формируется оценка уровня развития и наличия дефекта (максимально возможное значение оценки – 100).

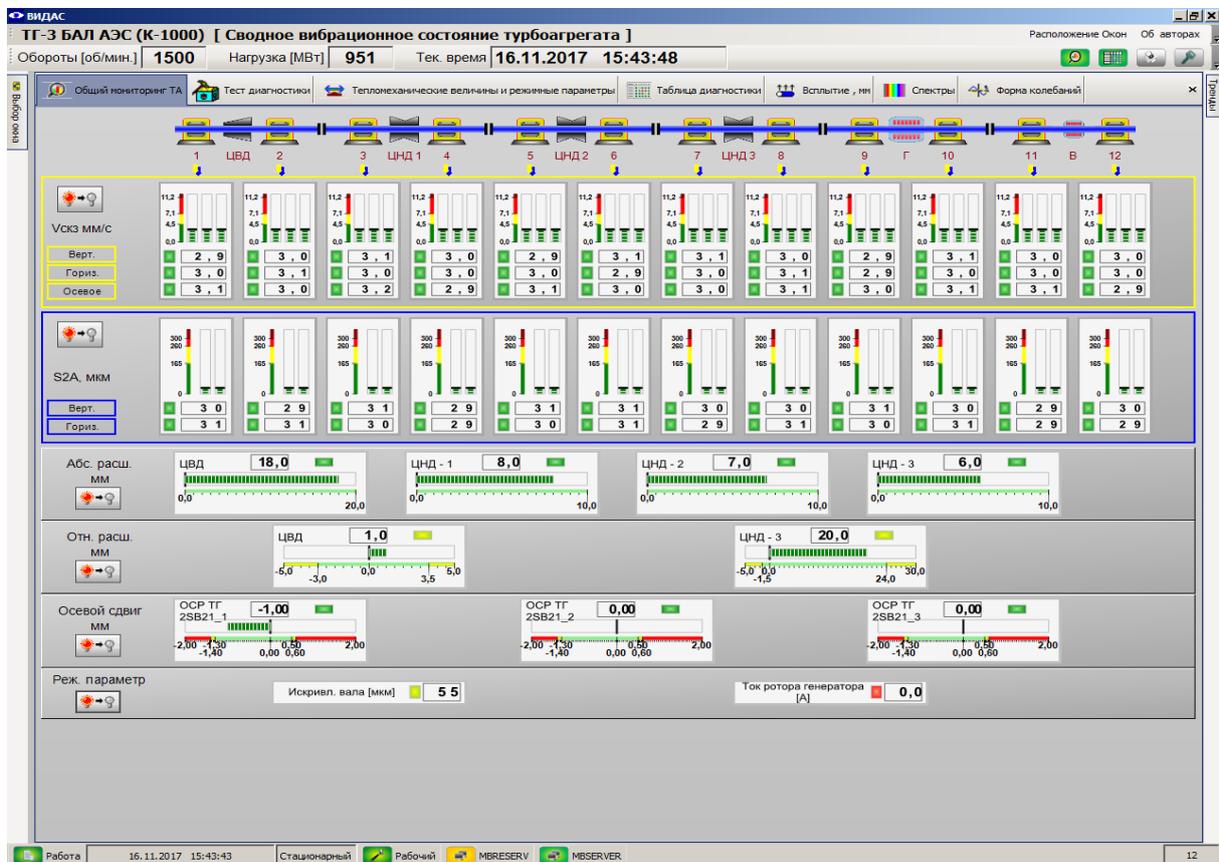


Рисунок 8.11 – Экран мониторинга вибрационного состояния турбоагрегата

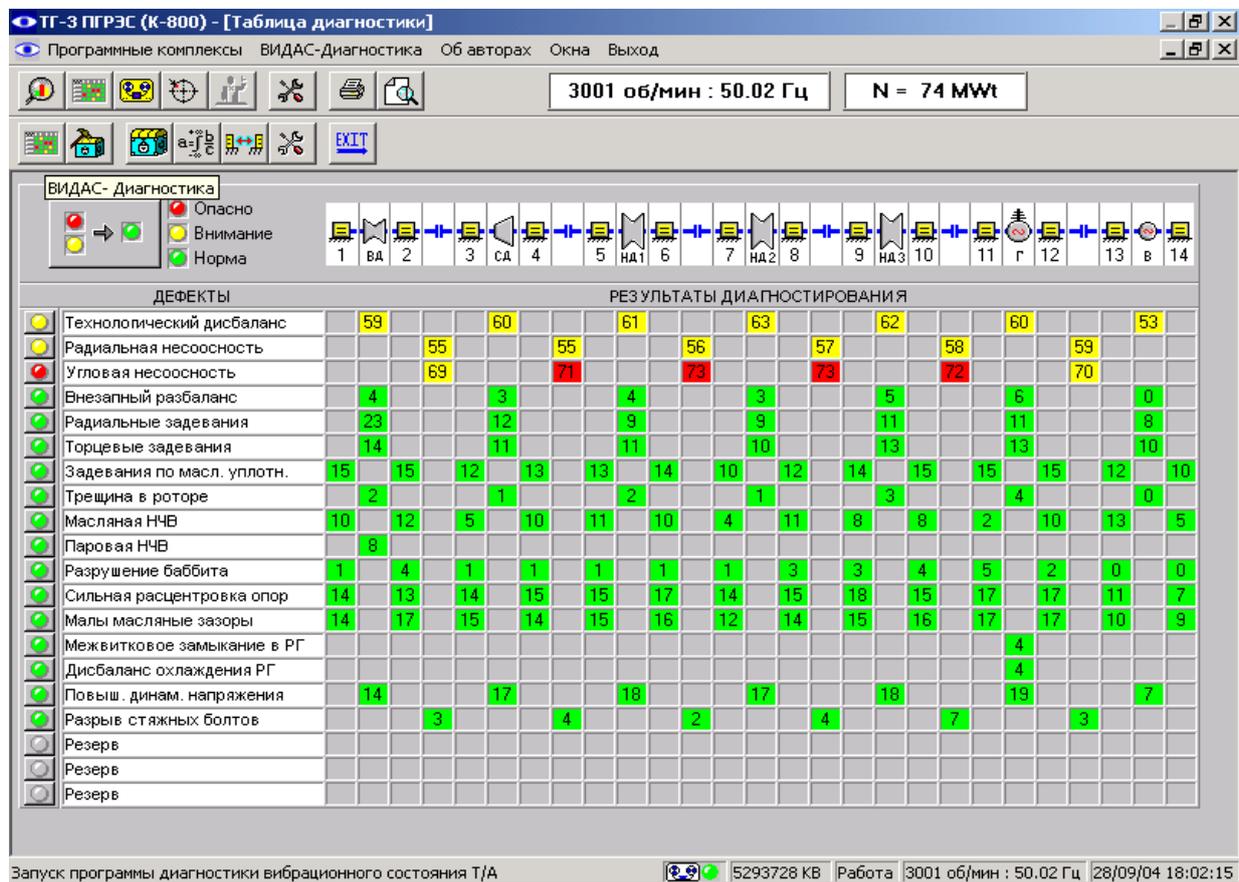


Рисунок 8.12 – Экран диагностики неисправностей

АСДЛ «СКАЛА» предназначена:

- для непрерывного эксплуатационного контроля механического состояния каждой лопатки контролируемой ступени;
- своевременного выявления трещин в лопатках, разрывов проволочных связей, обрывов периферийных частей лопаток, разрушений бандажных полок.

Теоретическая база системы – это оригинальный метод оценки механического состояния вращающейся лопатки, запатентованный ОАО «НПО ЦКТИ» [117].

Данные о состоянии лопаток содержатся в сигналах от индукционных датчиков, устанавливаемых в проточную часть над лопатками контролируемой ступени. Диагностическое заключение о состоянии лопаток формируется после их обработки.

На рисунках 8.13 и 8.14 представлены основные экраны АСДЛ «СКАЛА».

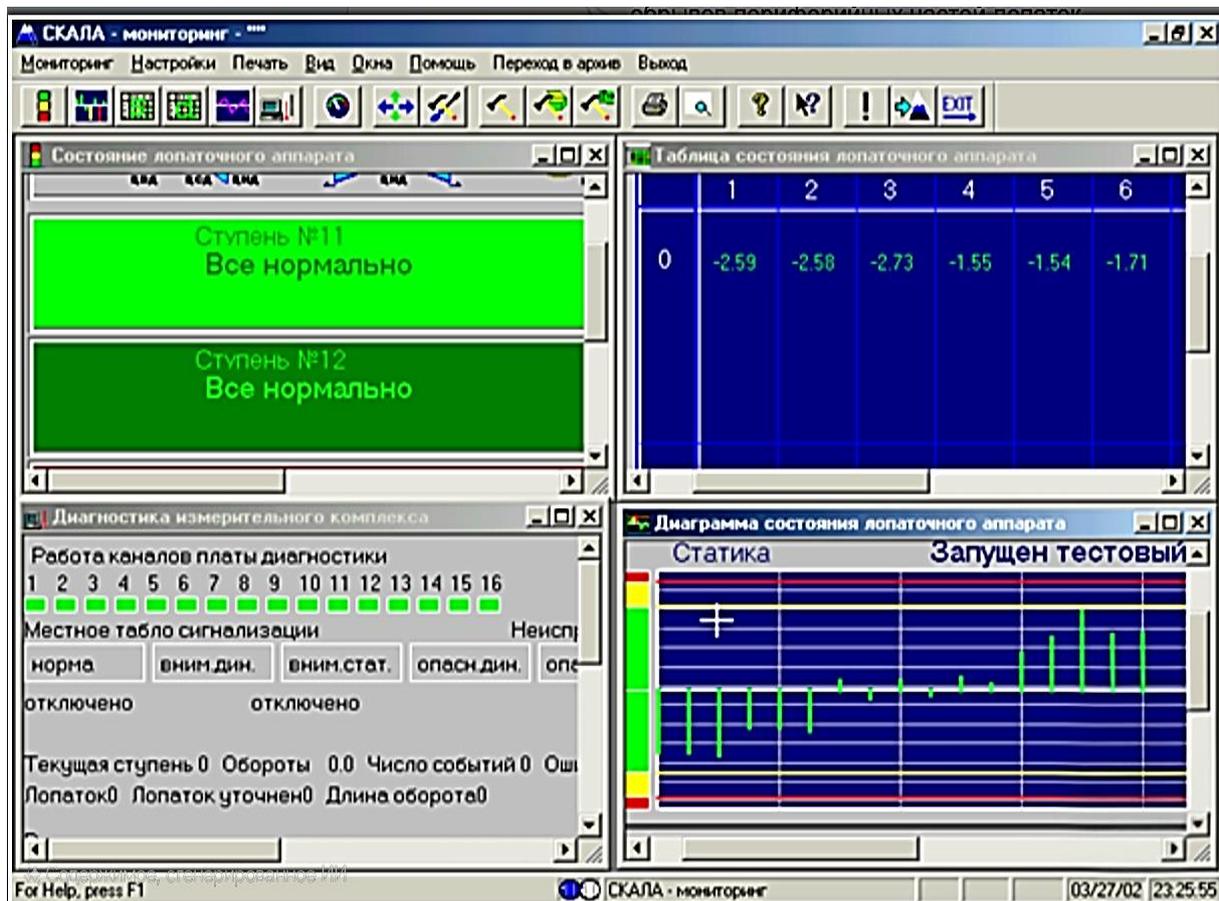


Рисунок 8.13 – Экран «мониторинг»

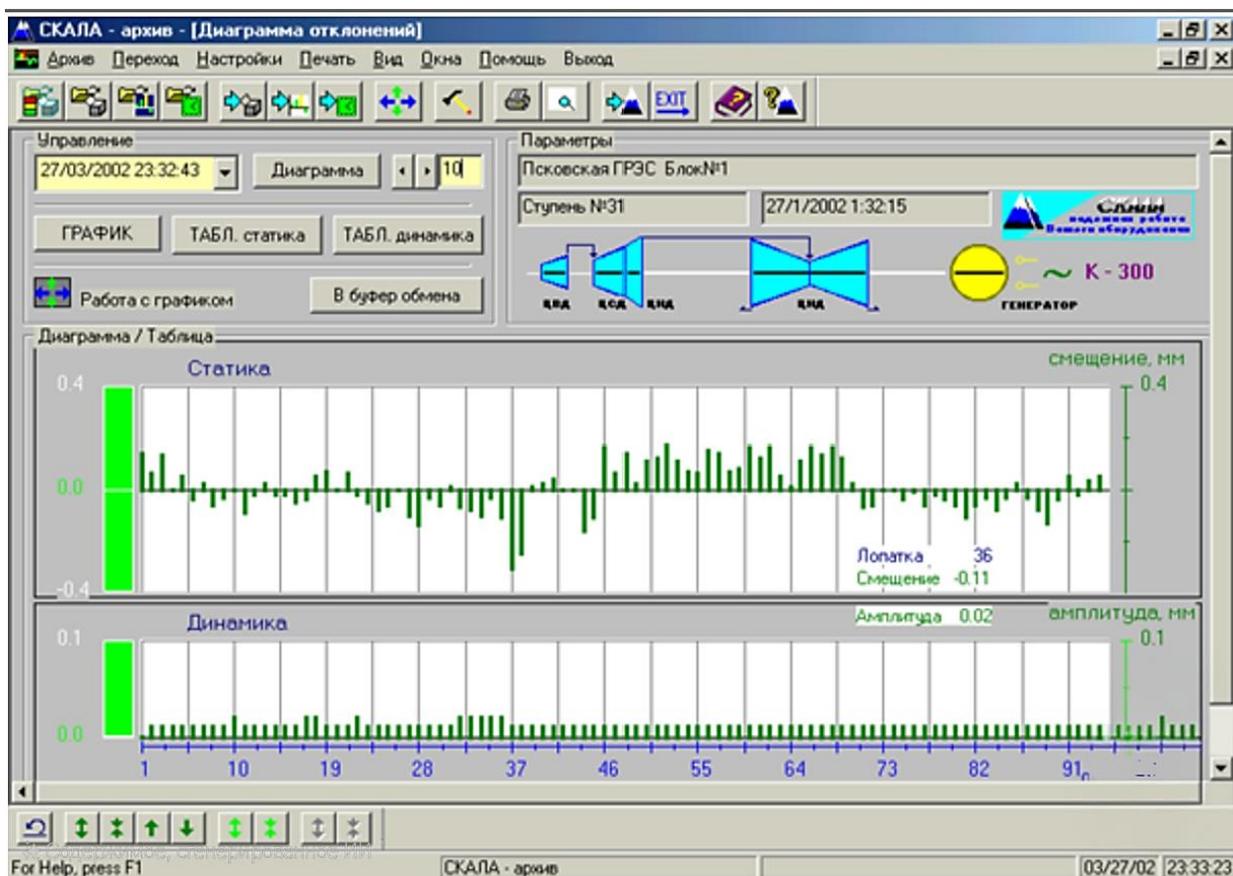


Рисунок 8.14 – Экран «Диаграмма отклонений»

Программа «Ментор» предназначена для повышения качества эксплуатации турбины благодаря более удобному и полному представлению информации о состоянии оборудования, для облегчения работы оперативного персонала и, как следствие, продления ресурса оборудования.

Программное обеспечение состоит из двух основных подпрограмм:

- программа оперативного расчета КПД цилиндров паровой турбины с диагностикой состояния проточной части, созданная на основе разработанных методик определения эксплуатационной экономичности цилиндров по измеренным параметрам пара на входе и выходе цилиндров [114-115], позволяет рассчитывать КПД цилиндров высокого и среднего давления с учетом потерь как отношение полезно использованного теплоперепада к располагаемому (рисунок 8.15);

- программа расчета температурных напряжений и повреждаемости (расход ресурса) турбины предназначена для постоянного оперативного выявления опасных отклонений текущих значений напряжений от допустимых по условиям работы в переменных режимах эксплуатации и анализа накопления усталостного напряжения и повреждаемости металла на критических участках элементов турбины (рисунок 8.16).



Рисунок 8.15 – Экран оценки КПД цилиндров

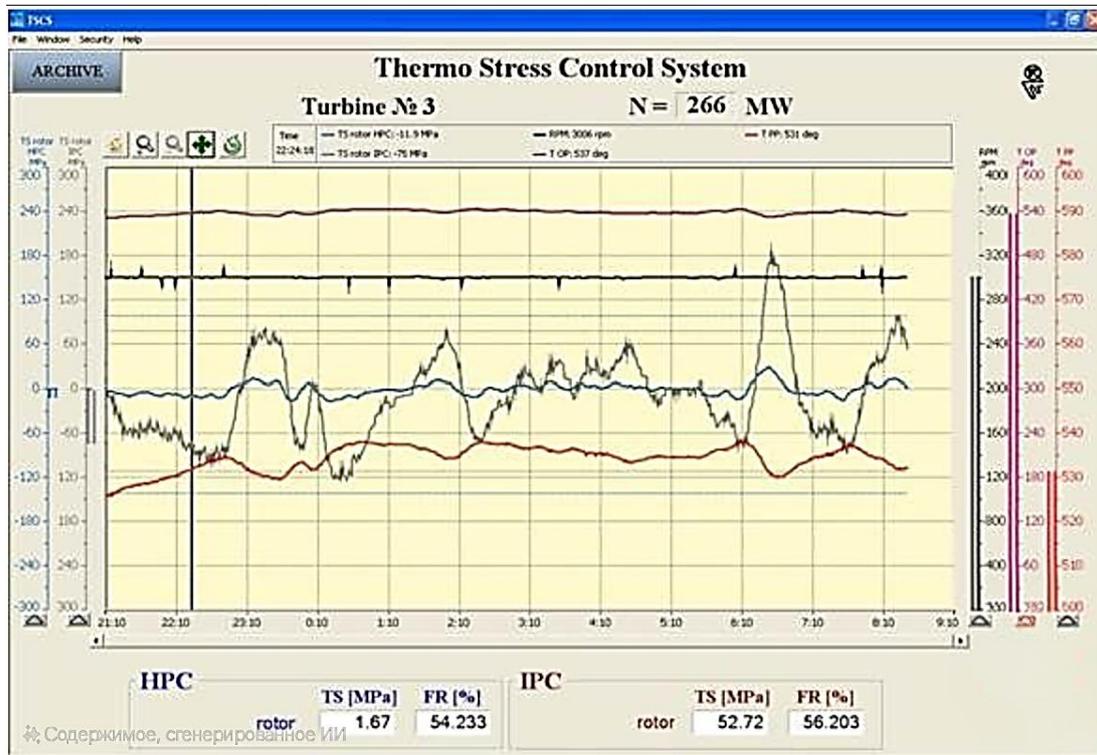


Рисунок 8.16 – Экран расчета температурных напряжений Система прогностики и мониторинга «ПРАНА».

В отличие от систем ОАО «НПО ЦКТИ», где основой для диагностики являются экспертные правила либо физико-математические модели процессов изменения состояния (методы на основе знаний), в основу системы «ПРАНА» заложен алгоритм, базирующийся на построении модели работы по статистическим данным [97, 104].

Эталонная модель создается для работы исправного оборудования, при эксплуатации которого отсутствуют какие-либо негативные тенденции, связанные с естественным износом или зарождением дефектов. В режиме реального времени происходит сравнение текущего состояния агрегата с моделью. По разнице эталонного и измеренного значений для каждого параметра вычисляется его невязка, а также среднеквадратичное отклонение. Невязки нормализуются, и по совокупности рассчитывается интегральная величина. При изменении зависимостей измеренных значений значение этой величины существенно возрастает. Таким образом, эталонная модель представляет собой вектор-функцию от вектора аргументов параметров. Таким образом, система позволяет прогнозировать изменения в техническом состоянии оборудования и выявлять ранее неизвестные зависимости параметров.

Процесс построения модели универсален для оборудования любого типа. Предварительно необходимо проанализировать режимы работы, выбрать параметры и отбраковать «плохие» данные.

Для газовых и паровых турбин главным параметром режима работы является их электрическая мощность. Анализ системой «ПРАНА» работы ГТУ осуществляется для трех основных режимов (номинальная, средняя и низкая электрическая мощность).

Отдельно рассматриваются динамические режимы: пуск, останов, изменения нагрузки и т.п. Для котла-утилизатора основными параметрами работы служат электрическая мощность ГТУ и режим работы ПТУ. Набор параметров, входящих в модель динамических и стационарных режимов работы, может различаться.

Все параметры необходимо проанализировать на предмет достоверности показаний датчиков и наличия устойчивых трендов. Если данные параметры недостоверны или отсутствуют, они считаются «плохими». Из имеющегося архива исключаются данные «плохого» качества, а также участки входящих в модель параметров, имеющие деградационные тенденции (тренды).

На рис. 8.17, 8.18 представлены основные экраны системы «ПРАНА».



Рисунок 8.17 – Экран прогнозного мониторинга

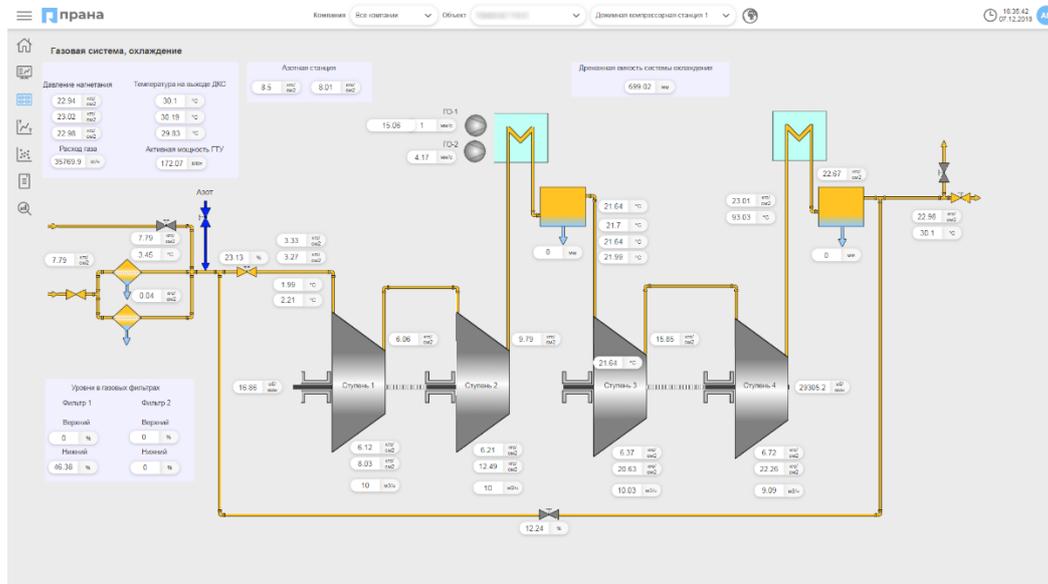


Рисунок 8.18 – Принципиальная схема объекта мониторинга

8.6. Обзор зарубежных систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования.

В аналогичном направлении развивались методы и системы автоматизированной диагностики зарубежного энергетического оборудования. С конца 80-х гг. XX в. получают свое распространение системы диагностики для отдельных систем и оборудования [118-138].

Основой для таких систем становятся экспертные методы (правила), реализуемые в логике: «ЕСЛИ, ТО», «ЕСЛИ, ТОГДА, В ПРОТИВНОМ СЛУЧАЕ». Количество правил, которыми оперируют такие системы, может достигать нескольких сотен [132, 133], а количество диагностируемых дефектов может достигать 20 [126, 134]. Имеются системы, которые кроме решающих правил оперируют также математическими моделями, например, моделями вынужденных колебаний валопровода [122]. В некоторых системах производится оценка вероятности события [132, 135].

В части попыток создания комплексных систем диагностики паротурбинного оборудования известен опыт компании Westinghouse, включающий в себя подсистемы диагностики генератора, турбины и водно-химического режима [139].

Среди наиболее распространенных современных систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования, построенных на статистических методах на основе данных можно выделить следующие системы:

- Siemens Equipment Predictive Analytics (Siemens);
- Smart Signal (General Electric);
- AVEVA PRiSM Predictive Asset Analytics (Schneider Electric)

Siemens Equipment Predictive Analytics (Siemens).

В основу системы заложены алгоритмы машинного обучения [140]. Система на основании корреляционных зависимостей определяет до 30 наиболее важных параметров и в автоматическом режиме осуществляет их контроль. Пользователь видит взаимосвязи параметров в виде узлов и может подробнее изучить каждый из них непосредственно в системе.

Система строит несколько моделей работы оборудования, которые работают параллельно. Модели можно обновлять или строить заново. При модели остаются качественными на протяжении всего жизненного цикла оборудования. Иными словами, они остаются способными выявлять отклонения в работе на протяжении всего периода эксплуатации.

Система позволяет разбивать оборудование на группы. Это упрощает анализ при эксплуатации системы. Анализ наличия отклонения проводится путем анализа данных связанных параметров на графиках. При выявлении отклонения пользователь документирует данное событие, где он его может описать, выдать рекомендации по устранению. Так, отклонение попадает в библиотеку аномалий. В последствии методами обработки данных система может выявлять отклонения на основе библиотеки, в том числе в архивных данных. На рисунке 8.19 представлен пользовательский интерфейс системы SiEPA.

AVEVA PRiSM Predictive Asset Analytics (Schneider Electric).

В основу системы заложен запатентованный алгоритм упорядочивания точек для обнаружения кластерной структуры – Ordering points to identify the clustering structure (OPTiCS). Данный алгоритм использует прогрессивные методы распознавания образов и технологию машинного обучения [140].

Система позволяет вести как онлайн, так и оффлайн мониторинг. Обработка данных может вестись непосредственно на объекте мониторинга или в центре обработки данных в случае онлайн мониторинга. Система может использоваться для мониторинга одного объекта или большой группы.



Рисунок 8.19 – Пользовательский интерфейс системы SiERA

Пользователи могут настроить свои пороговые значения сигнализации для каждого из параметров мониторинга. Также могут выставляться уставки для разницы между модельным и реальным значением параметра (невязками). При превышении этих пороговых значений пользователю приходит уведомление. Пользователи могут заводить в систему виртуальные сигналы, просматривать исходные данные для построения модели, сравнивать показатели производительности похожих устройств одного типа и делать обзор событий. Также доступна настройка диагностических правил.

Модели работы оборудования (цифровые копии) строятся на архивных данных, которые проходят обработку. При этом пользователь может использовать готовые шаблоны моделей.

Система имеет библиотеку ситуаций (case library), в которую записываются все выявленные неполадки в работе оборудования. Это позволяет использовать в последующем данную информацию при аналогичных инцидентах на подобном оборудовании. Как и все прочие системы мониторинга, анализ работы оборудования основывается на анализе невязок. При этом система умеет оценивать вклад параметров в отклонение от модельного поведения. Все это позволяет заблаговременно информировать пользователя об отклонениях в работе оборудования.

Анализ невязок заложен в основу диагностических правил, форма которых представлена на рисунке 8.20. Пользователь может завести правило на любой тип агрегата. Для этого ему необходимо ввести в верхней части

формы имя отказа, его описание и рекомендации к действиям для его устранения. Ниже ему требуется описать сам отказ: выбирается параметр агрегата и его поведение относительно модельных значений (выше, ниже, выше или ниже), также указывается весовой коэффициент влияния данного параметра на отказ.

Показатель	Поведение отклонения	Формат	Минимум	Максимум	Единицы измерения	Ссылка на пороговый тревог	Весовой приоритет	Эффект вес
ТЕМП. ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (1)	↑↓	Абсолю...	0			<input checked="" type="checkbox"/>	1	11,1%
ТЕМП. ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (2)	↑↓	Абсолю...	0			<input checked="" type="checkbox"/>	1	11,1%
ТЕМП. ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (3)	↑↓	Абсолю...	0			<input checked="" type="checkbox"/>	1	11,1%
ТЕМП. ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (4)	↑↓	Абсолю...	0			<input checked="" type="checkbox"/>	1	11,1%
ТЕМП. ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (5)	↑↓	Абсолю...	0			<input checked="" type="checkbox"/>	1	11,1%
ТЕМП. ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (6)	↑↓	Абсолю...	0			<input checked="" type="checkbox"/>	1	11,1%
ТЕМП. ПОДШ. ОСН. НАСОСА (НС)						<input type="checkbox"/>	1	
ТЕМП. ПОДШ. ОСН. НАСОСА (ПС)	↑	Абсолю...	0			<input checked="" type="checkbox"/>	1	11,1%
ТЕМП. ПОДШ. РЕДУКТОРА 1 (НС)						<input type="checkbox"/>	1	
ТЕМП. ПОДШ. РЕДУКТОРА 1 (ПС)	↑	Абсолю...	0			<input checked="" type="checkbox"/>	1	11,1%
ТЕМП. ПОДШ. РЕДУКТОРА 2 (НС)						<input type="checkbox"/>	1	
ТЕМП. ПОДШ. РЕДУКТОРА 2 (ПС)	↑	Абсолю...	0			<input checked="" type="checkbox"/>	1	11,1%

Рисунок 8.20 – Экран создания диагностического правила системы Aveva

Пользователь видит состояние каждого агрегата через веб-клиент в виде статуса, который сигнализирует о наличии в текущий момент нарушения в работе и важности нарушения.

После оповещения пользователя о выявленном отклонении, происходит анализ данного отклонения. Далее специалист может вручную поменять статус сообщения, а также выставить приоритет рассмотрения данного сообщения.

Также система предусматривает возможность прогнозирования времени наступления аварийного события. Экран прогнозирования представлен на рисунке 8.21.

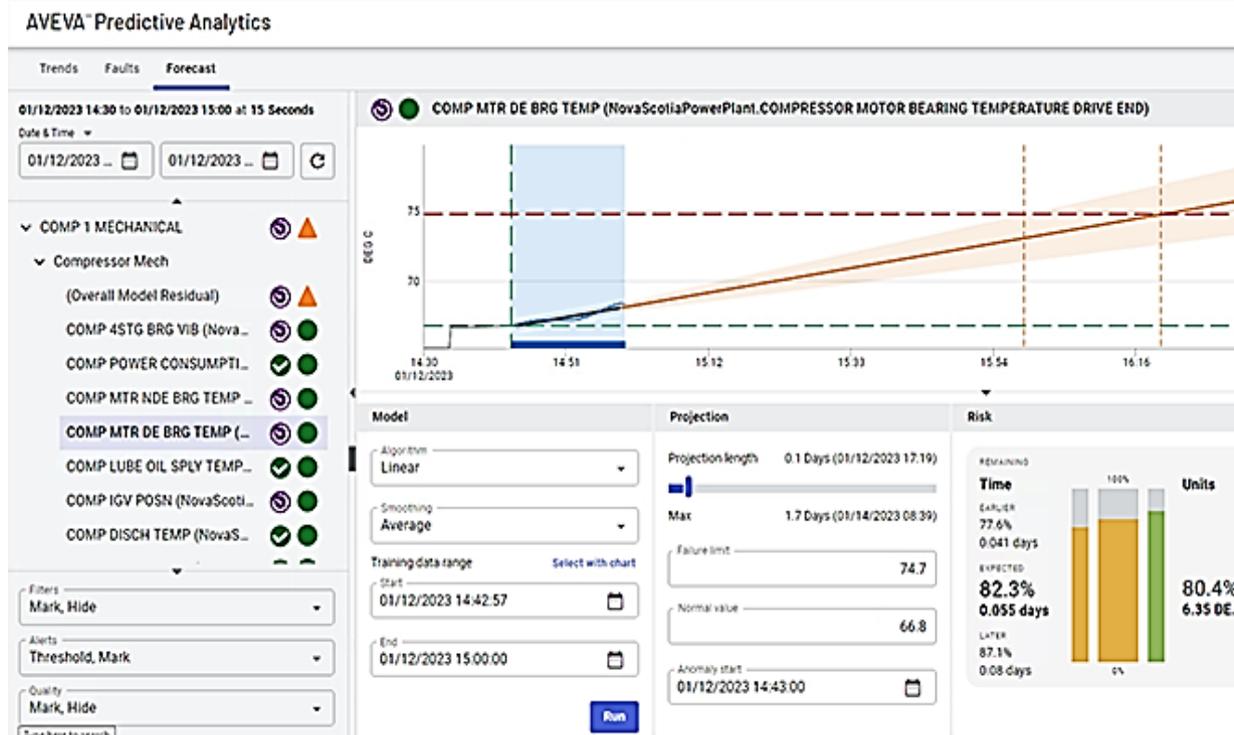


Рисунок 8.21 – Экран прогнозирования системы Aveva

Smart Signal (General Electric)

В основу системы Smart Signal заложен метод моделирования на основе подобия – similarity based modelling. Суть метода заключается в расчете функции подобия или сходства для каждого из параметров, входящих в модель. Если значения параметра отличаются от модельного, то функция подобия для данного параметра будет равна 0 и специалисту следует обратить внимание на данный параметр. Эмпирическая модель в этом случае описывается в виде формулы, то есть существует в явном виде [140].

Для построения модели используются данные работы оборудования за период от шести и более месяцев с частотой от одного часа до десяти минут. Оптимальным для построения модели считается период от года.

В системе имеются готовые библиотеки шаблонов работы оборудования. Также имеется библиотека типовых неисправностей. Автоматическая идентификация дефектов происходит по совпадению текущей неисправности с неисправностями из библиотеки дефектов для различных групп оборудования.

Мониторинг работы оборудования осуществляется путем анализа невязок. Система сравнивает актуальные показания датчика с прогнозным

значением модели, описывающей нормальную работу оборудования. При отклонении значений параметра от модели, система выдает соответствующее сообщение. Основным преимуществом системы является то, что она, как правило, является частью АСУ ТП.

На рисунке 8.22 представлен экран мониторинга системы Smart Signal. Экран прогнозирования представлен на рисунке 8.23.

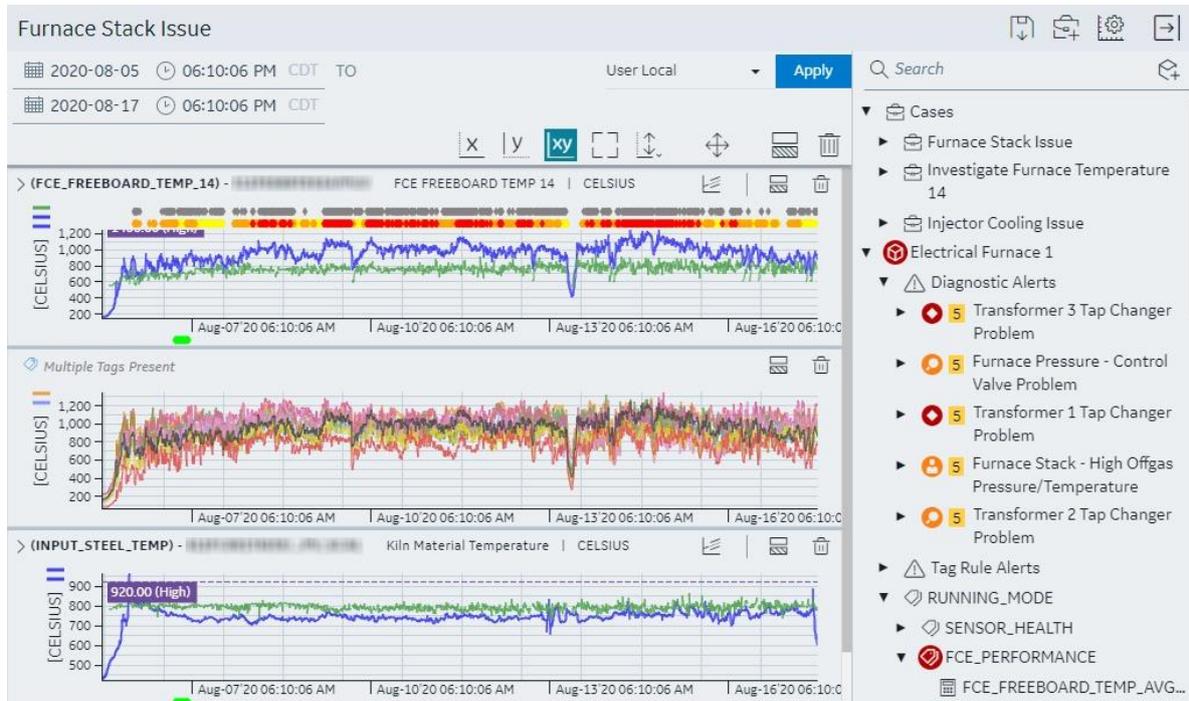


Рисунок 8.22 – Экран мониторинга системы Smart Signal

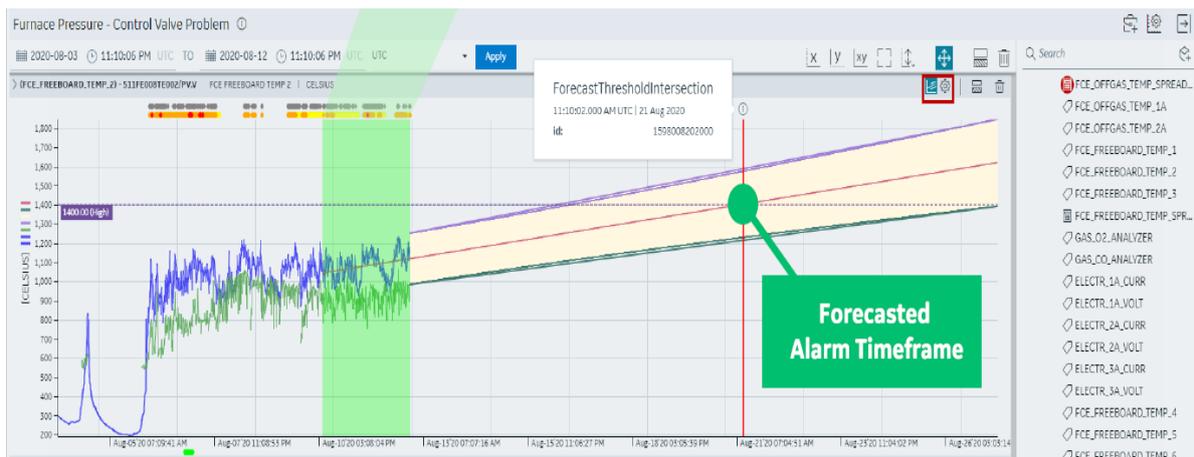


Рисунок 8.23 – Экран прогнозирования системы Smart Signal

В таблице 8.2 представлен сравнительный анализ зарубежных систем и системы «ПРАНА», основанных на статистических методах, выполненный на основании материалов из открытых источников.

Таблица 8.2 – Сравнительный анализ зарубежных систем мониторинга и диагностики

№	Технические требования	SiePa	Smart Signal	PRiSM	ПРАНА
1	Единый интегральный критерий технического состояния	-	-	-	+
2	Математический аппарат системы базируется на эмпирическом подходе к построению моделей	+	+	+	+
3	Математические модели системы разрабатываются индивидуально для каждой единицы оборудования	+	+	+	+
4	Система автоматически выявляет и отображает не менее 10 показателей с определением и ранжированием их вклада в сформировавшееся отклонение фактического технического состояния от эталонного	+	+	-	+
5	Исходные данные для построения эталонных моделей поступают в систему в режиме онлайн в автоматическом режиме с дискретизацией не реже 1 раз в секунду	+	+	+	+
6	Система доступна на мобильных устройствах	+	+	-	+
7	Система реализована на базе web-сервера с целью предоставления удаленного доступа	+	+	+	+
8	Система снабжена аппаратно-программными комплексами, предупреждающими несанкционированный доступ к передаваемой информации	+	+	+	+
9	Графическое представление данных реализовано с возможностью построения графиков с количеством переменных значений не менее 5-ти	+	+	+	+
10	Экспертный модуль по оценке остаточного ресурса оборудования	-	-	-	+
11	Экспертный модуль по 3D-визуализации тепловых полей	-	-	-	+

Продолжение табл. 8.2

№	Технические требования	SiePa	Smart Signal	PRiSM	ПРАНА
12	Экспертный модуль по проведению корреляционно-регрессионного анализа	+	+	+	+
13	Документы на разработку, обладание и использование интеллектуальной собственности	+	+	+	+
14	Опыт предоставления услуг на базе системы на объектах генерации тепловой и электрической энергии с суммарной мощностью не менее 2 ГВт и количеством основного генерирующего оборудования (котельные и турбинные агрегаты) не менее 30 единиц	+	+	-	+
15	Опыт самостоятельного создания и непрерывной эксплуатации круглосуточного ситуационного центра	+	+	+	+

Основным недостатком существующих (в основном зарубежных) систем, построенных на основе статистических методов является отсутствие научно-технической обоснованности («физичности») результатов их диагностирования и прогнозирования. Указанные системы для конечного пользователя представляют собой «черный ящик», алгоритмы их работы не раскрываются и представляют собой интеллектуальную собственность разработчиков. В этих условиях эксплуатирующая организация с недоверием относится к результатам диагностики и прогнозирования и, следовательно, не может применять результаты работы этих систем для осуществления ремонтов энергетического оборудования по текущему состоянию.

8.7. Опыт разработки системы мониторинга и диагностики паровых турбин.

Согласно Правилам организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики, утвержденных Приказом № 1013 Минэнерго России от 25 октября 2017 года (далее – Правила), ремонт энергетического оборудования следует осуществлять с применением следующих видов

организации ремонта:

- планово-предупредительный ремонт;
- ремонт по техническому состоянию.

Планово-предупредительный вид организации ремонта энергетического оборудования является традиционным инструментом поддержания надежной и безаварийной работы тепловых электростанций РФ.

Недостаток такого вида организации ремонта заключается в том, что при планировании периодичности и объемов ремонта, как правило, не учитываются особенности эксплуатации оборудования и его фактическое состояние. В работах [141-143] показано, что выполнение ремонтов по техническому состоянию позволяет повысить надежность эксплуатации и снизить затраты на обслуживание.

При этом согласно Правилам вид организации ремонта по техническому состоянию энергетического оборудования может применяться, если у субъекта электроэнергетики имеются средства технического диагностирования и автоматизированная система контроля за техническим состоянием основного оборудования, представляющая программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий процесс удаленного наблюдения и контроля за состоянием оборудования, его диагностирование и прогнозирование изменения технического состояния на основе собранных и операционных данных, получаемых от систем сбора данных установленных на оборудовании. Исключения составляют следующие объекты ремонтов:

- объекты, по которым отсутствует ремонтная документация, устанавливающая периодичность, методы и объемы контроля технического состояния;
- объекты, по которым установленные ремонтной документацией методы и объемы контроля технического состояния не позволяют определить фактическое техническое состояние и его изменение в период до следующего выполнения контроля;
- объекты, эксплуатируемые в зоне индивидуального ресурса продления безопасной эксплуатации;
- газовые турбины газотурбинных и парогазовых установок;

- основное оборудование энергоблоков, работающих на сверхкритических параметрах пара;
- вновь вводимое основное оборудование, находящееся в опытной эксплуатации.

С этой целью разработана и реализована на практике программно-аппаратная структура системы мониторинга и диагностики для паровой турбины ПТ-75/80-8,8/1,25-М на ТЭЦ-ПВС ПАО «Северсталь», а также перечень опробованных и научно обоснованных критериев и алгоритмов, разработанных профильными научно-техническими институтами и конструкторскими службами, реализация которых в составе системы позволит получить адекватную оценку состояния энергетического оборудования и осуществлять его ремонт по техническому состоянию.

Структурная схема системы мониторинга и диагностики паровой турбины.

Исходными данными для системы являются результаты штатных измерений АСУ ТП, системы контроля вибрации и механических величин (СКВиМ), электрической части системы регулирования и защиты (ЭЧСРиЗ), а также другие средства контроля турбоустановки. Структурная схема системы представлена на рисунке 8.24.

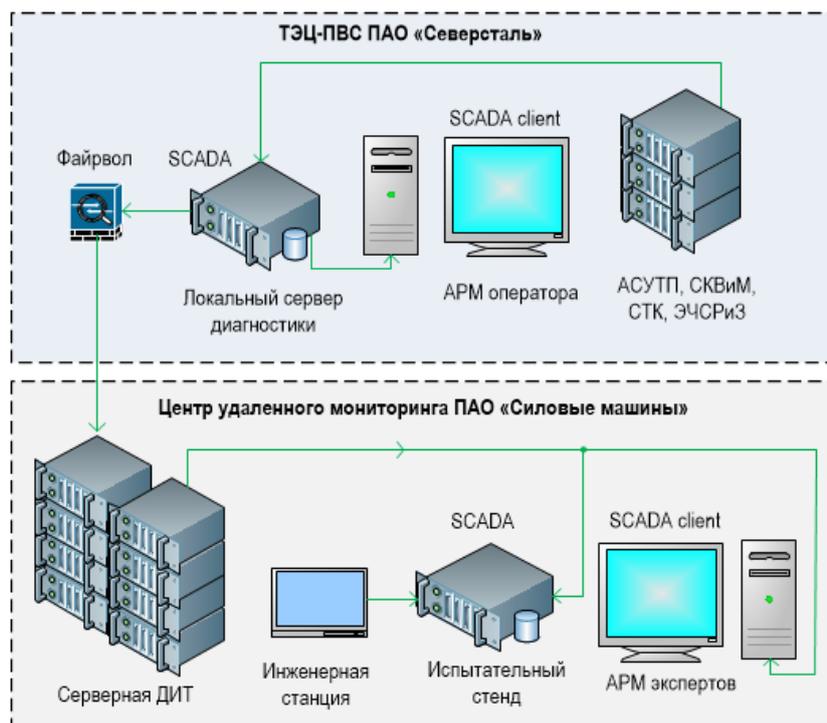


Рисунок 8.24 – Структурная схема системы мониторинга и диагностики

Система состоит из локальной части, устанавливаемой непосредственно на тепловой электростанции. Также предусмотрена возможность передачи диагностических данных в центр удаленного мониторинга завода-изготовителя (удаленная часть системы). С этой целью система комплектуется межсетевым экраном, защищающим сети эксплуатирующей организации от несанкционированного доступа.

Программно-алгоритмическое обеспечение системы мониторинга и диагностики паровой турбины.

Программно-алгоритмическое обеспечение система, устанавливается на локальный сервер и включает в себя следующие основные модули:

- модуль базовых вычислений;
- модуль расчета температурных напряжений;
- модуль расчета технико-экономических показателей;
- модуль диагностики вибрационного состояния;
- модуль диагностики системы автоматического регулирования;
- модуль диагностики системы тепловых расширений;
- модуль диагностики теплообменного оборудования;
- модуль предиктивной аналитики.

Модуль базовых вычислений предназначен для подготовки вспомогательной информации и первичном анализе тенденций изменения контролируемых параметров. Среди инструментов, заложенных в базовый модуль, можно выделить:

- фильтр Калмана (снижение «шума» и флуктуаций контролируемых величин);
- производная функции по времени (определение убывания, возрастания функции, скорости изменения, расчет времени достижения аварийной уставки);
- многоуровневая система уставок (технологические, предупредительные и аварийные уставки);
- базовые диагностические критерии (критерии разности, критерии разности на интервале времени, критерии соотношений, критерии степени зависимости, дискретная логика).

Модуль расчета температурных напряжений предназначен для качественной оценки и оптимизации переменных режимов работы паровой турбины. Функционал модуля заключается в определении характеристик:

- эффективная разность температуры поверхности ротора и среднеинтегральная температура по радиусу ротора;
- остаточное количество пусков из холодного, неостывшего и горячего состояний;
- условная повреждаемость ротора (счетчик ресурса).

Модуль расчета технико-экономических показателей предназначен для представления данных о текущей эффективности работы оборудования. Функционал модуля заключается в определении следующих характеристик:

- интегральные характеристики: расход теплоты (полный и удельный), удельная выработка электрической энергии на тепловом потреблении;
- приведенная электрическая нагрузка;
- расходная характеристика (зависимость давлений по ступеням (отсекам) от расхода через последующий отсек);
- внутренние относительные КПД цилиндров турбины;
- температурные напоры и тепловая нагрузка теплообменного оборудования;
- уровень солевого заноса проточной части цилиндров.

Модуль диагностики вибрационного состояния предназначен для мониторинга и автоматического анализа текущего вибрационного состояния паровой турбины. Функционал модуля заключается в определении следующих неисправностей:

- технологический дисбаланс;
- радиальная несоосность;
- угловая несоосность;
- внезапный разбаланс;
- радиальные задевания;
- торцевые задевания;
- задевания по масляным уплотнениям;
- трещина в роторе;

- масляная низкочастотная вибрация;
- паровая низкочастотная вибрация;
- разрушение баббита;
- расцентровка опор;
- малые масляные зазоры;
- межвитковое замыкание ротора генератора;
- дисбаланс вентиляции по каналам ротора генератора;
- повышенные динамические напряжения в роторах;
- разрыв стяжных болтов;
- жидкость в осевом канале ротора.

Примеры диагностических критериев, реализуемых в данном модуле представлены в таблице 8.3.

Анализ работоспособности системы тепловых расширений на пуско-остановочных режимах эксплуатации паровой турбины осуществляется в соответствующем **модуле диагностики системы тепловых расширений** позволяет определять:

- повышенные силы трения на поверхностях скольжения;
- «закусывание» на продольной шпонке;
- «закусывание» на поперечных шпонках.

Модуль диагностики системы регулирования предназначен для определения следующих отклонений и неисправностей:

- отклонение САР от нормативной нагрузочной характеристики турбины на конденсационных режимах;
- отклонение САР от нормативной расходной характеристики турбины;
- снижение быстродействия САР;
- неплотность регулирующих клапанов;
- превышение допустимых усилий сервомоторов;
- превышение динамического повышения частоты вращения ротора турбоагрегата при сбросах электрической нагрузки;
- обрыв штоков регулирующих клапанов.

Таблица 8.3 – Критерии диагностики вибрационного состояния

№	Неисправность	Зона роста	Технологические уставки	Дополнительные признаки
1	Внезапный разбаланс	10 с	$\Delta V_{1000}(a, N, v) = 0,8 \text{ мм/с}$ $\Delta V_{1000}(a, N, h) = 0,5 \text{ мм/с}$ $\Delta S_{1000}(a, N, v) = 20 \text{ мкм}$ $\Delta S_{1000}(a, N, h) = 20 \text{ мкм}$ $\Delta V_1(a, N, v) = 0,5 \text{ мм/с}$ $\Delta V_1(a, N, h) = 0,5 \text{ мм/с}$ $\Delta S_1(a, N, v) = 10 \text{ мкм}$ $\Delta S_1(a, N, h) = 10 \text{ мкм}$	<p>Изменения общего уровня вибрации за 5 с</p> <p>Изменение 1 гармоники оборотной частоты виброперемещения вала и опор за 5 с</p>
2	Радиальные задевания	60 с	$\Delta V_{1000}(a, N, v) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta V_{1000}(a, N, h) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta S_{1000}(a, N, v) = 20 \text{ мкм}$ $\Delta S_{1000}(a, N, h) = 20 \text{ мкм}$ $\Delta V_1(a, N, v) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta V_1(a, N, h) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta S_1(a, N, v) = 10 \text{ мкм}$	<p>Наличие гармоник $\frac{1}{4}$; $\frac{1}{2}$; 1,2,3 оборотной частоты вала и опор, и их изменение за 5 с</p> <p>Разность температур цилиндра верх-низ, право-лево</p> <p>Зависимость вибрации от мощности</p>
3	Межвитковые замыкания в РГ	600 с	$\Delta V_{1000}(a, N, v) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta V_{1000}(a, N, h) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta S_{1000}(a, N, v) = 20 \text{ мкм}$ $\Delta S_{1000}(a, N, h) = 20 \text{ мкм}$ $\Delta V_1(a, N, v) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta V_1(a, N, h) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta S_1(a, N, v) = 10 \text{ мкм}$ $\Delta S_1(a, N, h) = 10 \text{ мкм}$	<p>Зависимость вибрации от мощности</p> <p>Зависимость вибрации от тока ротора</p> <p>Изменение 1 гармоники оборотной частоты виброперемещения вала и опор за 5 с</p> <p>Изменения Общего уровня вибрации за 5 с</p>
4	Трещина в роторе	48 ч	$\Delta V_{1000}(a, N, v) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta V_{1000}(a, N, h) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta S_{1000}(a, N, v) = 20 \text{ мкм}$ $\Delta S_{1000}(a, N, h) = 20 \text{ мкм}$ $\Delta V_1(a, N, v) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta V_1(a, N, h) = 1 \text{ мм/с}$ $\Delta S_1(a, N, v) = 10 \text{ мкм}$ $\Delta S_1(a, N, h) = 10 \text{ мкм}$	<p>Изменение значений вибрации при прохождении критических частот 1 и 2 рода</p> <p>Зависимость вибрации от мощности</p> <p>Изменение 2 гармоники оборотной частоты виброперемещения вала и опор за 5 с</p> <p>Изменения общего уровня вибрации за 5 с</p>

Модуль диагностики теплообменного оборудования позволяет оценивать техническое состояние конденсатора, пароструйных эжекторов, регенеративных и сетевых подогревателей. Модуль обладает следующим функционалом:

- оценка раздельного влияния присосов воздуха и загрязнения трубок на давление пара в конденсаторе;
- определение оптимального срока очистки конденсатора;
- повышение содержания кислорода в основном конденсате после конденсатора;
- оценка остаточного ресурса трубных пучков конденсатора по данным о количестве и периодичности заглушения трубок;
- контроль состояния основных эжекторов турбины;
- отклонение фактических значений недогрева воды до температуры насыщения греющего пара ПВД и ПНД от нормативных величин;
- определение степени загрязнения подогревателей сетевой воды;
- определение оптимального срока замены трубок подогревателей сетевой воды.

Результатом работы каждого диагностического модуля является описание причины возникновения отклонения (неисправности), а также рекомендации по корректирующим воздействиям, формируемые в виде информационного сообщения эксплуатационному персоналу. Кроме функций контроля и диагностирования современные системы должны обладать также возможностью прогнозирования изменения технического состояния на основе собранных и операционных данных, получаемых непрерывно.

С этой целью в состав системы мониторинга и диагностики включен **модуль предиктивной аналитики**. Данный модуль должен обеспечить:

- сравнительный анализ состояния оборудования на одинаковых режимах работы и фиксирование отклонения параметров работы от нормы;
- применение «динамических» сигнализирующих уставок, изменяющих свои значения в зависимости от режима работы оборудования;
- определение (прогнозирование) времени наступления аварийного события.

Алгоритмы прогнозирования должны реализовываться на основе статистической эталонной модели конкретной паротурбинной установки, построенной на основе массива эксплуатационных данных для различных режимов работы. Алгоритмы прогнозирования должны удовлетворять следующим требованиям:

- нахождение отклонений для контролируемых параметров;
- минимальное количество ложных срабатываний;
- прогнозные данные сочетаются с дальнейшим наблюдаемым состоянием паровой турбины.

Для сбора, обработки и анализа массивов эксплуатационных данных на площадке завода-изготовителя необходима организация центра удаленного мониторинга, основное назначение которого:

- корректировка и уточнение прогнозных моделей;
- пополнение базы экспертных правил диагностирования;
- техническая поддержка персонала тепловой электростанции.

Еще одной задачей центра удаленного мониторинга является развитие направления ремонтов энергетического оборудования по его техническому состоянию. Данная задача обусловлена необходимостью участия заводоизготовителей в комиссионном принятии решения о возможности применения вида организации ремонта по техническому состоянию для каждой единицы основного оборудования тепловой электростанции.

Концепция предиктивного регулирования паротурбинных установок.

Применение систем мониторинга и диагностики, основанных на физически обоснованных критериях и математических моделях позволяет в дальнейшем использовать результаты диагностики в качестве управляющих сигналов, воздействующих на регулирующие органы турбоустановки и, как результат организацию оптимального режима, с точки зрения характеристик надежности и экономичности.

В составе электрической части системы регулирования паровой турбины Т-53/67-8,0 разработан модуль вычисления температурных напряжений, позволяющий получать непрерывную информацию о текущем

термонапряженном состоянии корпуса ЦВД. С учетом этого на рисунке 8.25 представлен алгоритм работы модуля, формирующего коррекцию задания темпа повышения частоты вращения валапровода паровой турбины в зависимости от термонапряженного состояния корпуса ЦВД. Аналогично организован алгоритм работы данного модуля и после синхронизации с сетью.

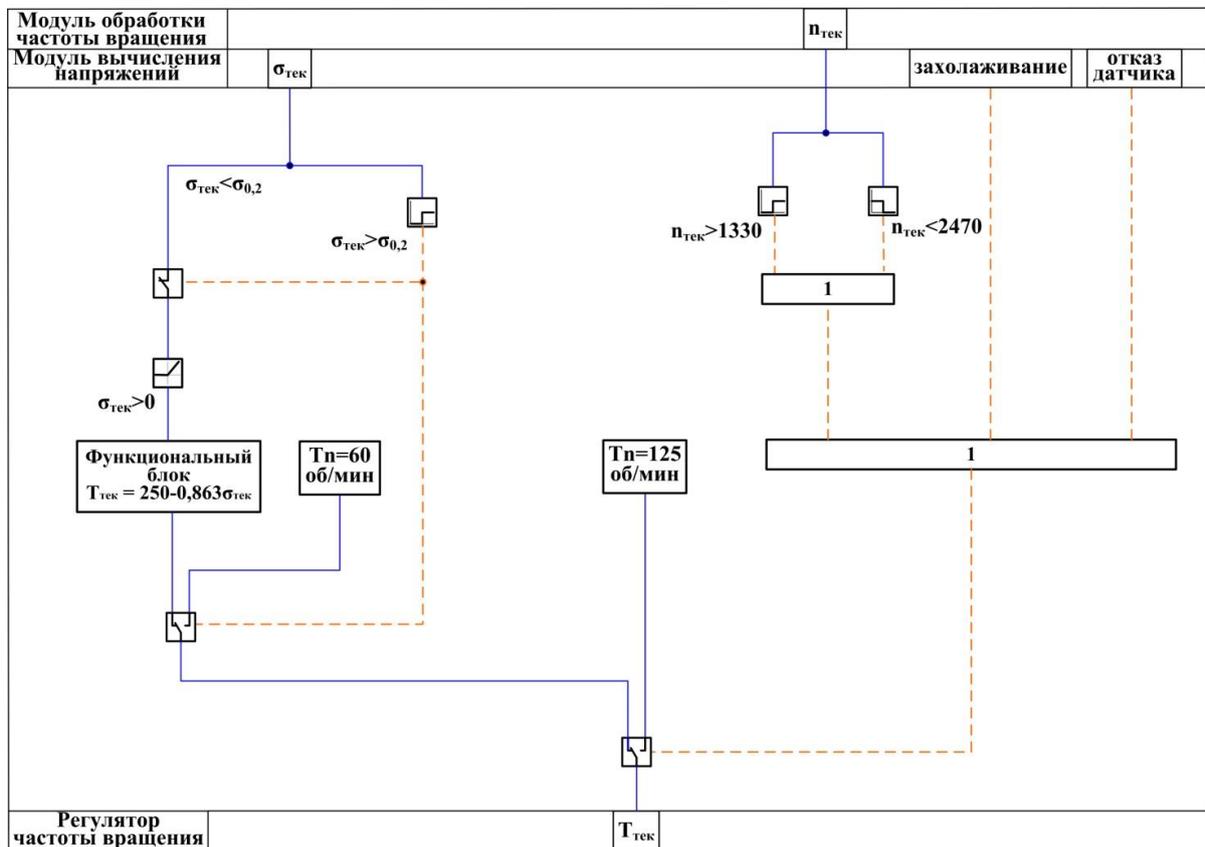


Рисунок 8.25 – Модуль формирования темпа нагружения паровой турбины

Другим способом предотвращения недопустимых температурных напряжений в элементах конструкции паровой турбины может стать модуль, формирующий сигнал блокировки на увеличение частоты вращения или мощности паровой турбины при превышении температурными напряжениями допустимого предела. Данный способ наиболее прост в реализации и заключается в автоматической организации технологических выдержек при пуске паровой турбины, необходимых для ее прогрева.

На время прохождения паровой турбиной критических частот вращения модуль «блокировки регуляторов» автоматически отключается.

Поскольку основным режимом разворота и нагружения паровой турбины в составе ПГУ является режим скользящего давления, работа предлагаемых модулей возможна только до момента полного открытия

регулирующих клапанов контура ВД (РК ВД), что примерно соответствует мощности паровой турбины $N_{пт} \approx 20$ МВт. Последующее нагружение паровой турбины осуществляется за счет увеличения мощности ГТУ, и для организации дальнейшего задания оптимального темпа нагружения паровой турбины необходимо согласование алгоритмов управления ПТУ с алгоритмами управления ГТУ и КУ. Поэтому на этапе нагружения паровой турбины способом скользящего давления может быть более целесообразна организация защиты от возникновения недопустимых температурных напряжений при помощи предохранительного регулятора (рис. 8.26).

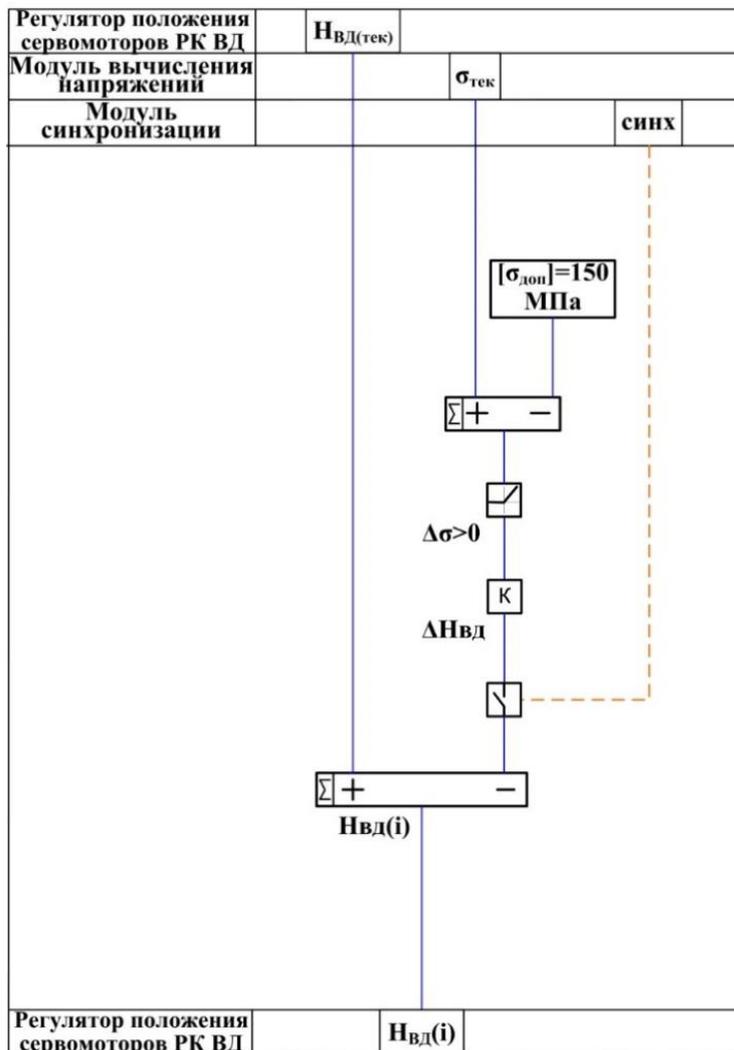


Рисунок 8.26 – Предохранительный регулятор от недопустимых температурных напряжений

Принцип действия предлагаемого регулятора заключается в том, чтобы, используя обратную связь, полученную из модуля вычисления температурных напряжений, осуществлять разгружение паровой турбины, то есть прикрывать РК ВД пропорционально росту температурных напряжений в корпусе ЦВД.

Необходимо отметить, что уровень температурных напряжений в «критических» зонах корпуса ЦВД на начальных этапах пуска достаточно высок, поэтому разгрузка паровой турбины с помощью работы предохранительного регулятора может приводить к полному закрытию РКВД и замедлению пусковых операций. Кроме этого, значительное прикрытие РКВД приведет к дросселированию потока пара и существенному снижению его температуры, что может стать причиной захлаживания металла проточной части турбины. С учетом данного обстоятельства работа предохранительного регулятора недопустимых температурных напряжений предполагается только на режимах набора электрической нагрузки.

Изложенные выше способы регулирования паровой турбины с учетом его термонапряженного состояния могут быть использованы и для других диагностических величин, определяемых системой мониторинга и диагностики. Аналогичным образом могут быть реализованы предохранительные регуляторы и модули формирующие оптимальные темпы изменения частоты вращения и мощности паровой турбины в зависимости от вибрационного состояния, состояния системы тепловых расширений и других величин.

Контрольные вопросы к главе 8

1. Обозначьте цели и основные принципы проектирования систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования.
2. Какие основные факторы учитываются при составлении программ контроля состояния энергетического оборудования?

ГЛАВА 9. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ И ЭНЕРГЕТИКЕ

Искусственный интеллект (ИИ) – в соответствии с проектом федерального закона о регулировании искусственного интеллекта, ИИ определяется как «любая система данных, программное обеспечение или аппаратное средство, обладающее способностью обрабатывать данные и информацию способом, напоминающим разумное поведение, с использованием методов машинного обучения или статистических методов для генерации контента, формирования прогнозов, рекомендаций или решений, способных оказывать влияние на реальную и виртуальную среду» [144].

Развитие технологий ИИ в Российской Федерации определяется Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, утвержденной Указом Президента РФ от 10.10.2019 № 490. Стратегия устанавливает общие цели развития ИИ, включая обеспечение технологического суверенитета, поддержку научных исследований, создание инфраструктуры данных и подготовку квалифицированных кадров. Конкретизация стратегических целей осуществляется через дорожную карту развития высокотехнологичного направления «Искусственный интеллект» на период до 2030 года, которая включает четыре технологических поднаправления: **перспективные методы ИИ, обработка естественного языка и синтез речи, компьютерное зрение, интеллектуальная поддержка принятия решений**. Данные направления имеют прямое отношение к энергомашиностроению и энергетике, поскольку предусматривают создание программно-аппаратных комплексов для мониторинга технического состояния оборудования, систем поддержки принятия решений для управления производственными процессами в промышленности и оптимизации режимов работы сложных технических систем [145, 146].

В энергомашиностроении ИИ рассматривается как инструмент повышения эффективности проектирования, производства, эксплуатации и сервисного обслуживания оборудования. На фоне ускорения научно-технического прогресса и глобальной конкуренции применение методов

машинного обучения и нейросетевых технологий становится стратегическим преимуществом для предприятий отрасли.

Глава ориентирована на системное представление о роли ИИ одновременно на уровне физических активов (оборудование, узлы, агрегаты) и на уровне энергосистемы (станции, сети, рынки), что соответствует современным концепциям «умной» энергетики и цифровой трансформации отрасли.

9.1. Основные направления применения ИИ.

С учетом двойного фокуса на оборудовании и на энергетической системе в целом основные направления применения ИИ целесообразно сгруппировать по пяти взаимосвязанным блокам:

1. Интеллектуальное проектирование и модульная унификация энергетического оборудования.
2. Цифровое производство и управление инженерной документацией.
3. Интеллектуальные системы оценки технического состояния, оптимизации режимов работы и прогнозирования ресурса оборудования.
4. ИИ в управлении энергосистемой, сетями и энергорынками.
5. Аналитика дефектов, ремонтов и эксплуатационных событий для формирования базы знаний.

Эти направления опираются на общую цифровую инфраструктуру и обеспечивают замкнутый контур управления жизненным циклом как отдельных единиц оборудования, так и энергетических объектов, и систем. Реализация данных направлений в российских условиях поддерживается системой мер государственного стимулирования, включая создание исследовательских центров в сфере ИИ, грантовую поддержку разработчиков технологических решений и формирование отраслевых полигонов для тестирования ИИ-систем в промышленности [147].

Интеллектуальное проектирование и модульная унификация энергетического оборудования.

Рассмотрим какие задачи может решать ИИ на этапе проектирования оборудования:

- поиск и оптимизация геометрических и компоновочных решений:

применение машинного обучения для построения суррогатных моделей и их обучение на известных данных численных расчетов позволяют в дальнейшем сократить время аналогичных расчетов для новых конструкций за счет более быстрых аппроксимаций на нейросетях или полиномиальных регрессиях при сохранении той же точности;

- генеративное проектирование: на основе заданных граничных условий (математические уравнения, геометрические параметры, физические и химические свойства материалов, условия работы) ИИ может формировать множество допустимых вариантов конструкций, после чего проводится их оценка по множеству критериев (трудоемкость изготовления, прочностные характеристики и т.д.) для поиска наиболее рационального варианта;

- модульная унификация: на базе номенклатуры выпущенных изделий ИИ может автоматизировать выявление повторяющихся решений для формирования унифицированного списка компонентов и узлов оборудования, а также формировать дальнейшие предложения по снижению вариативности и числу уникальных узлов, способы унификации конструкций без ущерба технико-экономическим и эксплуатационным показателям;

- оценка влияния конструктивных решений: модели, обученные на эксплуатационных данных парка машин, могут оценивать влияние тех или иных конструктивных решений на предмет отказа оборудования, снижение технического ресурса для обоснования внесения изменений в дальнейших разработках.

В результате ИИ-подходы встраиваются в контур PLM/CAE и поддерживают создание номенклатур модульного оборудования, которые соответствуют текущим требованиям рынка [148].

В отечественной практике Центр компетенций по турбинному оборудованию ОДК-Сатурн применяет методы структурного анализа данных о лопаточных машинах для поддержки проектных решений [149].

Цифровое производство и управление технической документацией.

Переход от проектирования к изготовлению и сборке энергетического оборудования сопряжен с необходимостью обработки больших объемов

конструкторской и технологической документации, контроля качества производственных операций и обеспечения сквозного учета решений на всех этапах жизненного цикла. Традиционные подходы, основанные на ручном контроле и линейных процессах, не обеспечивают требуемой скорости адаптации к изменениям в конструкции, выявления несоответствий в документации и оперативной реакции на отклонения в технологических режимах. В этих условиях методы ИИ рассматриваются как средство повышения эффективности цифрового производства за счет автоматизации рутинных операций, интеллектуального анализа данных и поддержки решений производственного персонала.

Одним из ключевых направлений применения ИИ в производственном контуре является интеллектуальная работа с инженерной документацией. Современные энергомашиностроительные предприятия оперируют десятками тысяч чертежей, спецификаций, технологических карт и нормативных документов, распределенных по различным информационным системам и форматам. Языковые модели и специализированные системы обработки естественного языка позволяют организовать семантический поиск по массивам документов, автоматически формировать рабочие инструкции и чек-листы для конкретных операций, а также выявлять противоречия между ревизиями документации, которые могут привести к дефектам и снижению надежности оборудования в эксплуатации. Развитие данного направления поддерживается в рамках дорожной карты развития ИИ по поднаправлению «Обработка естественного языка, распознавание и синтез речи».

Наряду с обработкой текстовых данных, ИИ находит применение в визуальном контроле производственных операций и измерении параметров деталей. Сверточные нейронные сети, обученные на изображениях и видеопотоках с производственных участков, способны измерять геометрические параметры деталей и узлов, обнаруживать поверхностные дефекты (трещины, раковины, несоответствия шероховатости), контролировать правильность установки элементов при сборке и проверять соблюдение технологических режимов на станках и испытательных стендах. В рамках дорожной карты развития ИИ поднаправление «Компьютерное

зрение» предусматривает создание программно-аппаратных комплексов для контроля соблюдения регламентов работы на производстве (включая меры гигиены), охраны и обеспечения безопасности на промышленных объектах, а также комплексов ИИ-решений на производстве для повышения операционной эффективности [150, 151].

Интеграция данных из систем управления производством и ресурсами предприятия (MES/ERP) с результатами анализа документации и визуального контроля позволяет реализовать интеллектуальную поддержку производственного персонала. ИИ-системы могут подсказывать оптимальную последовательность операций с учетом текущей загрузки оборудования и доступности материалов, контролировать полноту регистрации выполненных операций и расхода ресурсов, а также адаптировать представление информации к уровню квалификации исполнителя. Анализ временных рядов по длительности операций, простоев, переналадок и отказов технологического оборудования дает возможность выявлять «узкие места» производственных потоков, оптимизировать расписания и загрузку станков, подбирать режимы обработки, обеспечивающие требуемое качество при минимальных затратах времени и ресурсов.

Интеллектуальные системы оценки технического состояния, оптимизации режимов работы и прогнозирования ресурса оборудования.

После ввода энергетического оборудования в эксплуатацию на первый план выходят задачи непрерывного мониторинга технического состояния, оптимизации режимов работы и прогнозирования остаточного ресурса. Современные энергетические установки оснащаются сотнями и тысячами датчиков, регистрирующих вибрацию, температуры, давления, расходы, электрические параметры и другие физические величины, характеризующие состояние агрегатов и систем. Объем поступающих данных превышает возможности ручной обработки, а сложность взаимосвязей между параметрами затрудняет выявление предаварийных состояний традиционными пороговыми методами (уставками). В этих условиях применение методов ИИ позволяет автоматизировать диагностику, повысить точность оценки состояния оборудования и перейти от планово-

предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию [152, 153].

Диагностика технического состояния на основе ИИ опирается на построение моделей аномалий и классификаторов, обученных на архивных данных нормальной эксплуатации и зарегистрированных отказов. Эти модели обрабатывают многомерные временные ряды параметров, а также изображения (например, термограммы оборудования, результаты эндоскопии проточной части турбин) и позволяют различать нормальные, предаварийные и аварийные режимы работы. Классификаторы способны идентифицировать типовые дефекты, такие как дисбаланс и расцентровка валопроводов, износ подшипников, засорение поверхностей теплообменных аппаратов, локальные перегревы обмоток и изоляции генератора, что дает возможность планировать корректирующие мероприятия до наступления отказа.

Помимо диагностики состояния, ИИ используется для оптимизации режимов работы агрегатов и энергоблоков. Регрессионные и оптимизационные модели, построенные на основе данных эксплуатации, учитывают текущие параметры состояния оборудования, ограничения по ресурсу критических узлов, а также внешние условия – нагрузку энергосистемы, цены на топливо, требования по выбросам загрязняющих веществ. Результатом работы таких моделей является подбор уставок и конфигураций, обеспечивающих минимизацию удельного расхода топлива при заданном уровне надежности, снижение пиковых нагрузок на наиболее уязвимые элементы и улучшение маневренных характеристик блоков [154].

Прогнозирование остаточного ресурса (Remaining Useful Life или RUL) замыкает контур управления техническим состоянием оборудования. Модели RUL, обученные на данных мониторинга и истории отказов, оценивают время до наступления предельного состояния элементов и узлов, формируют рекомендации по срокам и объемам обслуживания, согласованные с графиком работы энергосистемы. Это позволяет сокращать долю внезапных отказов, выравнивать профиль ремонтов по времени и планировать закупку запасных частей и расходных материалов в соответствии с прогнозируемыми сроками обслуживания.

Практическая реализация модели интеллектуального предиктивного обслуживания требует создания интегрированной архитектуры, связывающей источники данных (датчики, АСУ ТП), алгоритмы машинного обучения и системы поддержки принятия решений. Российский опыт промышленного внедрения представлен системой прогностики и удаленного мониторинга ПРАНА (разработка АО «РДС»).

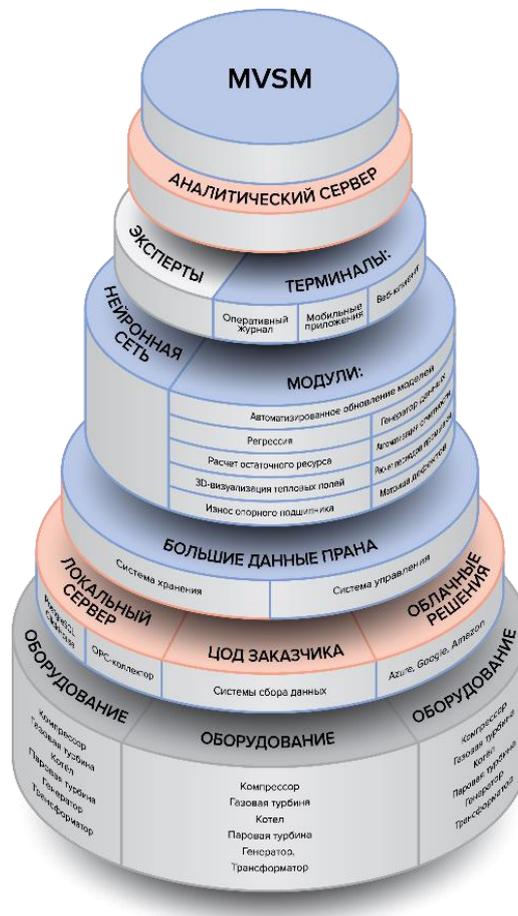


Рисунок 9.1 – Архитектура системы прогностики и удаленного мониторинга «Прана» АО «РДС»

С точки зрения энергосистемы в целом, интеллектуальные системы мониторинга и управления техническим состоянием оборудования формируют «цифровую инфраструктуру надежности», обеспечивая предсказуемость доступной генерирующей мощности и состояния ключевых сетевых элементов – подстанций, высоковольтных линий, трансформаторов и компенсирующих устройств. Повышение надежности на уровне отдельных агрегатов транслируется в повышение устойчивости и управляемости энергосистемы, что особенно важно в условиях растущей доли переменной генерации от возобновляемых источников энергии.

ИИ в управлении энергосистемой, сетями и энергорынками.

Надежная работа отдельных агрегатов и энергоблоков является необходимым, но недостаточным условием эффективного функционирования энергосистемы в целом. Диспетчерское управление энергосистемой требует обработки больших объемов данных об электрических нагрузках, выработке генерирующих установок, состоянии сети и ценовой конъюнктуре на оптовом и розничном рынках электроэнергии. Традиционные методы прогнозирования и оптимизации, основанные на детерминированных моделях и линейных зависимостях, не всегда обеспечивают требуемую точность в условиях высокой неопределенности спроса, роста доли переменной генерации от ВИЭ и усложнения структуры энергосистемы. В этих условиях применение методов ИИ позволяет улучшить качество прогнозов, оптимизировать режимы работы сети и повысить экономическую эффективность участия генерирующих компаний и потребителей на энергорынках.

Прогнозирование нагрузки и выработки является базовой задачей оперативного управления энергосистемой. Модели временных рядов на основе методов градиентного бустинга, рекуррентных нейронных сетей (LSTM, GRU) и архитектур трансформеров позволяют учитывать сложные нелинейные зависимости между факторами (календарные эффекты, метеоусловия, экономическая активность) и прогнозировать почасовую и посуточную нагрузку в узлах энергосистемы, выработку ВИЭ с учетом прогнозов ветра и инсоляции, а также потребление крупных промышленных и коммунальных потребителей. Точность прогнозирования непосредственно влияет на объем резервов мощности, необходимых для обеспечения баланса, и, следовательно, на экономическую эффективность работы энергосистемы.

На основе прогнозов нагрузки и выработки решается задача оптимизации диспетчерского управления и режимов энергосистемы. Алгоритмы оптимизации состава включенного оборудования и оптимального распределения потока с компонентами машинного обучения учитывают технические ограничения генераторов и сетевых элементов, требования по надежности, резервированию и устойчивости, а также экономические критерии – стоимость топлива, затраты на пуски и остановы блоков, износ

оборудования при работе в маневренных режимах. Интеграция ИИ-моделей в контур диспетчерского управления позволяет сократить время принятия решений и повысить точность учета ограничений, особенно в условиях быстрых изменений режима.

Управление распределительными сетями в концепции Smart Grid требует обработки данных от «умных» счетчиков, датчиков состояния оборудования и систем управления распределенной генерацией [155]. Методы машинного обучения применяются для улучшенной оценки состояния сети с учетом неполноты и неоднородности измерений, выявления аномалий и несанкционированных подключений, оптимизации конфигурации сети и схем перекоммутаций при ремонтах и авариях. По данным Минэнерго России, доля компаний топливно-энергетического комплекса, использующих технологии ИИ, выросла с 29% в 2021 году до 58% в 2024 году, причем динамика ускоряется: за 2023-2024 годы прирост составил 17% [156].

На уровне энергорынков ИИ-модели используются для прогнозирования цен, формирования стратегий участия генерирующих компаний и крупных потребителей, оценки влияния режимов работы оборудования на экономику компаний и энергосистемы. Взаимодействие уровней «оборудование – станция – энергосистема – рынок» приводит к тому, что решения ИИ о загрузке конкретной турбины или блока должны согласовываться с ограничениями сети и рыночной ситуацией, а системные модели опираются на точные модели технического состояния и доступности оборудования, формируемые на основе данных мониторинга.

Аналитика дефектов, ремонтов и эксплуатационных событий как основа отраслевой базы знаний.

Применение ИИ на всех стадиях жизненного цикла энергетического оборудования – от проектирования и производства до эксплуатации и управления энергосистемой – генерирует большие объемы разнородных данных. Эти данные включают сведения о конструкциях и модификациях оборудования, историю производства и контроля качества, результаты мониторинга параметров в эксплуатации, информацию об авариях и отказах, данные о ремонтах и модернизациях на объектах генерации и в сетях. Однако

ценность этих данных реализуется лишь при условии их систематизации, интеграции и интеллектуального анализа, позволяющего выявлять закономерности, причинно-следственные связи и формировать рекомендации для совершенствования технических решений и практик эксплуатации.

Формирование единой отраслевой базы знаний на основе интеграции данных энергомашиностроения и энергетики замыкает контур управления жизненным циклом оборудования и энергосистемы. Методы ИИ в этом контексте используются для классификации дефектов, выявления их причин и построения рекомендательных систем, поддерживающих принятие решений на уровне ремонтов, модернизаций и инвестиций.

Классификация и причинный анализ дефектов опираются на установление связей между видом дефекта, типом конструкции, технологией производства, режимами эксплуатации и внешними условиями, например, цикличностью нагрузки, долей ВИЭ в энергосистеме, климатическими факторами. Выявление таких связей позволяет идентифицировать системные источники проблем и формировать меры по их устранению на этапе проектирования новых серий оборудования или корректировки регламентов обслуживания.

На основе сопоставления аналогичных случаев эксплуатации строятся рекомендательные системы для ремонтных и инвестиционных решений. Применяя методы рассуждения по прецедентам (case-based reasoning) по и обучение на исторических данных, такие системы формируют рекомендации по выбору вариантов ремонта и модернизации оборудования, предложения по замене агрегатов или изменению схем энергосистемы, а также оценки экономической целесообразности мероприятий с учетом затрат жизненного цикла и влияния на надежность.

Поднаправление дорожной карты развития ИИ «Интеллектуальная поддержка принятия решений» включает создание семейства систем поддержки принятия решений для задач концептуального инжиниринга и управления производственными процессами в промышленности, а также рекомендательных систем, не требующих участия человека для принятия решений [150, 151].

Замыкание обратной связи в контуре «эксплуатация → проектирование и развитие энергосистемы» обеспечивает адаптивное развитие отрасли на основе реальных данных, а не только нормативных допущений и экспертных оценок. На базе накопленной статистики корректируются конструктивные решения и выбор материалов, регламенты обслуживания, проектные подходы к построению новых энергоблоков, сетевых узлов и схем выдачи мощности. Таким образом, аналитика дефектов и эксплуатационных событий с применением методов ИИ становится фундаментом для непрерывного совершенствования технологий энергомашиностроения и практик управления энергетическими системами.

9.2. Технологические основы и методы ИИ для энергомашиностроения и энергетики.

Методическая база ИИ в рассматриваемой области включает классические методы машинного обучения, глубокие нейронные сети, гибридные физико-ориентированные модели, а также специализированные подходы к анализу временных рядов, технических сигналов и сетевых состояний. Особенностью энергомашиностроения и энергетики является сочетание разнородных данных: численные результаты моделирования, высокочастотные сигналы мониторинга, медленные эксплуатационные тренды, технологические и рыночные временные ряды.

Развитие методической базы в Российской Федерации опирается на создание фундаментальных исследовательских центров в сфере ИИ, включая центры по «сильному» ИИ, доверенным системам ИИ и этическим аспектам применения технологий. Одновременно для практических применений разрабатываются открытые модели, библиотеки и фреймворки (планируется создание 34 таких продуктов к 2030 году), доступные для адаптации под специфику энергетического сектора.

Классификация задач и методов ИИ.

В энергомашиностроении и энергетике следует рассматривать следующие типы задач, решаемых с использованием ИИ:

- регрессия: оценка КПД, потерь, остаточного ресурса, величин потоков

в сети.

- классификация: состояния оборудования, типы дефектов, классы режимов энергосистемы.

- кластеризация: типизация узлов, сегментация потребителей, выделение характерных режимов.

- прогнозирование временных рядов: нагрузки, выработки, цены, технологических параметров.

- обнаружение аномалий: в вибрационных сигналах, технологических трендах, сетевых измерениях.

- обучение с подкреплением: оптимизация управления установками, блоками и сетями.

В таблице 9.1 приведены основные ИИ-методы, применяемые в энергомашиностроении и энергетике.

ИИ-методы в энергомашиностроении.

Для анализа вибрации, пульсаций и иных сигналов технического состояния распространены:

- методы спектрального и вейвлет-анализа в сочетании с классическими алгоритмами классификации (SVM, случайный лес, градиентный бустинг);

- автокодировщики и другие модели для детектирования аномалий по многомерным временным рядам;

- сверточные нейросети для анализа изображений (эндоскопия лопаток, рентген/УЗК сварных соединений, визуальный контроль поверхностей).

В задачах суррогатного моделирования и генеративного проектирования используются:

- гауссовские процессы, полиномиальные регрессии, метамоделли на базе нейросетей для аппроксимации CFD/FEA-результатов;

- эволюционные алгоритмы и байесовская оптимизация для многокритериальной оптимизации геометрии;

- вариационные автокодировщики и генеративно-соревновательные сети в задачах поиска конфигураций конструкций под заданные требования.

Таблица 9.1 – Основные ИИ-методы, применяемые в
энергомашиностроении и энергетике

№	Метод/Алгоритм	Тип задачи	Применение в энергомашиностроении	Применение в энергетике
1	Случайный лес, градиентный бустинг	Регрессия, классификация	Прогноз дефектов, оценка параметров	Прогноз нагрузки, классификация режимов
2	SVM (метод опорных векторов)	Классификация, регрессия	Классификация состояний оборудования	Классификация потребителей
3	Автокодировщики	Обнаружение аномалий	Детектирование дефектов по вибрации	Выявление аномалий в сетевых измерениях
4	Сверточные нейросети (CNN)	Классификация изображений	Визуальный контроль деталей, дефектоскопия	Анализ термограмм подстанций
5	Рекуррентные сети (LSTM, GRU)	Временные ряды	Прогноз параметров работы турбин	Прогноз нагрузки и выработки ВИЭ
6	Трансформеры	Временные ряды, NLP	Работа с документацией, многомасштабные ряды	Прогноз цен на рынке электроэнергии
7	Графовые нейросети (GNN)	Структурированные данные	Анализ топологии сборочных связей	Оценка состояния и оптимизация потоков в сети
8	Обучение с подкреплением	Оптимизация управления	Оптимизация режимов котлов и турбин	Управление распределенной генерацией и накопителями

Дорожная карта развития ИИ предусматривает создание специализированных фреймворков для автоматического машинного обучения, включая библиотеку LAMA для задач на табличных и текстовых данных, фреймворк AutoTS для автоматизации задач временных рядов и платформу ML Space для создания и развертывания моделей машинного обучения из высокопроизводительной инфраструктуры. Эти инструменты могут быть адаптированы для задач энергомашиностроения, снижая барьер входа для инженеров-конструкторов и технологов при внедрении методов ИИ.

Методы в энергетике и энергосистемах.

Для прогнозирования нагрузки и выработки применяются:

- классические регрессионные модели с признаками календаря, погоды, состава потребителей;
- методы градиентного бустинга по деревьям решений;
- рекуррентные нейросети (LSTM, GRU) и архитектуры на основе трансформеров для многомасштабных временных рядов.

В задачах управления режимами энергосистемы и сетей используются:

- гибридные модели «физика + данные» для оптимального потокораспределения (OPF), где ИИ аппроксимирует часть расчетов или прогнозирует ограничения;
- графовые нейронные сети для учета топологии сети при оценке состояния и поиске оптимальных управляющих воздействий;
- методы обучения с подкреплением для формирования стратегий управления активами и сетевой конфигурацией в условиях неопределенности спроса и генерации.

Практическое применение данных методов в российской энергетике демонстрирует компания «Россети», которая внедрила системы на базе ИИ для прогнозного обслуживания, что позволило снизить количество технологических нарушений на 18% и сократить время восстановления энергоснабжения на 23% в пилотных регионах [157].

Требования к верификации и валидации ИИ-моделей.

Поскольку энергетические объекты относятся к критически важной инфраструктуре, к ИИ-моделям предъявляются повышенные требования по:

- объяснимости результатов (использование интерпретируемых признаков, методов SHAP/LIME, ограничение класса моделей в ответственных задачах);
- устойчивости к неполным и зашумленным данным, сбоям в телеметрии и измерениях;
- соответствию отраслевым нормативам и стандартам, включая требования к системам мониторинга и управлению технологическими процессами.

Валидация моделей включает:

- проверку на независимых тестовых выборках;
- кросс-валидацию на данных разных объектов и периодов эксплуатации;
- сопоставление результатов ИИ-моделей с физическими моделями и экспертными оценками;
- анализ критических сценариев и граничных случаев.

Формирование нормативной базы для безопасного применения технологий ИИ в энергетике поддерживается на государственном уровне: дорожной картой предусмотрена разработка и актуализация комплексов стандартов в сфере ИИ, а также участие России в международной стандартизации (не менее 111 стандартов к 2024 году). Создание научной базы для защищенных технологий и систем ИИ, применяемых в государственных информационных системах, осуществляет Академия криптографии.

9.3. Вызовы и ограничения применения ИИ в энергомашиностроении и энергетике.

Несмотря на растущее внедрение методов ИИ в энергомашиностроении и энергетике, существует ряд существенных вызовов, препятствующих более широкому разворачиванию этих технологий.

Качество и доступность данных остаются критическим фактором. Большинство энергетических объектов в России накапливали данные мониторинга без единого стандарта форматов, частоты дискретизации, методов обработки выбросов и пропусков. Исторические данные часто содержат систематические ошибки измерений, артефакты переходных режимов и недокументированные изменения конфигурации оборудования. Построение качественных обучающих наборов требует значительных затрат времени и экспертного труда, что замедляет внедрение решений ИИ-технологий на новых объектах.

Кибербезопасность и защита данных представляют возрастающие риски. Интеграция систем мониторинга и управления в единые цифровые платформы расширяет поверхность атаки. Требуется разработка специализированных подходов к шифрованию, аутентификации и аудиту в

контексте энергетических систем, что увеличивает стоимость и сложность развертывания.

Нормативно-правовое регулирование отстает от темпов технологического развития. Отсутствуют единые стандарты на метрики качества моделей ИИ, процедуры сертификации систем управления и требования к документированию решений, принятых автоматизированными системами. Это создает неопределенность при выборе поставщиков и обосновании инвестиций в ИИ-проекты перед регуляторами и акционерами.

Кадровое обеспечение остается узким местом. Число специалистов, обладающих одновременно глубокими знаниями в области энергомашиностроения и актуальными навыками в машинном обучении, искусственном интеллекте и цифровых платформах, остается ограниченным. Программы переподготовки и повышения квалификации развиваются медленнее, чем растет спрос на таких специалистов.

9.4. Перспективные направления развития ИИ в энергомашиностроении и энергетике.

При условии преодоления указанных вызовов развитие ИИ в энергетическом секторе будет происходить по нескольким взаимосвязанным направлениям.

Интеграция через цифровые двойники позволит создать единое цифровое представление энергетического объекта, включающее модели оборудования (геометрию, материалы, конструкцию), его поведение в различных режимах, данные мониторинга в реальном времени и модели предсказания деградации и отказов.

Цифровой двойник будет служить основой для оптимизации управления на протяжении всего жизненного цикла – от проектирования через производство и пусконаладку к эксплуатации и модернизации.

Развитие граничных вычислений и облачных архитектур (edge/cloud/fog computing) будет способствовать распределенной обработке данных мониторинга непосредственно на объектах, с передачей в облако только обобщенных результатов и выявленных аномалий. Это снижает задержки в принятии решений, уменьшает объемы передаваемых данных и повышает

защиту конфиденциальной информации.

Переход к энергетике с активным участием потребителей (Индустрия 5.0 и 6.0) предполагает, что модели ИИ будут учитывать не только техническое состояние оборудования и физические ограничения энергосистемы, но и социально-экономические факторы – предпочтения потребителей, возможность спроса, реагирующего на цены, роль аккумуляторных систем и распределенной генерации. Интеллектуальные системы управления спросом и предложением будут оптимизировать не только эффективность, но и надежность, экономику и социальную приемлемость энергетических решений.

Искусственный интеллект представляет собой одну из ключевых технологий цифровой трансформации энергомашиностроения и энергетики. Его применение охватывает весь жизненный цикл – от интеллектуального проектирования и оптимизации производства до мониторинга технического состояния, прогнозирования отказов и управления энергосистемой в целом.

Практические примеры внедрения (платформа APPEXLAB, развертывание систем мониторинга на российских энергетических объектах, интеграция ИИ в диспетчерские системы управления) показывают, что технологии уже переходят из разряда перспективных в разряд критически необходимых для повышения надежности, экономической эффективности и экологической устойчивости энергетического сектора.

Однако полная реализация потенциала ИИ требует системного решения проблем качества данных, кибербезопасности, нормативного регулирования и подготовки кадров.

Государственная поддержка (через дорожные карты развития ИИ, грантовое финансирование, создание специализированных центров компетенций) и координация действий энергетических компаний, машиностроителей и исследовательских учреждений будут определяющим фактором в преобразовании энергетического сектора России на основе интеллектуальных технологий.

При условии системного подхода к данным, нормативному обеспечению и развитию компетенций ИИ может стать одним из ключевых факторов

повышения эффективности, надежности и конкурентоспособности отечественного энергетического машиностроения.

Контрольные вопросы к главе 9

1. Дайте определение термину «Искусственный интеллект».
2. Расскажите о применении ИИ в энергомашиностроении и энергетике.
3. Какие ограничения применения ИИ в энергомашиностроении и энергетике сегодня существуют и почему?
4. Опишите перспективные направления развития ИИ в энергомашиностроении и энергетике.

ГЛАВА 10. ИНДУСТРИЯ 6.0: БЫТЬ ИЛИ НЕ БЫТЬ

Современная мировая экономика переживает период трансформации производственных систем. Заводы и фабрики используют цифровые технологии: компьютеры управляют станками, датчики следят за оборудованием, роботы работают вместе с людьми. Эти изменения называют четвертой промышленной революцией или Индустрией 4.0. Она создает основу для перехода к еще более современным способам производства [152, 158].

Количественные показатели подтверждают масштаб происходящих изменений. По данным Международной федерации робототехники (IFR), в 2023 году в мире функционировало свыше 4,28 млн промышленных роботов – на 10% по сравнению с предыдущим годом [159]. При этом установлено 541 тыс. новых роботизированных единиц, что свидетельствует о непрерывном наращивании автоматизации [159]. Географическое распределение демонстрирует следующее: 70% роботов установлено в Азии, 17% – в Европе, 10% – в Северной и Южной Америке [159]. Китай выступает безусловным лидером по абсолютному количеству установленных роботов (1,8 млн единиц), хотя по плотности роботизации на 10 000 рабочих (392 робота) страна уступает Южной Корее (1012), Сингапuru (730) и Германии (415) [159, 160]. На текущий момент ключевыми драйверами автоматизации выступают:

- технологии искусственного интеллекта и машинного обучения, обеспечивающие, в первую очередь, автономное принятие решений;
- промышленный интернет вещей (IIoT), создающий основу для непрерывного мониторинга и управления;
- периферийные вычисления (edge computing) и сети пятого поколения (5G), снижающие задержки при обработке критически важных данных;
- коллаборативные роботы (коботы), способные безопасно работать совместно с персоналом [161, 162].

Эти технологии формируют базис концепции «умных фабрик», характеризующихся высокой степенью цифровизации, гибкостью

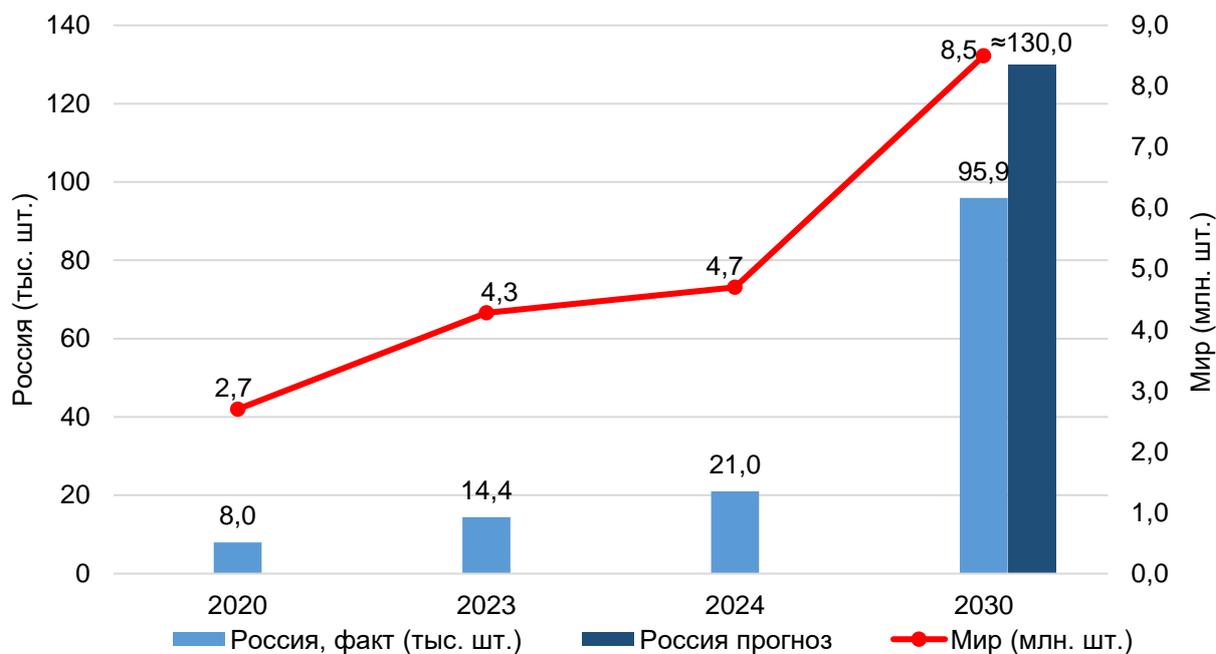
производственных процессов и способностью к массовой кастомизации продукции.

Стратегическое значение автоматизации для национальной конкурентоспособности признается ведущими странами мира. Германия реализует программу Industrie 4.0, направленную на создание киберфизических производственных систем; Китай осуществляет стратегию «Сделано в Китае 2025», нацеленную на технологическое лидерство; Япония развивает концепцию Society 5.0, интегрирующую цифровое и физическое пространства; США сосредоточены на промышленном интернете вещей и биоконвергенции [163, 164]. Европейский союз с 2021 года продвигает концепцию Индустрии 5.0, дополняющую технологический фокус 4.0 принципами человеко-ориентированности, устойчивости и отказоустойчивости [165].

Стратегический вектор развития отечественной промышленности и энергомашиностроения также неразрывно связан с глобальными трендами роботизации. Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 года № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» определена национальная цель «Технологическое лидерство». Для ее достижения поставлена конкретная задача: обеспечение вхождения к 2030 году Российской Федерации в число 25 ведущих стран мира по показателю плотности роботизации.

Реализация этой задачи требует кратного увеличения парка промышленных роботов на отечественных предприятиях. Это коррелирует с общемировой динамикой: согласно прогнозам, к 2030 году мировой эксплуатационный парк промышленных роботов продолжит рост и достигнет показателя 8,5 млн единиц.

Для России прогнозные значения к этому периоду оцениваются на уровне 130 тыс. единиц (рис. 10.1), что означает безальтернативность перехода отечественного энергомашиностроения к высокоавтоматизированному производству для сокращения технологического отставания.



Источник: Кепт, Коммерсантъ, IFR Robotics 2024

Рисунок 10.1 – Прогноз динамики парка промышленных роботов в России и мире до 2030 года

Для российского энергомашиностроения, как сектора с высокой наукоемкостью и длительными производственными циклами, освоение передовых технологий автоматизации является критическим условием сохранения конкурентоспособности. Анализ, проведенный в предыдущих главах настоящей работы, показал, что Россия является страной с «перспективным» уровнем цифрового развития и находится на 39 месте в мире. Поэтому важно понять, сможет ли наша отрасль перейти к Индустрии 5.0 и 6.0 – новым этапам развития производства.

10.1. Эволюция промышленных революций: от механизации к киберфизико-биологическим системам.

Исторический анализ промышленных революций показал последовательную трансформацию производственных систем: от механизации на основе паровых машин (Индустрия 1.0, конец XVIII – начало XIX веков) к массовому производству с использованием электричества и конвейерных линий (Индустрия 2.0, конец XIX – начало XX веков), затем к автоматизации на базе электроники и программируемых контроллеров (Индустрия 3.0, вторая половина XX века).

Индустрия 4.0, концепция которой была представлена в Германии в 2011 году, основана на киберфизических системах (CPS), интегрирующих физические процессы с цифровыми технологиями через интернет вещей, облачные вычисления, искусственный интеллект и цифровые двойники [166]. Ключевым отличием от предыдущих этапов является переход от автоматизации отдельных операций к созданию интеллектуальных производственных экосистем, способных к адаптации и самооптимизации.

Индустрия 5.0, концепция которой развивается Европейской комиссией с 2021 года, дополняет технологический фокус 4.0 акцентом на человеко-ориентированность, устойчивость и отказоустойчивость [165]. Центральной идеей выступает коллаборация человека и машины, где технологии дополняют, а не заменяют человеческие компетенции. Принципы включают персонализацию производства, минимизацию углеродного следа, циркулярную экономику и социальную ответственность [165].

Индустрия 6.0 – формирующаяся концепция, предполагающая интеграцию физических, цифровых и биологических систем с созданием автономных, самоорганизующихся, когнитивных производственных экосистем [167]. Отличительные черты включают: применение биотехнологий и биоматериалов в производственных процессах; системы с расширенным искусственным интеллектом, способные к самообучению и адаптации; нейроинтерфейсы для прямого взаимодействия человека и машины; автономные системы, способные к самодиагностике и самовосстановлению; замкнутый цикл производства (безотходный) [168]. Следует подчеркнуть, что данные концепции носят исследовательский и прогностический характер и обсуждаются преимущественно на уровне научных и экспертных сообществ.

10.2. Ключевые технологии Индустрии 6.0 применительно к энергомашиностроению.

Когнитивные цифровые двойники.

Развитие концепции цифровых двойников в парадигме Индустрии 6.0 приводит к созданию когнитивных систем, способных к автономному обучению, адаптации, прогнозированию и принятию решений [169]. Отличия

от традиционных цифровых двойников включают автоматическую калибровку моделей по данным эксплуатации без участия инженера, прогнозирование множественных вероятных сценариев развития, автоматическое формирование рекомендаций по режимам работы и обслуживанию, способность объяснять выводы в понятной форме [170].

Для турбины когнитивный цифровой двойник может анализировать данные мониторинга и автоматически обновлять параметры модели, прогнозировать сценарии деградации на горизонте до 5-10 лет, оптимизировать режимы работы в реальном времени, формировать планы технического обслуживания и обучаться на данных флота аналогичных объектов [170].

Биоинтеграция и биоматериалы.

Применительно к энергомашиностроению концепция киберфизико-биологических производственных систем (CPBS) может включать встроенные в конструкцию турбин биосенсоры, способные к самокалибровке и адаптации к экстремальным условиям; композиты с биологическими компонентами и самовосстанавливающиеся покрытия на основе принципов биологических тканей; проектирование конструкций, имитирующих структуры живой природы (биомиметика); разработку компонентов из материалов, допускающих биологическое разложение после завершения жизненного цикла [167, 170]. Необходимо отметить, что в настоящее время эти направления находятся на стадии фундаментальных исследований и лабораторных прототипов (уровень технологической готовности TRL 2-4), и для их промышленного применения потребуется значительный объем исследований и отработка нормативных требований [167].

Автономные производственные системы.

Производственная система должна быть способна к самоорганизации, самооптимизации, самодиагностике [171]. Применительно к предприятию по производству турбин это означает самоорганизующиеся производственные линии, где станки, роботы и транспортные системы автономно координируют работу через распределенную систему управления; адаптивное производство с быстрой реконфигурацией под изменение заказов; предиктивное

обслуживание производственного оборудования; автоматизированный контроль качества на каждой операции; интеграцию с цифровыми двойниками поставщиков и заказчиков [167, 171].

Технологическую основу составляют промышленный интернет вещей, периферийные вычисления, распределенные системы принятия решений [171].

10.3. Критическая оценка готовности российского энергомашиностроения.

Российское энергомашиностроение сталкивается с рядом вызовов на пути цифровизации. На предприятиях внедрены отдельные информационные системы (ERP, CAD, PLM), однако их интеграция остается неполной. Основные технологические барьеры включают зависимость от импортного программного обеспечения и оборудования, создающую риски в условиях санкций; дефицит специалистов, владеющих современными технологиями машинного обучения и работы с цифровыми двойниками; недостаточную цифровизацию производства на предприятиях, эксплуатирующих оборудование советских времен; низкий уровень унификации, препятствующий масштабированию цифровых решений; отсутствие централизованных баз данных эксплуатации оборудования [145].

Экономические и организационные барьеры связаны с высокими затратами на цифровизацию, длительным сроком окупаемости, организационным сопротивлением изменениям, фрагментацией отрасли и отсутствием единой стратегии цифровизации [148]. Нормативно-правовые барьеры включают отсутствие стандартов по цифровым двойникам в энергомашиностроении, применению ИИ для критического оборудования, неопределенность правового статуса решений, принимаемых системами искусственного интеллекта.

10.4. Мировой опыт и стратегические сценарии для России.

Германия, инициатор концепции Industrie 4.0, в 2023-2024 годах запустила исследовательскую программу Fraunhofer-Gesellschaft «Industrie 6.0 – Cyber-Physical-Biological Systems», сосредоточенную на интеграции

биотехнологий в производство, когнитивных производственных системах, симбиозе человека и машины, замкнутых производственных циклах [172]. Однако даже в Германии переход к 6.0 рассматривается как долгосрочная перспектива 2035-2040 годов [172]. США делают акцент на биоконвергенции – слиянии биологических, информационных и физических технологий, при этом агентство DARPA финансирует проекты по биогибридным системам [173]. Япония в рамках концепции Society 5.0 развивает массовую кастомизацию продукции, тесную коллаборацию людей и роботов, автономные самообучающиеся фабрики [174]. Китай в рамках стратегии «Сделано в Китае 2025» осуществляет массивные инвестиции в искусственный интеллект, робототехнику, промышленный интернет вещей [175].

Для России возможны три сценария развития. Пессимистический сценарий при отсутствии системных мер предполагает нарастание разрыва: к 2035-2040 годам, когда развитые страны начнут массовое внедрение технологий 6.0, Россия будет осваивать 4.0, что приведет к технологическому отставанию на 15-20 лет, потере внутреннего рынка, дефициту кадров.

Реалистический сценарий при реализации системных мер предполагает: 2026-2030 годы – завершение внедрения Индустрии 4.0 с массовым внедрением PLM, цифровых двойников, IoT; 2030-2035 годы – освоение Индустрии 5.0 с развитием человеко-роботной коллаборации; 2035-2045 годы – начало внедрения элементов Индустрии 6.0 с пилотными проектами когнитивных систем, биоматериалов; к 2045-2050 годам – масштабное применение 6.0, сокращение отставания до 5-10 лет.

Оптимистический сценарий предполагает технологический прорыв в отдельных направлениях на основе российских компетенций в математическом моделировании, квантовых технологиях, нейротехнологиях, биоматериалах, однако требует многократного увеличения финансирования НИОКР и системного подхода.

Для российского энергомашиностроения, находящегося на стадии освоения Индустрии 4.0, переход к Индустрии 6.0 представляет долгосрочную перспективу горизонта 20-25 лет. Ближайшие 5-10 лет должны быть

посвящены завершению внедрения технологий 4.0 и началу перехода к 5.0. Однако уже сейчас необходимо начинать подготовку к 6.0: проводить исследования, формировать компетенции, создавать научно-техническую основу. Игнорирование глобальных трендов автоматизации приведет к сильному отставанию и потере конкурентоспособности на мировом и внутреннем рынках.

Контрольные вопросы к главе 10

1. Что на текущий момент выступает ключевыми драйверами автоматизации промышленности.
2. Где и когда впервые была представлена Индустрия 4.0?
3. Расскажите о мировом опыте развития промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Култышев, А.Ю. Научное обоснование, разработка и реализация модульного принципа создания паровых турбин: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Култышев Алексей Юрьевич, 2023. – 435 с. – EDN DABHWO.
2. Култышев, А.Ю. Модульная конструкция и жизненный цикл турбоустановок / А.Ю. Култышев, Ю.К. Петреня. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – 331 с. – ISBN 978-5-7422-8690-5. – EDN PFTKGB.
3. Дорожная карта развития «Сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии». Москва, 2019. – 49 с.
4. Самые цифровые страны мира: рейтинг 2020 года. <https://hbr-russia.ru/innovatsii/trendy/853688/>.
5. Топ-10 стран с наиболее развитой цифровой экономикой. Web-payment.ru. [Электронный ресурс]. URL: <http://web-payment.ru/article/250/top-10-cifrovaya/>.
6. Паспорт национального проекта Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». https://digital.gov.ru/uploaded/files/natsionalnaya-programma-tsifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federatsii_NcN2nOO.pdf
7. Санникова Т.Д. Зарубежные модели цифровой трансформации и перспективы их использования в российской практике / Т.Д. Санникова, А.В. Богомолова, В.Н. Жигалова // Экономические отношения. – 2019. – Том 9. – № 2. – С. 481-494.
8. Индекс digital-развития 60 стран. Исследование. Rusability. [Электронный ресурс]. URL: <https://rusability.ru/research/indeks-digital-razvitiya-60-stran-issledovanie>.
9. Публичный аналитический доклад по развитию новых производственных технологий / Сколковский институт науки и технологий. – октябрь 2014. – 203 с.
10. Балахонова И.В. Оценка цифровой зрелости как первый шаг цифровой трансформации процессов промышленного предприятия: монография / И.В. Балахонова. – Пенза : Издательство ПГУ, 2021. – 276 с.

11. Arkan Caglayan Digital Transformation: Seven Steps to Success. How Businesses Can Stay Relevant and Competitive in Today's New Digital Era. URL: <https://info.microsoft.com/rs/157GQE-382/images/Digital%20transformation-%20seven%20steps%20to%20success.v2.pdf?aliId=860635945>.

12. Цифровая зрелость: Методология оценки цифровой зрелости организации <https://cpur.ru/wp-content/uploads/2020/10/Methodologiya-oczenki-cifrovoj-zrelosti-organizaczii.pdf>.

13. Айдель О.А. Оценка цифровой зрелости предприятия как первый шаг к цифровой трансформации. Стратегии бизнеса. 2021; 9(12): 369-370. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2021-12-369-370>

14. Попов Е. В. Уровни цифровой зрелости промышленного предприятия / Е.В. Попов, В.Л. Симонова, В.В. Черепанов // Journal of New Economy – 2021. – Т. 22. – № 2. – С. 88-109. DOI: 10.29141/2658-5081-2021-22-2-5.

15. Антохина Ю.А. Совершенствование экономического механизма управления информацией как фактор организационно-управленческой инновации промышленных предприятий в условиях цифровизации экономики / Ю.А. Антохина, А.М. Колесников, Е.М. Храповицкая // Актуальные проблемы экономики и управления. – 2018. – № 3 (19). – С. 45-48.

16. Гилева Т.А. Цифровая зрелость предприятия: Методы оценки и управления / Т.А. Гилева // Вестник УГПУ. Наука, образование, экономика: Серия экономика. – 2019. – № 1. – С. 38-52.

17. Industry 4.0 at McKinsey's Model Factories. Get Ready for the Disruptive Wave. McKinsey Digital. URL: https://capabilitycenter.mckinsey.com/files/downloads/2016/digital4.0modelfactoriesbrochure_0.pdf.

18. Digital Transformation – How to Become Digital Leader. Study 2015 Results. URL: http://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/ADL_HowtoBecomeDigitalLeader_02.pdf.

19. Шу Г., Андерл Р. Индекс зрелости Индустрии 4.0. Управление цифровым преобразованием Компаний. Исследование acatech – Национальная академия наук и техники Германии. 2018. URL: https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_rus_Maturity_Index_WEB.pdf 49. Eustace Bob, Lewkovitz Adam, Osman Joel [et al.]. Are You Ready for Digital

Transformation? Measuring Your Digital Business Aptitude. URL: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/pdf/2016/04/measuring-digital-businessaptitude.pdf>.

20. Кшесинский, Д.С. Совершенствование жизненного цикла паротурбинного оборудования / Д.С. Кшесинский, А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2024. – № 3(114). – С. 84-88. – EDN FHOZDT.

21. Кшесинский, Д.С. Внедрение и реализация модульных конструкций паровых турбин / Д.С. Кшесинский, А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2024. – № 6(117). – С. 62-67. – EDN EMMNOQ.

22. Култышев, А.Ю. Модульная конструкция паровых турбин / А.Ю. Култышев // Надежность и безопасность энергетики. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 167-175. – DOI 10.24223/1999-5555-2023-16-3-167-175. – EDN MNHYOA.

23. Култышев, А.Ю. Научное обоснование и разработка модульного принципа создания паротурбинной установки / А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2023. – № 1(106). – С. 42-47. – EDN KILCBO.

24. Култышев, А.Ю. Повышение технико-экономических показателей ПТУ: совершенствование монтажа, пусконаладки и эксплуатации / А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2023. – № 3(108). – С. 10-14. – EDN SEKUPA.

25. Култышев, А.Ю. Модульные подходы и алгоритмы при создании паровых турбин / А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2023. – № 4(109). – С. 84-91. – EDN ETTZYU.

26. Неуймин, В.М. Обновление принципов создания паровой турбины / В.М. Неуймин, А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2023. – № 5(110). – С. 26-31. – EDN ITBQPK.

27. Опыт разработки проектов паровых турбин с использованием унифицируемых модулей / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов // Теплоэнергетика. – 2014. – № 12. – С. 12. – DOI 10.1134/S0040363614120091. – EDN SYYZMB.

28. Опыт внедрения и использования программы Windchill на энергомашиностроительном предприятии / А. Ю. Култышев, А. А. Благодарев, А. В. Гладкий, Д. Н. Шантуров // Теплоэнергетика. – 2013. – № 8. – С. 32. – DOI 10.1134/S0040363613080067. – EDN QCXYNB.

29. САЕ-технологии инженерного анализа при проектировании паровых турбин ЗАО «Уральский турбинный завод» / В.Н. Голошумова, В.В. Кортенко, В.Л. Похорилер, А.Ю. Култышев, А.А. Ивановский // Теплоэнергетика. – 2008. – № 8. – С. 48-50. – EDN JWRIFN.

30. Култышев, А.Ю. Температурное и термонапряженное состояние ротора среднего давления турбины к-300-240-2 в составе дубль-блока при прогреве в процессе пуска по новой технологии / А.Ю. Култышев, В.Л. Похорилер, В.Н. Голошумова // Надежность и безопасность энергетики. – 2008. – № 1. – С. 47-50. – EDN KDSOMH.

31. Расчет тепловых перемещений для выбора зазоров в проточной части турбины Т-40/50-8,8 / Т.Ю. Линдер, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, Р.Р. Давлетбаев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 12. – С. 40-44. – EDN PFEYOR.

32. Линдер, Т.Ю. Расчет тепловых перемещений паровых турбин с использованием метода конечных элементов / Т.Ю. Линдер, М.Ю. Степанов, А.Ю. Култышев, // Материалы XXXVI Всероссийской конференции «Наука и Технологии», том 1, Миасс.: РАН. – 2016. – С. 127-138.

33. Култышев, А.Ю. Совершенствование режимов пуска турбины К-300-240-2 в составе энергоблока: специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Култышев Алексей Юрьевич. – Екатеринбург, 2007. – 24 с. – EDN NJKHPZ.

34. Модернизация выхлопного патрубка цилиндра низкого давления теплофикационной турбины Т-250/300-23,5 / В.Г. Солодов, А.А. Хандримайлов, А.Ю. Култышев, М.Ю. Степанов, А.А. Ямалтдинов // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – № 1(28). – С. 33-38. – EDN TNEKQR.

35. ОСТ 108.020.132-85. Нормы расчета на прочность корпусов цилиндров и клапанов. Утвержден и введен в действие указанием Министерства энергетического машиностроения от 12.06.1985 г. № СЧ-002/4742. – Л.: НПО ЦКТИ, 1985. – 32 с.

36. Баринберг, Г.Д. Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода: монография/ Г.Д. Баринберг, Ю.М. Бродов,

А.А. Гольдберг, Л.С. Иоффе, В.В. Кортенко, А.Ю. Култышев, В.Б. Новоселов, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, М.В. Шехтер, Т.Л. Шибает, А.А. Ямалтдинов. – Екатеринбург: под редакцией проф., д.т.н. Ю.М. Бродова и к.т.н. А.Ю. Култышева; 3-е изд., переработанное и дополненное. Априо. – 2017. – 540 с.

37. Теплофикационная турбоустановка с новой паровой турбиной Т-295/335-23,5 / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Т.Л. Шибает, А.А. Гольдберг, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, М.В. Шехтер, В.Н. Билан, Е.Н. Поляева // Теплоэнергетика. – 2016. – № 11. – С. 3-13. – DOI 10.1134/S0040363616110084. – EDN WLNICX.

38. Валамин, А.Е. Теплофикационная турбина Т-295/335-23,5 для реконструкции энергоблоков с турбинами Т-250/300-240/ А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Т.Л. Шибает, А.А. Гольдберг, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева, М.В. Шехтер, В.Н. Билан // Вестник НТУ «ХПИ». – 2016 г. – №8. – С. 37-45.

39. ГОСТ Р 57193-2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. Дата введения 31.10.2016 – М.: Стандартинформ, 2016. – 94 с.

40. ГОСТ Р 50.1.031-2001. Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Ч.1: Стадии жизненного цикла продукции. Дата введения 07.01.2002 – М. : Издательство стандартов, 2004. – 42 с.

41. ГОСТ ISO 9000-2011. Межгосударственный стандарт. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. Дата введения в действие Приказом Росстандарта от 22.12.2011. – М. : Стандартинформ, 2016. – 28 с.

42. Новые проекты ЗАО «Уральский турбинный завод» для реконструкции и модернизации основного паротурбинного оборудования ТЭЦ / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева // Компрессорная техника и пневматика. – 2011. – № 7. – С. 11. – EDN OJXVMF.

43. Баринберг, Г.Д. Приключенные паровые турбины ЗАО УТЗ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, Ю.А. Сахнин // Теплоэнергетика. – 2008. – № 8. – С. 34-40. – EDN JWRIEJ.

44. Особенности конструкции приключенной паровой турбины К-110-1,6 / А.Е. Валамин, А.А. Ивановский, М.Ю. Куклин, Т.Л. Шибает // Теплоэнергетика. – 2009. – № 9. – С. 24-29. – EDN KWEBTD.

45. Баринберг, Г.Д. Теплофикационная паровая турбина Т-113/145-12,4 для ПГУ-410 Краснодарской ТЭЦ/ Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.А. Гольдберг, А.А. Ивановский, А.Ю. Култышев, В.Б. Новоселов, Х.К. Панэке Агилера, Ю.А. Сахнин // Теплоэнергетика. – 2009. – № 9. – С. 15-23. – EDN KWEBST.

46. Баринберг, Г.Д. Теплофикационная паровая турбина Т-113/145-12,4 / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, Ю.А. Сахнин, А.А. Ивановский, А.Ю. Култышев, В.Б. Новоселов // Надежность и безопасность энергетики. – 2010. – № 4(11). – С. 38-41. – EDN NNFURV.

47. Паровые турбины для парогазовых установок мощностью 90-900 МВт / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, В.Б. Новоселов, В.Н. Билан, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 4-7. – EDN OPBBKN.

48. Валамин А.Е. Семейство теплофикационных турбин Т-100-12,8: вчера, сегодня, завтра / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Т.Л. Шибает, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов // Теплоэнергетика. – 2013. – № 8. – С. 21-26. – DOI 10.1134/S0040363613080158. – EDN QCSYMH.

49. Баринберг Г.Д. Паровые теплофикационные турбины ЗАО УТЗ Т-120/130-12,8 и ПТ-100/130-12,8/1,0 для замены турбин семейства Т-100 / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, Ю.А. Сахнин, А.Ю. Култышев // Теплоэнергетика. – 2011. – № 1. – С. 9-11. – EDN NDJEZZ.

50. Валамин А.Е. Теплофикационная паровая турбина Т-125/150-12,8 / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, А.А. Гольдберг, Ю.А. Сахнин, В.Н. Билан, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева, М.В. Шехтер, Т.Л. Шибает // Теплоэнергетика. – 2014. – № 12. – С. 3-11. – DOI 10.1134/S004036361412008X. – EDN SYYZLR.

51. Перминов, И.А. Диагностика состояния проточных частей мощных паровых турбин с применением стационарных вычислительных комплексов / И.А. Перминов, В.Г. Орлик, А.А. Гординский // Труды ЦКТИ. – 1992. – Вып. 273. – С. 58-61.

52. Орлик, В.Г. Диагностика пропариваний присосов и тепловых ударов в концевых уплотнениях паровых турбин / В.Г. Орлик, И.А. Оксман, И.А. Перминов, А.А. Гординский, Л.М. Дуэль // Труды ЦКТИ. – 1992. – Вып. 273. – С. 62-66.

53. Розенберг, С.Ш. Диагностика состояния радиальных зазоров в проточной части цилиндра в процессе эксплуатации / С.Ш. Розенберг, Л.А. Хоменок, А.А. Гординский, В.И. Ильин // Труды ЦКТИ. – 1992. – Вып. 273. – С. 67-76.

54. Зиле, А.З. Автоматизированная система вибрационного контроля и диагностики турбоагрегата Т-250/300-240 / А.З. Зиле, А.А. Ромашев, С.А. Лимар [и др.] // Электрические станции. – 1987. – № 3. – С. 23-26.

55. Зиле, А.З. Опыт внедрения системы вибродиагностического контроля турбоагрегатов / А.З. Зиле, М.Н. Руденко, С.Б. Томашевский, В.Г. Васильев, И.С. Храмов // Энергетик. – 1999. – № 3. – С. 21-23.

56. Ковалев, И.А. Разработка алгоритмов функционирования и распознавания дефектов для автоматической системы вибрационной диагностики / И.А. Ковалев // Труды ЦКТИ. – 1992. – Вып. 273. – С. 27-33.

57. Ковалев, И.А. Вибродиагностика турбины К-800-240-3 на основе штатной аппаратуры ВВК-331 / И.А. Ковалев, А.А. Болотова, А.А. Гординский [и др.] // Труды ЦКТИ. – 1994. – Вып. 279. – С. 59-64.

58. Урьев, Е.В. Концепция системы вибрационной диагностики паровой турбины / Е.В. Урьев, Б.Е. Мурманский, Ю.М. Бродов // Теплоэнергетика. – 1995. – № 4. – С. 36-40. – EDN WNFUKJ.

59. Урьев, Е.В. Проблемы создания систем технической диагностики турбоагрегатов / Е. В. Урьев, Ю.Н. Агапитова // Теплоэнергетика. – 2001. – № 11. – С. 24-28. – EDN XENFSV.

60. Актуальность и проблемы реализации мониторинга крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов на электростанциях / М.А. Биялт,

П.Е. Черненко, Е.В. Бочкарев [и др.] // Электрические станции. – 2013. – № 8(985). – С. 50-57. – EDN RBUKKB.

61. Назолин, А.Л. Диагностика целостности валопроводов мощных турбоагрегатов по крутильным колебаниям / А.Л. Назолин, В.И. Поляков, С. Г. Гнездилов // Теплоэнергетика. – 2020. – № 1. – С. 32-43. – DOI 10.1134/S0040363620010051. – EDN RADKJQ.

62. Диагностический контроль повреждений валопроводов турбоагрегатов по параметрам крутильных колебаний / Д.М. Попов, А.З. Зиле, Д.В. Тарадай, С.Б. Томашевский // Электрические станции. – 2020. – № 6(1067). – С. 35-40. – EDN YHKVPH.

63. Результаты исследований крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов / Д.В. Тарадай, Ю.А. Деомидова, А.З. Зиле, С.Б. Томашевский // Теплоэнергетика. – 2018. – № 1. – С. 23-33. – DOI 10.1134/S0040363618010071. – EDN ZVCVBJ.

64. Исследования крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов / А.З. Зиле, Д.В. Тарадай, С.Б. Томашевский, Ю.А. Шуранова // Электрические станции. – 2013. – № 10(987). – С. 40-48. – EDN RKRFFP.

65. Куменко, А.И. Системы мониторинга и диагностики технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС: состояние и предложения по совершенствованию / А.И. Куменко, А.С. Токаев // Энергетик. – 2020. – № 9. – С. 19-26. – EDN KKAHRF.

66. Куменко, А.И. Системы мониторинга и диагностики технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС. Состояние и предложения по совершенствованию (продолжение) / А.И. Куменко, А.С. Токаев // Энергетик. – 2020. – № 10. – С. 21-25. – EDN PKSAJA.

67. Золотарев, А.А. А. с. 394570 СССР. Способ контроля системы регулирования паровой турбины / А.А. Золотарев // Открытия. Изобретения. – 1973. – № 34.

68. Золотарев, А.А. Автоматизация эксплуатационного контроля работоспособности системы регулирования паровых турбин ТЭС и АЭС / А.А. Золотарев, Н.В. Ефимов // Атомные электрические станции. – 1983. – № 6. – С. 64-70.

69. Калашников, А.А. Некоторые вопросы развития автоматической диагностики систем регулирования турбоагрегатов / А.А. Калашников // Теплоэнергетика. – 1988. – № 10. – С. 25-28.

70. Авторское свидетельство № 605997 А1 СССР, МПК F01D 17/12. Устройство для контроля положения регулирующего клапана паровой турбины: № 2376856: заявл. 28.06.1976: опубл. 05.05.1978 / И.Л. Босаковский, Н.Ф. Белицкий, А.А. Кривошеев. – EDN KDUXXX.

71. Беликов, Н.В. Автоматизированная система для испытаний, контроля и диагностики паровых турбин всех типов / Н.В. Беликов, Ю.М. Занимонец, Е.Г. Козлов // Теплоэнергетика. – 2000. – № 11. – С. 39-41. – EDN XWSLSR.

72. Новоселов, В.Б. О диагностике системы регулирования и защиты паровой турбины на современном этапе / В.Б. Новоселов, Б.Е. Мурманский, В.В. Лебедев // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 69-74. – EDN OPVBPД.

73. Обеспечение надежности автоматической системы регулирования и защиты паровой турбины / С.А. Наумов, А.С. Наумов, Д.П. Швецов, А.В. Крымский // Теплоэнергетика. – 2011. – № 1. – С. 62-69. – EDN NDJFDV.

74. Кляйнрок, И.Ю. Алгоритмы самодиагностики современных систем регулирования и парораспределения паровых турбин / И.Ю. Кляйнрок, М.В. Шехтер, В.Б. Новоселов // Электрические станции. – 2024. – № 12(1121). – С. 50-54. – DOI 10.71841/EP.ELST.2024.1121.12.07. – EDN QMRGWW.

75. Сосновский, А.Ю. О недостаточности оснащения паровых турбин приборами контроля для диагностики системы тепловых расширений / А.Ю. Сосновский, Б.Е. Мурманский, Ю.М. Бродов // Энергетик. – 2018. – № 8. – С. 8-10.

76. Мурманский, Б.Е. Разработка модуля для мониторинга и диагностики состояния системы тепловых расширений паровых турбин в составе современных АСУ ТП / Б.Е. Мурманский, А.Ю. Сосновский, Ю.М. Бродов // Энергетик. – 2015. – № 4. – С. 51-53. – EDN TQСJWV.

77. Сосновский, А.Ю. Влияние зазоров в соединениях элементов системы тепловых расширений на надежность работы многоцилиндровой

паровой турбины / А.Ю. Сосновский, Б.Е. Мурманский, Ю.М. Бродов // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 60-66. – DOI 10.24223/1999-5555-2017-10-1-60-66. – EDN YISMCZ.

78. Нормализация тепловых расширений теплофикационных турбин на Омской ТЭЦ-5 / С.Н. Моденов, Б.Е. Мурманский, Ю.М. Бродов [и др.] // Электрические станции. – 2010. – № 8. – С. 47-51. – EDN MUWFDH.

79. Дон, Э.А. Система диагностики температурных расширений турбоагрегатов / Э.А. Дон, Д.В. Тарадай, К.Е. Буглаев // Электрические станции. – 2012. – № 9(974). – С. 42-47. – EDN PIVUYB.

80. Буглаев, К.Е. Применение системы СДАРТ для диагностики температурных расширений турбоагрегатов / К.Е. Буглаев, Э.А. Дон, Д.В. Тарадай // Теплоэнергетика. – 2005. – № 6. – С. 23-28. – EDN HSCCAZ.

81. Бродов, Ю.М. Концепция системы диагностики конденсационной установки паровой турбины / Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон, М.А. Ниренштейн // Теплоэнергетика. – 1997. – № 7. – С. 34-38. – EDN WKRPZF.

82. Разработка и апробация элементов системы мониторинга состояния и диагностики конденсатора паровой турбины / С.И. Хае́т, К.Э. Аронсон, Ю.М. Бродов, А.Г. Шемпелев // Теплоэнергетика. – 2003. – № 7. – С. 67-69. – EDN PHITUP.

83. Бродов, Ю.М. Подогреватели сетевой воды в системах теплоснабжения ТЭС и АЭС / Ю.М. Бродов, В.И. Великович, М.А. Ниренштейн, К.Э. Аронсон, А.Ю. Рябчиков // Екатеринбург: УГТУ. – 1999. – 138 с.

84. Бродов, Ю.М. Теплообменные аппараты в системах регенеративного подогрева питательной воды паротрубных установок / Ю.М. Бродов, М.А. Ниренштейн, К.Э. Аронсон, А.Ю. Рябчиков // Екатеринбург: УГТУ. – 1998. – 192 с.

85. Баран, Л.С. Разработка системы комплексной технической диагностики конденсационной установки турбины К-800-240-3 / Л.С. Баран // Труды ЦКТИ. – 1994. – Вып. 279. – С. 40-51.

86. Лейзерович, А.Ш. Задачи технической диагностики теплоэнергетического оборудования / А.Ш. Лейзерович, В.Б. Рубин //

Электрические станции. – 1987. – № 3. – С.11-13.

87. Лейзерович, А.Ш. Концепция оперативной технической диагностики тепломеханического оборудования энергоблоков ТЭС / А. Ш. Лейзерович // Электрические станции. – 1991. – № 7. – С. 28-31.

88. Лейзерович, А.Ш. Разработка стандарта по приспособленности тепломеханического оборудования энергоблоков ТЭС к диагностированию / А.Ш. Лейзерович, Г.К. Сорокин // Теплоэнергетика. – 1993. – № 5. – С. 62-64. – EDN VYVELG.

89. Сафонов, Л.П. Разработка и внедрение системы функционирования АСТД в составе АСУТП энергоблока 800 МВт Запорожской ГРЭС. / Л.П. Сафонов, А.М. Журавель, В.К. Литвинов [и др.] // Труды ЦКТИ. – 1994. – Вып. 279. – С. 10-15.

90. Гординский, А.А. Функционально-алгоритмическая структура автоматизированной системы технического диагностирования оборудования энергоблоков ТЭС / А.А. Гординский, Е.Г. Попов, А.М. Журавель // Труды ЦКТИ. – 1994. – Вып. 279. – С. 20-23.

91. Хоменок, Л.А. Повышение эффективности эксплуатации паротурбинных установок ТЭС и АЭС. Том 2. Диагностика паровых турбин. СПб.: Изд. ПЭИпк. – 2002. 264 с.

92. Ковалев, И.А. Комплексная диагностика как необходимое средство обеспечения эксплуатационной надежности турбоагрегатов / И.А. Ковалев, Н.Ю. Исаков, В.В. Божко // Теплоэнергетика. – 2012. – № 3. – С. 12. – EDN OOWNAB.

93. Аронсон, К.Э. Разработка системы мониторинга технического состояния оборудования теплофикационной паротурбинной установки / К.Э. Аронсон, Ю.М. Бродов, В.Б. Новоселов // Теплоэнергетика. – 2012. – № 12. – С. 65. – EDN PFEYQF.

94. Ляпин, А.Г. Комплексный подход к диагностике и оценке технического состояния энергетического оборудования / А.Г. Ляпин, Б.Г. Певчев, А.А. Пимошин // Электрические станции. – 2005. – № 8. – С. 64-67. – EDN JWRLMD.

95. Гординский, А.А. О мониторинге паротурбинных установок /

А.А. Гординский, Я.Д. Беркович, Л.А. Левин // Электрические станции. – 2010. – № 12. – С. 15-20. – EDN NCUTLJ.

96. Хренников, А.Ю. Принципы построения систем искусственного интеллекта и их применение в электроэнергетике / А.Ю. Хренников, А.Ю. Хренников, Ю.Я. Любарский // Энергетик. – 2022. – № 3. – С. 22-30. – EDN QLTWDM.

97. Немирович-Скрабатун, Д.Н. Опыт создания системы автоматического распознавания аномалий в работе энергетического оборудования / Д.Н. Немирович-Скрабатун, А.А. Персяев // Электрические станции. – 2022. – № 1(1086). – С. 49-56. – EDN WBEGQL.

98. Ратнер, С.В. Анализ мирового опыта реализации проектов по развертыванию интеллектуальных сетей: вопросы экономической эффективности / С.В. Ратнер, Р.М. Нижегородцев // Теплоэнергетика. – 2018. – № 6. – С. 68-83. – DOI 10.1134/S0040363618060097. – EDN XNLOST.

99. Шабунин, А.С. Нейросетевые модели технологического оборудования в системе мониторинга и предиктивной аналитики / А.С. Шабунин, М.Ю. Чернецкий, Р.В. Осиповский // Электрические станции. – 2023. – № 11(1108). – С. 50-57. – DOI 10.34831/EP.2023.1108.11.007. – EDN BPMKTG.

100. Ивановский, А.А. Системы мониторинга и диагностики энергетического оборудования с применением нейросетевых технологий / А.А. Ивановский, Н.Г. Балашенко, В.С. Карелин // Энергетик. – 2023. – № 12. – С. 19-22. – EDN LVKAZK.

101. Коршикова, А.А. Вероятностная оценка результата работы модели раннего обнаружения аварийных ситуаций на оборудовании электростанций на основе метода наименьших потенциалов / А.А. Коршикова, О.М. Идзон // Теплоэнергетика. – 2023. – № 1. – С. 50-57. – DOI 10.56304/0040363623010022. – EDN ZBQHTJ.

102. Коршикова, А.А. Модель раннего обнаружения аварийных ситуаций на оборудовании электростанций на основе метода наименьших потенциалов / А.А. Коршикова, О.М. Идзон // Теплоэнергетика. – 2021. – № 10. – С. 37-44. – DOI 10.1134/S0040363621090034. – EDN TVLLHN.

103. Коршикова, А.А. Модель раннего обнаружения аварийных ситуаций на оборудовании электростанций на основе методов машинного обучения / А.А. Коршикова, А.Г. Трофимов // Теплоэнергетика. – 2019. – № 3. – С. 49-56. – DOI 10.1134/S0040363619030044. – EDN YVCLNB.

104. Опыт использования удаленного доступа и предсказательной аналитики состояния энергетического оборудования / С.А. Наумов, А.В. Крымский, М.А. Липатов, Д.Н. Скрабатун // Теплоэнергетика. – 2018. – № 4. – С. 21-33. – DOI 10.1134/S0040363618040057. – EDN YPHRLA.

105. Павлов, А.Ю. Предиктивная диагностика оборудования парогазовых энергоблоков с применением цифровых решений «Сименс Энергетика» / А.Ю. Павлов, О.В. Гареев, В.А. Галкин // Турбины и дизели. – 2020. – № 5(92). – С. 4-13. – EDN SDLQWL.

106. Куменко, А.И. Системы мониторинга и диагностики технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС. О противоречиях в нормативной базе / А.И. Куменко // Энергетик. – 2020. – № 8. – С. 32-37. – EDN YBFHKQ.

107. Тарадай, Д.В. Техническая диагностика и наладка паровых турбоагрегатов / Д.В. Тарадай // Электрические станции. – 2020. – № 3(1064). – С. 33-38. – EDN GQDGGX.

108. О вибрационном контроле и диагностике дефектов, проявляющихся на частоте вращения валопровода турбоагрегата / А.З. Зиле, Д.В. Тарадай, С.Б. Томашевский, Д.М. Попов // Энергетик. – 2021. – № 7. – С. 16-20. – EDN VIDUDD.

109. Шкляр, М.И. Некоторые особенности диагностики и наладки турбоагрегатов / М.И. Шкляр, А.М. Миронов, А.И. Куменко // Энергетик. – 2023. – № 1. – С. 40-45. – EDN LAHENS.

110. Костюк, А.Г. Оценка виброактивности двухпролетного ротора при выбеге, вызванной его первоначальной погнутостью и остаточным дисбалансом / А.Г. Костюк, О.А. Волоховская // Теплоэнергетика. – 2017. – № 1. – С. 45-54. – DOI 10.1134/S0040363617010040. – EDN XGWCIN.

111. Куменко, А.И. Автоколебания и субгармонические вибрации. Часть 1. Причины возникновения низкочастотной вибрации / А.И. Куменко // Энергетик. – 2021. – № 8. – С. 20-32. – EDN ARYEUL.

112. Байдакова, Н.В. Разработка алгоритма реализации ремонтной программы паровых котлов и турбин ТЭС по техническому состоянию энергетического оборудования / Н.В. Байдакова, А.В. Афонин, А.В. Благодичиннов // Надежность и безопасность энергетики. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 40-44. – DOI 10.24223/1999-5555-2021-14-1-40-44. – EDN UVNMBO.

113. Разработка алгоритма реализации ремонтной программы генерирующего оборудования на энергетических предприятиях по техническому состоянию / Н.В. Байдакова, А.В. Афонин, Д.Ш. Норов, А.А. Смирнов // Надежность и безопасность энергетики. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 157-164. – DOI 10.24223/1999-5555-2021-14-4-157-164. – EDN URIWPI.

114. Ковалев, И.А. Комплексная диагностика как необходимое средство обеспечения эксплуатационной надежности турбоагрегатов / И.А. Ковалев, Н.Ю. Исаков, В.В. Божко // Теплоэнергетика. – 2012. – № 3. – С. 12. – EDN OOWNAB.

115. Развитие и совершенствование систем эксплуатационной диагностики производства ОАО НПО ЦКТИ для турбоагрегатов ТЭС и АЭС / И.А. Ковалев, В.Г. Раковский, Н.Ю. Исаков, А.В. Сандовский // Теплоэнергетика. – 2016. – № 3. – С. 15-20. – DOI 10.1134/S0040363616030048. – EDN VPYBMB.

116. Гвоздев, В.М. Опыт эксплуатации системы диагностики рабочих лопаток ЦНД турбины К-210 ст. №2 Шатурской ГРЭС-5 / В.М. Гвоздев, А.И. Поляков, Н.Ю. Исаков, Э.С. Мандрыка // Электрические станции. – 2001. – № 8. – С. 16-18.

117. Патент № 2186260 С1 Российская Федерация, МПК F04D 29/24, F01D 5/12. способ диагностирования повреждений рабочих лопаток турбомашин: № 2001104396/06: заявл. 09.02.2001: опубл. 27.07.2002 / Н.Ю. Исаков, Э.С. Мандрыка, А.В. Сандовский; заявитель Акционерное общество открытого типа «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И.Ползунова». – EDN QUJGBH.

118. Expert system, flexible software maintain high performance levels at powerplant /Elliot Tom // Power, 1989. 133, N9. P.95-97.

119. Condition monitoring and analysis techniques for predictive maintenance of rotating machinery. Chhaya H.M. "National Symposium Vibration Power Plant Equipment, Bombay, March 19-21, 1986". Bombay: 1986, IV 13/1-IV 17/26.

120. Imminent failure detected by refined techniques/Brown D.N.//Mog. Power System, 1989. 9, N5, p. 91-95.

121. A Knowledge-based System for Vibration Monitoring in Turbogenerator Machinery: // /Pap./ Austral. Vibr. and Noise Conf. "Vibr. and Noise-Meas. Predict. and Contr.", Melbourne 18-20 Sept., 1990: Prepr. Pap. / Anvar A.M., Masood S.H. //Nat. Conf. Publ./ Inst. Eng., Austral. 1990. N9. P. 222-226.

122. Ein Expertensystem zur Zustandsdiagnose an Dampfturbinen /Witsdorff von. P//VGB Kraftwerkstechn. 1991. 71, N5. p. 426-430.

123. Bongiovì, A. A practical approach for vibration monitoring expert system - (First part: Algorithm description) / Bongiovì, A., Picerno, S., Barabino, M // (Conference Paper 11th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, CM 2014 / United Kingdom; 10 June 2014 through 12 June 2014.

124. De Michelis, C.a Condition monitoring and assessment of power plant components/De Michelis, C.a, Rinaldi, C.b, Sampietri, C.c, Vario, R.a// Power Plant Life Management and Performance Improvement, 2011, P. 38-10.

125. Nagel, C. Steam Turbine Condition Monitoring (TCM)/ Nagel, C. // Proceedings of the ASME Power Conference - San Antonio, TX; United States; 17 July 2007 through 19 July 2007, 2007. P. 327-334.

126. Expert system for wear failure prediction /Holmberg K., Kuoppala R., Vuoti A. //Proc. 5th Int. Cong. Tribol., Espoo, June 15, 1989: Eurotrib 89.Vol. 4. Espoo, 1989. p. 32-37.

127. Choosing a vibration diagnostic system //Noise and Vibr. Worldwide. 1990. N Apr. p. 24-25.

128. Centralized diagnostics uses artificial intelligence. Osborne R.L. "Mod. Power Syst.", 1987, 7, N2, p. 53-57.

129. Application of an expert system to rotating machinery health monitoring /Hill J.W., Baines N.C. // Vibr. Rotat. Mach.: Int. Conf., Edinburgh. 13-15 Sept.,

1988: Proc Inst. Mech. Eng. London: 1988. P. 449-454.

130. New methode for vibration monitoring of turbo-machines. Schramm G. "Proc.8th Conf. Fluid Mach. Vol. 2". Budapest, 1987, p. 657-664.

131. Babson P. Using vibration analysis for machinery maintenance planning. -SME Techn. Pap., 1983, N 880, 11 pp.

132. Expert systems for maitenance. Bose Partha Protim "Amer. Mach. and Autom Manuf.", 1988. 132, N6. p. 52-54.

133. The application of the expert system in condition monitoring /Ilyin V. //Proc. 5th Int. Cong. Tribol., Espoo, June 15, 1989: Eurotrib 89. Vol. 4. Espoo, 1989. P. 38-41.

134. Vibration Diagnostic Expert System for Steam Turbines /Yasuda Chiaki, Tanimura Tatsuo, Ito Ryoji, Kita Chicato //Mitsubishi Heavy Ind. Techn. Rev.. 1991. 28, N3. P. 180-187.

135. Modern vibration analysis in condition monitoring. Baines Neil. "Noise and Vibr. Contr. Worldwide", 1987. 18, N5. p. 148-151.

136. Vibration monitoring apparatus. Tanigyti Ryousuke; Mitsubishi Denki K.K. Pat. N4683542, USA.

137. Kontinuierliche diagnostische Zustandsuberwachung von Turbogruppen. Lindberg G., Fessler P., Jucker B. VGB Kraftwerkstechn, 1988. 68, N6, p. 592-597.

138. Compact monitoring system for turbomachinery. "Turbomachinery International", 1986. N7, p. 50.

139. Лейзерович, А.Ш. Первый опыт создания экспертных систем для тепловых электростанций / А.Ш. Лейзерович // Энергохозяйство за рубежом. – 1990. – № 5. – С. 1-7.

140. Немирович-Скрабатун, Д.Н. Анализ систем диагностики и прогностики технического состояния турбомашин и разработка рекомендаций по подготовке данных для построения статистических моделей работы турбомашин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Немирович-Скрабатун Дарья Николаевна, 2023. – 108 с. – EDN OEWUUF.

141. Гуринович В.Д. О концепции обсаживания и ремонта элементов

атомных электростанций / В.Д. Гуринович, Ю.А. Янченко, С.А. Ткачук // Электрические станции. – 2017. – № 10. – С. 2-8.

142. Концепция перехода на ремонт турбогенераторов электростанций по техническому состоянию / Л.Г. Мамиконянц, В.М. Надточий, Ю.Н. Самородов [и др.] // Электрические станции. – 2005. – № 9. – С. 46-51. – EDN JWRLTL.

143. Мурманский, Б.Е. Разработка, апробация и реализация методов повышения надежности и совершенствования системы ремонтов паротурбинных установок в условиях эксплуатации: специальность 05.04.12 «Турбомашин и комбинированные турбоустановки»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Мурманский Борис Ефимович. – Екатеринбург, 2015. – 22 с. – EDN ZPSDYT.

144. В Госдуме сформулировали определение искусственного интеллекта // РБК. – 2025. – 4 сентября. – URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/04/09/2025/68b8eec99a79477a1859ed11 (дата обращения: 10.01.2026).

145. Юдин, Р.О. Анализ современных подходов к проектированию энергетического оборудования / Р.О. Юдин, А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2025. – № 6(123). – С. 100-107. – EDN XUIFNA.

146. APPEXLAB – платформа интеллектуального мониторинга энергетического оборудования / М. А. Биялт, Е. В. Бочкарев, И. В. Урусов, Д.С. Кшесинский, А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2024. – № 4(115). – С. 108-113. – EDN CRWKIU.

147. Как в России потратят 145 млрд рублей на развитие технологий искусственного интеллекта // CNews: [сайт]. 2024. 2 февраля. URL: https://www.cnews.ru/articles/2024-02-02_kak_v_rossii_potratyat_145_mlrdrublej (дата обращения: 10.01.2026).

148. Алешина, А.С. Современные тенденции и решения при строительстве и реконструкции энергетических объектов в РФ / А.С. Алешина, Р.О. Юдин, А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2025. – № 6(123). – С. 62-69. – EDN DMWAVW.

149. Двигателестроение 4.0. Промышленная платформа как ускоритель

цифровизации // ОДК. Канал об авиационном двигателестроении. – Дзен. – 2023. – 28 апр.

150. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: указ Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731> (дата обращения: 10.01.2026).

151. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Нейротехнологии и искусственный интеллект» : утв. Правительством РФ // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019ii.pdf> (дата обращения: 10.01.2026).

152. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / Ред. А. Боровков. М.: ООО «Альянс Принт». – 2020. – 401 с.

153. Дмитриев В.М., Гембух Л.А., Сахабутдинов А.Е. Цифровые двойники: учебное пособие. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2024. – 88 с.

154. Мурманский, Б.Е. Оценка интерфейсов систем диагностики и мониторинга энергетического оборудования по методике предварительного анализа удобства использования / Б.Е. Мурманский, А.Н. Сергеев // Турбины и дизели. – 2024. – № 6(117). – С. 112-118. – EDN VINHDZW.

155. Курбангалиева Д.Л., Курбангалиев Т.Р., Усманов Р.Р., Яхин Ш.Р. Интеграция методов машинного обучения в электроэнергетическом секторе для снижения коммерческих потерь: обзор практики в сетевой организации // Бизнес-информатика. – 2025. – Т. 19. – № 4. – С. 68-87. – DOI: 10.17323/2587-814X.2025.4.68.87.

156. Минэнерго России // Telegram: [социальная сеть]. 2025. URL: https://t.me/minenergo_official/4817 (дата обращения: 14.01.2026).

157. Искусственный интеллект прокачивает энергетику // Коммерсантъ: [сайт]. 2025. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/8161430> (дата обращения: 10.01.2026).

158. Прохоров А., Коник Л. Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт. 2-е изд. М.: ООО «Альянс Принт». – 2019. – 368 с.

159. International Federation of Robotics. World Robotics Report 2024. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-of-4-million-robots-working-in-factories-worldwide> (дата обращения: 10.01.2026).

160. Тренды промышленной автоматизации в 2025 году // Дзен. 2025. 31 марта. URL: (дата обращения: 10.01.2026).

161. Top 10 Trends Shaping the Future of Industry 4.0 // ICL Group. 2025. 25 января. URL: <https://www.icl-group.com/blog/top-industry4-0-trends-shaping-the-future-of-industry/> (дата обращения: 10.01.2026).

162. 8 Key Industrial Automation Trends in 2025 // Rockwell Automation. 2025. 24 февраля. URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/the-journal/8-key-industrial-automation-trends-in-2025.html> (дата обращения: 14.01.2026).

163. Петреня, Ю.К. По законам экономики и физики. Стимул. Онлайн – журнал об инновациях, 2018, https://stimul.online/articles/interview/по-законам-экономики-и-физики/?sphrase_id=3051.

164. Тренды автоматизации 2025: перспективные технологии для бизнеса // Twin24.ai. 2025. 22 апреля. URL: <https://twin24.ai/company/articles/trendy-avtomatizaczii-biznesa-v-2025/> (дата обращения: 10.01.2026).

165. European Commission. Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021.

166. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Frankfurt am Main: Forschungsunion, 2013.

167. Бабкин, А.В. Индустрия 6.0: сущность, тенденции и стратегические императивы // Экономика в промышленности. – 2024. – Т. 17. № 4. – С. 512-535. – DOI: 10.17073/2072-1633-2024-4-512-535.

168. Lasi H., Fettke P., Kemper H.-G., et al. Industry 4.0 // Business & Information Systems Engineering. – 2014. – Vol. 6. – No. 4. – P. 239-242.

169. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Cham: Springer. – 2017. – P. 85-113.

170. Vincent J. F. V. Biomimetics: A Review // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. – 2009. – Vol. 223. – No. 8. – P. 919-939.

171. Koren Y., Gu X., Guo W. Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 13. – No. 2. – P. 121-136.

172. Fraunhofer-Gesellschaft. Industrie 6.0 Research Program. URL: <https://www.fraunhofer.de> (дата обращения: 10.01.2026).

173. DARPA Biological Technologies Office. Programs Overview. URL: <https://www.darpa.mil/about-us/offices/bto> (дата обращения: 10.01.2026).

174. Government of Japan. Society 5.0. URL: https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5_0/ (дата обращения: 10.01.2026).

175. State Council of the People's Republic of China. Made in China 2025. Beijing, 2015.

Вашему вниманию другие книги серии изданий

«Формула турбин»



Газоперекачивающий агрегат ГПА-32 «Ладoga»



Паровые турбины в составе паросиловых и парогазовых установок



Модульная конструкция и жизненный цикл турбоустановок



Специальные вопросы эксплуатации и режимы работы энергоблоков тепловых электрических станций



Турбоустановка с паровой турбиной Т-295/335-23,5 и ее модификации



Парогазовые установки и особенности паровых и газовых турбин для ПГУ

Серия книг «Формула турбин» становится хорошей традицией сотрудничества экспертов, ученых, преподавателей, конструкторов, технологов и специалистов, которые становятся авторами, редакторами и рецензентами изданий и представляют различные профильные организации в сферах энергомашиностроения, нефтегазовой, образования и научно-технической:

- Газпром;
- Газпром энергохолдинг промышленные активы;
- Силовые машины;
- Уральский турбинный завод;
- Невский завод;
- ТурбоСервис Рус;
- Ротек Компоненты и Материалы;
- Центральный котлотурбинный институт;
- Уральский федеральный университет;
- Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;
- Московский энергетический институт.

Парогазовые установки и особенности паровых и газовых турбин для ПГУ: учеб. пособие / А.Ю. Култышев, В.Н. Голошумова, А.С. Алешина; под общ. ред. д.т.н. А.Ю. Култышева. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2026. – 180 с. – (Серия научно-технических изданий «Формула турбин»).

Авторы: Култышев А.Ю. (д.т.н.), Голошумова В.Н. (к.т.н.), Алешина А.С. (к.т.н.).

Рецензенты:

В.Е. Михайлов, д.т.н., профессор, генеральный директор ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»);

А.А. Ивановский, к.т.н., генеральный конструктор АО «Силовые машины».

В учебном пособии системным образом подробно рассмотрены вопросы по парогазовым установкам, особенностям конструкции оборудования в составе энергоблоков. Отдельное внимание уделено вопросам эксплуатации основного турбинного оборудования ТЭС и надежности его эксплуатации в переходных режимах с учетом особенностей процессов прогрева и остывания, протекающих в элементах турбин и турбоустановок, обуславливающих возникновение дополнительных факторов, снижающих надежность оборудования.

Структура издания позволяет его использовать как основу курсов лекций по дисциплинам «Парогазовые установки», «Энергетические блоки» и «Эксплуатация и надежность энергетического оборудования тепловых электрических станций» для студентов и аспирантов энергомашиностроительных и энергетических специальностей.

Настоящее учебное пособие дорабатывается и перевыпускается уже в третий раз – в 2010 году, в 2022 году и теперь в 2026 году. Издание является крайне востребованным среди студентов сразу нескольких вузов, так как предельно емко отражает содержание по основным вопросам, представленным в пособии в формате глав-лекций.

Турбоустановка с паровой турбиной Т-295/335-23,5 и ее модификации: учебное пособие / В.Г. Грибин, А.А. Гольдберг, И.В. Кадкина, И.Ю. Кляйнрок, А.Ю. Култышев, М.Ю. Степанов, М.В. Шехтер; под ред. д.т.н. А.Ю. Култышева – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 255 с. – (Серия научно-технических изданий «Формула турбин»).

Авторы: Грибин В.Г. (д.т.н.), Гольдберг А.А., Кадкина И.В., Кляйнрок И.Ю. (к.т.н.), Култышев А.Ю. (д.т.н.), Степанов М.Ю., Шехтер М.В.

Рецензенты:

В.Е. Михайлов, д.т.н., профессор, генеральный директор ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»);

А.Н. Рогалев, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Инновационных технологий наукоемких отраслей» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

В издании рассмотрена паротурбинная теплофикационная установка с турбиной Т-295/335-23,5, головной образец которой установлен на ТЭЦ-22 «Мосэнерго», схемные и компоновочные решения, а также основные особенности паротурбинной установки, предназначенной для замены выработавших свой ресурс ПТУ с турбинами Т-250/300-240, установленными в крупных городах для выработки электрической и тепловой энергии.

Дополнительно представлены основные решения по электрогидравлической системе автоматического регулирования и защиты с использованием технологии высокого давления. Структура книги позволяет ее использовать как основу курсов лекций по дисциплинам «Энергетические блоки» и «Эксплуатация и надежность энергетического оборудования тепловых электрических станций» для студентов и аспирантов энергомашиностроительных и энергетических специальностей.

Специальные вопросы эксплуатации и режимы работы энергоблоков тепловых электрических станций: учебное пособие / А.С. Алешина, В.Н. Голошумова, А.А. Ивановский, И.Ю. Кляйнрок, А.Ю. Култышев, М.Ю. Степанов, О.В. Шевченко – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 180 с. – (Серия научно-технических изданий «Формула турбин»).

Авторы: Алешина А.С. (к.т.н), Голошумова В.Н. (к.т.н.), Ивановский А.А. (к.т.н), Кляйнрок И.Ю. (к.т.н), Култышев А.Ю. (д.т.н.), Степанов М.Ю., Шевченко О.В.

Рецензенты:

В.Е. Михайлов, д.т.н., профессор, генеральный директор ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»);

В.Г. Грибин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Паровые и газовые турбины» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

В учебном пособии системным образом рассмотрены специальные вопросы эксплуатации и режимов работы энергоблоков тепловых электрических станций. Отдельное внимание уделено вопросам маневренности основного турбинного оборудования ТЭС и надежности его эксплуатации в переходных режимах с учетом особенностей процессов прогрева и остывания протекающих в элементах турбин и турбоустановок, обуславливающих возникновение дополнительных факторов, снижающих надежность оборудования.

В пособии отдельно раскрыты вопросы автоматизации пусковых режимов работы паровых турбин, особенности работы энергоблоков при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии, а также диаграммы режимов паровых турбин. В издании раскрыты вопросы модульных конструкций энергетического оборудования и сопровождение жизненного цикла такого оборудования.

Структура книги позволяет ее использовать как основу курсов лекций по дисциплинам «Энергетические блоки» и «Эксплуатация и надежность энергетического оборудования тепловых электрических станций» для студентов и аспирантов энергомашиностроительных и энергетических специальностей.

Модульная конструкция и жизненный цикл турбоустановок: монография / А.Ю. Култышев, Ю.К. Петреня. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 331 с. – (Серия научно-технических изданий «Формула турбин»).

Авторы: Култышев А.Ю. (д.т.н.), Петреня Ю.К. (д. ф.-м. н.).

Рецензенты:

В.Е. Михайлов, д.т.н., профессор, генеральный директор ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»);

А.А. Ивановский, к.т.н., генеральный конструктор АО «Силовые машины».

В книге представлены принцип модульного проектирования турбоустановок, основные методы и критерии разработки модульных конструкций турбин. Обсуждается роль и влияние модульности конструкции на управление технико-экономическими и эксплуатационными показателями на всех этапах жизненного цикла турбоустановок. Отмечается, что высокий уровень цифровизации процессов проектирования и производства с использованием модульных принципов проектирования позволяет существенно повысить уровень конкурентоспособности турбоустановок. Рассмотрены результаты практической реализации представленного подхода в условиях энергомашиностроительных компаний. Указано на перспективы применения модульного проектирования не только для паровых турбин, но и для стационарных, транспортных турбин и для других сложных изделий энергомашиностроения. Для ученых и специалистов, занимающихся проектированием, изготовлением, монтажом, испытаниями, наладкой и эксплуатацией паровых турбин при переподготовке и повышении квалификации, а также для студентов и аспирантов, обучающихся по энергомашиностроительным и теплоэнергетическим специальностям, в том числе в рамках отдельного курса лекций по модульным конструкциям.

Паровые турбины в составе паросиловых и парогазовых установок: учеб. пособие / А.С. Алешина, А.А. Ивановский, С.Ю. Евдокимов, И.Ю. Кляйнрок, А.Ю. Култышев, Е.Н. Поляева, М.Ю. Степанов, Т.Л. Шibaев; под ред. д.т.н. А.Ю. Култышева, к.т.н. И.Ю. Кляйнрока. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 463 с. – (Серия научно-технических изданий «Формула турбин»).

Авторы: Алешина А.С. (к.т.н), Ивановский А.А. (к.т.н), Евдокимов С.Ю., Кляйнрок И.Ю. (к.т.н), Култышев А.Ю. (д.т.н.), Поляева Е.Н., Степанов М.Ю., Шibaев Т.Л. (к.т.н.).

Рецензенты:

В.Г. Грибин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Паровые и газовые турбины» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»;

В.Е. Михайлов, д.т.н., профессор, генеральный директор ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»).

В учебном пособии представлены обобщенные результаты разработок и основные конструктивные решения, используемые при проектировании паровых турбин, предназначенных для работы в составе паросиловых и парогазовых установок, ведущих отечественных и зарубежных энергомашиностроительных предприятий. Для специалистов, занимающихся проектированием, изготовлением, монтажом, испытаниями, наладкой и эксплуатацией паровых турбин при переподготовке и повышении квалификации, а также для студентов и аспирантов, обучающихся по энергомашиностроительным и теплоэнергетическим специальностям.

Издание посвящено памяти главного конструктора – технического директора Уральского турбинного завода Тараса Леонидовича Шibaева.

Газоперекачивающий агрегат ГПА-32 «Ладога» / под ред. профессора Высшей школы энергетического машиностроения ФГАОУ ВО «СПбПУ», д. ф.-м. н., профессора, члена-корреспондента РАН Ю.К. Петрени. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Многопрофильная типография «Быстрый Цвет», 2024. – 208 с. – (Серия научно-технических изданий «Формула турбин»).

Авторы: Гилев К.О., Гузаев Е.В., Зуева Ю.В., Иванов В.А., Кляйнрок И.Ю. (к.т.н.), Култышев А.Ю. (д.т.н.), Смелянский Д.В., Спирин В.В., Юн В.К. (д.т.н.).

Рецензенты:

А.В. Рогов, заместитель начальника Департамента ПАО «Газпром», генеральный директор ООО «Газпром ТЕХ»;

В.Г. Грибин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Паровые и газовые турбины» ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»;

В.Г. Никитин, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород».

В монографии дано описание конструкции современного ГПА, включая информацию по конструкции всех ключевых элементов установки, а также по организации ремонтных работ, выявленным в процессе эксплуатации недостаткам и техническим решениям по их устранению; описан опыт освоения и последующей локализации производства ГТУ на Невском заводе. Настоящая монография может быть рекомендована студентам и аспирантам, слушателям курсов повышения квалификации и эксплуатационному персоналу для изучения конструкции и особенностей эксплуатации современной газотурбинной и компрессорной техники.



Серия научно-технических изданий «Формула турбин»

Алешина Алена Сергеевна
Ивановский Александр Александрович
Иващенко Александр Михайлович
Кляйнрок Иван Юрьевич
Култышев Алексей Юрьевич
Степанов Михаил Юрьевич
Юдин Роман Олегович

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ И ЭНЕРГЕТИКЕ

Учебное пособие

Под общей редакцией д.т.н. А. Ю. Култышева



Подписано в печать 29.01.2026. Формат 70×100/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 19,75. Тираж 682. Заказ 0437.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.