



Култышев Алексей Юрьевич,

доктор технических наук, выпускник кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета (ранее УГТУ-УПИ). В настоящее время директор по развитию машиностроения ГК «Ренова», лектор Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, главный редактор журнала «Турбины и Дизели». Ранее главный конструктор АО «Уральский турбинный завод», генеральный конструктор и заместитель генерального директора АО «Силовые машины», заместитель генерального директора-технический директор ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы» и преподаватель Уральского федерального университета.



Петреня Юрий Кириллович,

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, крупный ученый в области физико-технических процессов, включая влияние экстремальных условий нагружения, в энерго- и электрооборудовании тепловых, атомных и гидравлических электростанций.

Научный руководитель ОАО «НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова» и АО «Силовые машины» (ранее – генеральный директор ОАО «НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова» и АО «Силовые машины»). Член Международного комитета премии «Глобальная энергия» и секций Межведомственного совета по присуждению премий Правительства РФ в области науки и техники. Член редколлегии журнала «Известия РАН. Энергетика». Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники и премии имени академика А.Н. Крылова.



Модульная конструкция
и жизненный цикл турбоустановок

А. Ю. Култышев, Ю. К. Петреня



Totum major est quam summa partium



**Модульная конструкция
и жизненный цикл
турбоустановок**

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»

А. Ю. Кульмьшев Ю. К. Петреня

МОДУЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ И ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ТУРБОУСТАНОВОК

Монография



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2024

ББК 31.363
К90

Култышев А. Ю. 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»)

ISBN 978-5-7422-8690-5

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.

Табл. 23. Ил. 114. Библиогр.: 159 назв.

Компьютерная верстка *А. Ю. Култышева*

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

ISBN 978-5-7422-8690-5

© Култышев А. Ю., Петреня Ю. К., 2024
© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	9
<i>Глава 1.</i> МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ.....	11
<i>Глава 2.</i> ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ ТУРБИН И ТУРБОУСТАНОВОК.....	19
<i>Глава 3.</i> ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТУРБОУСТАНОВКАХ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ.....	26
<i>Глава 4.</i> УНИФИКАЦИЯ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА.....	48
<i>Глава 5.</i> ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ УНИФИКАЦИИ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ПРАКТИКЕ ТУРБОСТРОЕНИЯ..	61
<i>Глава 6.</i> МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП: ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КРИТЕРИИ.....	99
<i>Глава 7.</i> АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ НА МОДУЛЬНЫХ ПРИНЦИПАХ.....	109
<i>Глава 8.</i> МОДУЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБОРУДОВАНИИ.....	127
<i>Глава 9.</i> МОДУЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПРИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	143
<i>Глава 10.</i> ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	172
<i>Глава 11.</i> ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	196
<i>Глава 12.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	222
<i>Глава 13.</i> ВОПРОСЫ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПТУ С МОДУЛЬНОЙ КОНЦЕПЦИЕЙ: ТИПИЗАЦИЯ ПОДХОДОВ, СЕРВИСНЫЙ СКЛАД, ДЛИТЕЛЬНОСТЬ.....	243
<i>Глава 14.</i> МОНТАЖ И ПУСКОНАЛАДКА МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ..	248
<i>Глава 15.</i> ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ..	258
<i>Глава 16.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	264
<i>Глава 17.</i> ЭКОНОМИКА И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	268
<i>Глава 18.</i> МОДУЛЬНЫЕ ТУРБИНЫ И ТУРБОУСТАНОВКИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	273
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	313

ПРЕДИСЛОВИЕ

Жизненный цикл устройств и сооружений промышленности, стационарной и транспортной энергетики включает много этапов от определения востребованности и назначения технических требований к проектированию, производству, монтажу и пуско-наладке, эксплуатации, модернизации, выводу из эксплуатации и утилизации. Ключевыми условиями достижения конкурентного уровня жизненного цикла являются обеспечение необходимого уровня технических показателей при приемлимой экономической эффективности на всех этапах жизненного цикла соответствующих технических устройств и оборудования. Мощным современным инструментом, способствующим успешному решению таких научно-технических и экономических задач, является модульный принцип проектирования. В основе этого принципа лежит обоснование представления конструкции как взаимосвязанной совокупности небольшого количества крупных сборочных единиц высокой степени унификации с учетом физико-технических процессов, протекающих в оборудовании. Если воспользоваться выражением Аристотеля «Целое больше суммы его частей», то применение модульного принципа должно приводить к уменьшению количества частей, повышая ценность целого.

Если в качестве объектов приложения модульного принципа рассматривать такие сложные системы, как стационарные и транспортные турбины и турбоустановки, то его востребованность ощущалась всегда, но фактическая реализация на протяжении десятилетий в какой-то мере проявлялась в повышении степени унификации. Качественно новые возможности появились только в последние годы в связи с развитием и внедрением автоматизации и цифровизации, появлением возможностей формирования и эффективной работы с большими базами разнородных данных.

Стимулирующее влияние на развитие модульного принципа оказал существенный рост конкуренции на рынках стационарной и транспортной энергетики. Примером тому могут служить программы ДПМ, ДПМ-Штрих и развития электроэнергетики ДФО, российские и международные проекты атомной энергетики, международные конкурсы по проектам тепловой энергетики в Монголии, Вьетнаме, Индии, Казахстане, Белоруссии, на Кубе и в других странах, проекты по строительству мусоросжигательных заводов в РФ и многие другие

текущие и перспективные проекты.

Развитие отечественного энергомашиностроения особенно в последние годы показало, что рост уровня конкурентоспособности может быть обеспечен за счет радикального увеличения степени унификации и внедрения модульных конструкций турбин и турбоустановок. В данном направлении идет и развитие основных мировых компаний разработчиков и производителей такого оборудования.

Применение комплексного подхода к внедрению модульного подхода с одновременной цифровой трансформацией энергомашиностроительных предприятий открывает широкие возможности для повышения конкурентоспособности, а дальнейшее ведение операционной деятельности с использованием такой концепции к взрывному росту компании.

В качестве примера показано, что внедрение модульных принципов создания паротурбинного оборудования на Уральском турбинном заводе позволило повысить качество, технико-экономические показатели и конкурентоспособность паровых турбин и снизить затраты на их жизненный цикл, а также сократить трудоемкость и длительность изготовления оборудования с получением дополнительных возможностей и инструментов модернизации и сервиса такого оборудования.

В данной книге впервые системным образом подробно рассмотрена концепция модульного принципа проектирования турбин и турбоустановок и её применение на всех этапах жизненного цикла, что с учётом вышесказанного должно представлять большой теоретический и практический интерес для учёных и специалистов, связанных с областями стационарного и транспортного энергомашиностроения и энергетики. Следует также отметить, что структура книги позволяет ее использовать как основу курса лекций «Модульное проектирование и жизненный цикл турбин и турбоустановок» для студентов и аспирантов энергомашиностроительных и энергетических специальностей.

**Президент СПбПУ
академик РАН Федоров М.П.**

**Генеральный конструктор ЦКБ МТ «Рубин»,
контр-адмирал, Герой Российской Федерации
доктор технических наук Сидоренко Л.Г.**

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЖЦИ – жизненный цикл изделия;

ЖЦ – жизненный цикл;

ДПМ – договор предоставления мощностей;

MES – Manufacturing Execution Systems (управление производственными процессами);

CAD – computer-aided design (компьютерная поддержка конструирования);

CAM – computer-aided manufacturing (компьютерная поддержка изготовления);

CAE – computer-aided engineering (поддержка инженерных расчетов и анализа);

PDM – Product Data Management (управление данными о продукте);

PLM – Product Lifecycle Management (управление жизненным циклом продукта);

EDM – Engineering Data Management (управление инженерными данными);

TDM – Technical Data Management (управление технической документацией);

MRP – Materials Requirement Planning (планирование потребностей в материалах);

ERP – Enterprise Resource Planning (планирование ресурсов предприятия);

CRM – Customer Relationship Management (управление отношениями с заказчиками);

CPM – Corporate Performance Management (управление эффективностью работы предприятия);

SCM – Supply Chain and Logistics Management (управление цепочкой поставок);

TQM – Total Quality Management (глобальное управление качеством);

CAPE – Computer-Aided Process Engineering (автоматизированная разработка производственных процессов);

DMU – digital mock-up (цифровое макетирование);

PM – Project Management (управление проектами);

BPM – Business Process Management (управление бизнес-процессами);

- WF** – Workflow (управление потоками заданий);
- EIM** – Enterprise information management (управление информацией предприятия);
- CALS** – Continuous Acquisition and Lifecycle Support (непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий);
- ВТИ** – Всероссийский (ранее Всесоюзный) теплотехнический институт;
- МЭИ** – Московский энергетический институт;
- УрФУ** – Уральский федеральный университет;
- ТМЗ** – Турбомоторный завод (сейчас УТЗ);
- ЛМЗ** – Ленинградский турбинный завод;
- КТЗ** – Калужский турбинный завод;
- НЗЛ** – Невский завод имени Ленина;
- РЭПХ** – РЭП Холдинг;
- ХТГЗ** – Харьковский турбинногенераторный завод;
- БМЗ** – Брянский машиностроительный завод;
- НИОКР** – научно-исследовательская опытно-конструкторская работа;
- ЧПУ** – числовое программное управление;
- ДСЕ** – детали и сборочные единицы;
- ПГУ** – парогазовая установка;
- ПТУ** – паротурбинная установка;
- ГТУ** – газотурбинная установка;
- КУ** – котел-утилизатор;
- КПД** – коэффициент полезного действия;
- ТЭС** – тепловая электрическая станция;
- АЭС** – атомная электрическая станция;
- ГРЭС** – государственная районная электрическая станция;
- ТЭЦ** – теплоэлектроцентраль;
- ГРС** – газораспределительная станция;
- ГРП** – газораспределительный пункт;
- ЦВД** – цилиндр высокого давления;
- ЦСД** – цилиндр среднего давления;
- ЦНД** – цилиндр низкого давления;

- ЦСНД** – цилиндр средне-низкого давления;
- ВД** – высокое давление;
- СД** – среднее давление;
- НД** – низкое давление;
- ЧВД** – часть высокого давления;
- ЧСД** – часть среднего давления;
- ЧНД** – часть низкого давления;
- ЦМИ** – цифровой макет изделия;
- ПТВ** – план товарного выпуска;
- НСИ** – нормативно-справочная информация;
- ОТК** – отдел технического контроля;
- СКБт** – Специальное конструкторское бюро турбостроения;
- КПП** – конструкторская подготовка производства;
- ТПП** – технологическая подготовка производства;
- КТПП** – конструкторско-технологическая подготовка производства;
- ПКД** – проектно-конструкторская документация;
- САПР** – система автоматизированного проектирования;
- КИМ** – контрольно-измерительная машина;
- ЕСКД** – единая система конструкторской документации;
- АРМ** – автоматизированное рабочее место;
- БС** – базовая структура;
- ЕРК** – единый расчетный комплекс;
- СТО** – стандарт организации;
- СТП** – стандарт предприятия;
- СМР** – строительно-монтажные работы;
- ПНР** – пусконаладочные работы;
- НТД** – нормативно-техническая документация;
- ПВД** – подогреватель высокого давления;
- ПНД** – подогреватель низкого давления;
- ЭП** – эскизное проектирование;
- ТП** – техническое проектирование;
- РП** – рабочее проектирование

ВВЕДЕНИЕ

Термин «модульность» употребляется в разных значениях, практика проектирования модульных конструкций оборудования, зданий и сооружений, их производства, а также описывающие эти процессы концепции не имеют сложившегося «канонического» содержания, но общее (рамочное) понимание модульности как системы, состоящей из модулей (самостоятельных функциональных элементов), связанных через стандартные интерфейсы, в целом достигнуто.

Понимание модульности тесно связано с циклами эволюции модульного производства. Ученые, разработчики, исследователи по теме отмечали, что в зависимости от этапа технологической зрелости рынков строительства и промышленности, в модульном производстве совершаются переходы от интегрированной архитектуры к модульной. Модульная архитектура конструкций всегда имеет функционально отделенный интерфейс между собираемыми в нее компонентами – модулями, при этом позволяет заменять одни модули другими, различными как по своей размерности, так и по функциональности. Интегрированная архитектура не допускает замену компонентов своей конструкции, которые являются «неотъемлемыми».

Модульность – это современный инструмент рационализации производства, а также эффективного управления жизненным циклом продуктов. Модульный подход целесообразен только в условиях зрелых технологических рынков, на которых преследуются не столько цели радикального инновационной трансформации, сколько решаются задачи оптимизации. Когда запускается каждый последующий инновационно-технологический цикл, интегрированная архитектура достаточно часто оказывается более предпочтительной по сравнению с модульным подходом. Циклы перехода к модульным конструкциям запускается вновь и вновь.

Несмотря на то, что переход к производству и сервису продуктов, состоящих из модульных конструкций, начался достаточно давно, подлинная радикальная и постоянно расширяющаяся «модульная революция» произошла только в конце XX века. Массовое производство достигло пределов своей

сложности, когда даже четкое разделение труда, нормализация и стандартизация технологических операций больше не обеспечивали эффективности управления производственными процессами. В 1980-1990-х годах проходил процесс стандартизации отдельных узлов, из которых собиралась производимая, прежде всего в машиностроении, продукция, но и их укрупнения, а также передачи производства этих узлов на кооперацию. Все это определяло переход к модульным подходам, которые представляли собой эффективный инструмент «управления сложностью» и позволяющей трансформировать процессы не только разработки и производства, но и всех этапов управления жизненным циклом продукции. Трансформация прежде всего определяла изменения образа мышления разработчиков продукции от «мышления продуктами» (thinking by products) к «мышлению платформами» (thinking by platforms). В настоящий момент наблюдается начало нового этапа развития – перехода к «мышлению средами» (thinking by environments), который заключается в первую очередь в создании модульных платформ с открытой архитектурой конструкций, что позволяет обеспечить рекомбинацию модулей разными участниками этапов жизненного цикла.

Переход промышленности к конструированию, производству и сервису продукции, собранной из модулей – стандартизированных технологических блоков, начался достаточно давно. При этом развитие модульных конструкций оборудования прошло целый ряд этапов, с одной стороны, определяющихся общим ходом развития инженерного проектирования, с другой – целым рядом изменений в структуре промышленного производства, прежде всего, сменой инновационно-технологических парадигм, развитием менеджмента, уровнем зрелости ключевых технологий промышленности, консолидацией активов и архитектурой цепочек поставок.

ГЛАВА 1. МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

В настоящее время строительство многоэтажного здания модульного типа может занимать меньше месяца, а сборка и ввод в эксплуатацию сложного наукоемкого оборудования – несколько дней, при условии, что все их компоненты (блоки или модули) предварительно собраны на заводе и готовы к монтажу. Предпочтение модульного метода другим заключается в значительном сокращении затрат и быстрой скорости сборки.

Самым известным же представителем примером модульной конструкции или архитектуры является конструктор LEGO, который имеет наборы, состоящие из цветных разноцветных кирпичиков, предназначенных для сборки и моделирования различных предметов конструкций (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Архитектура из модульных элементов конструктора LEGO

Промышленность. В промышленности еще с середины прошлого века при разработке и производстве оборудования используются конструктивно-нормализованные ряды. Ряды, как правило, были построены по смешанному принципу, так как учитывали одновременно массогабаритные характеристики

и назначение оборудования и машин. Конструктивная нормализация имеет высокие значения показателей, но изменяется в сравнительно небольших пределах, что, безусловно, указывает на более тщательную проработку рядов.

На рисунке 1.2 представлен конструктивно-нормализованный ряд планетарно-цевочных редукторов.

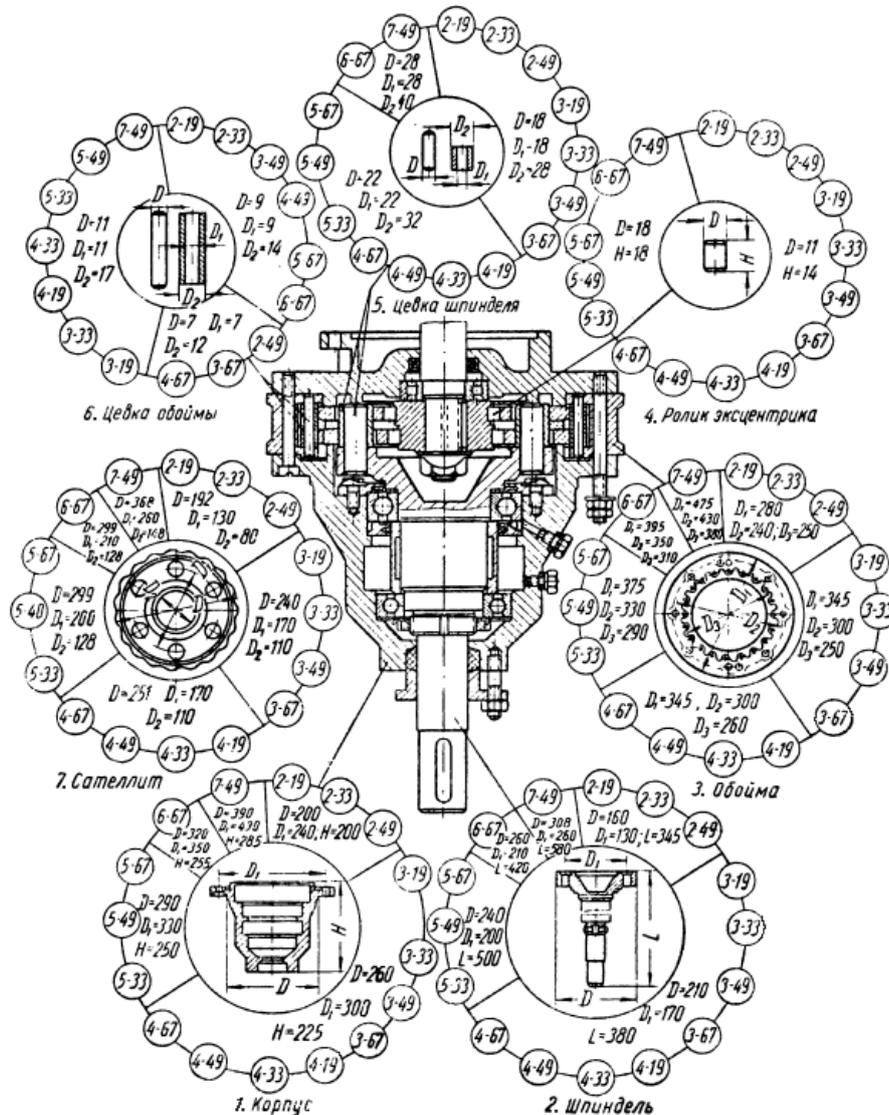


Рисунок 1.2 – Конструктивно-нормализованный ряд планетарно-цевочных редукторов

Конструктивно-нормализованный ряд планетарно-цевочных редукторов, включающий 16 редукторов шести типоразмеров, обеспечивался всего пятью унифицированными корпусами, шестью сателлитами, шестью обоймами, пятью шпинделями, тремя цевками, двумя роликами эксцентриков и исключаящими все ранее применявшиеся типы. Необходимо отметить, что детали различных типоразмеров редукторов изготавливались из унифицированных заготовок.

На рисунке 1.3 представлена схема конструктивно-нормализованного ряда на примере тракторов.

(БЕЗ УЧЕТА ДВИГАТЕЛЕЙ И ГИДРОСИСТЕМ)



ПОЛНАЯ УНИФИКАЦИЯ
(ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ)



УНИФИКАЦИЯ МЕЖДУ УЗЛАМИ, БЛИЗКАЯ К ПОЛНОЙ
(ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ БОЛЬШИНСТВА ДЕТАЛЕЙ)



КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ПОДОБИЕ (УЗЛЫ-ДЕТАЛИ, ПРИНАДЛЕЖАЩИЕ
К ОДНОМУ КОНСТРУКТИВНОМУ РЯДУ)

МАРКА ТРАКТОРА НАИМЕНОВАНИЕ УЗЛОВ (ДЕТАЛЕЙ)	УНИФИКАЦИЯ, КОТОРАЯ МОГЛА БЫ БЫТЬ ОСУЩЕСТВЛЕНА								УНИФИКАЦИЯ, КОТОРАЯ БЫЛА ОСУЩЕСТВЛЕНА							
	ГУСЕНИЧНЫЕ				КОЛЕСНЫЕ				ГУСЕНИЧНЫЕ				КОЛЕСНЫЕ			
	С 80	ДТ 54	ТДТ 60	КДП 35	ТДТ 40	МТЗ	ДТ 24	ДТ 14	С 80	ДТ 54	ТДТ 60	КДП 35	ТДТ 40	МТЗ	ДТ 24	ДТ 14
МУФТА СЦЕПЛЕНИЯ	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full
ГИБКАЯ МУФТА	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full
КОРОБКА ПЕРЕДАЧ	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full
ГЛАВНАЯ ПЕРЕДАЧА	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full
БОРТОВЫЕ ФРИКЦИОНЫ И ТОРМОЗА	Full	Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЮТСЯ		Full	Full	Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЮТСЯ		
КОНЕЧНАЯ ПЕРЕДАЧА	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full
КОЛЕСО НАПРАВЛЯЮЩЕЕ	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full
КОЛЕСО ВЕДУЩЕЕ	НЕ ИМЕЕТСЯ				Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЕТСЯ							
ТЕЛЕЖКА ГУСЕНИЦЫ	Full	Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЕТСЯ		Full	Full	Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЕТСЯ		
ОПОРНЫЕ КАТКИ	Full	Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЮТСЯ		Full	Full	Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЮТСЯ		
ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ КАТКИ	Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЮТСЯ			Full	Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЮТСЯ			
РУЛЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ	НЕ ИМЕЕТСЯ				Full	Full	Full	Full	НЕ ИМЕЕТСЯ							
РАМА ТРАКТОРА	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full

Рисунок 1.3 – Схема конструктивно-нормализованного ряда основных узлов тракторов

В данном примере разработкой единого тракторов разрешается задача специализации тракторных заводов на основе нормализации деталей и узлов тракторов различного назначения. В таком случае один и тот же завод будет производить марки тракторов конструктивно-нормализованного ряда, в который входит базовая модель трактора как основание ряда и все его производные, то есть модификации.

Также решается другая задача машиностроения, осуществление конструктивной преемственности тракторов различного назначения, что позволяет не только не узаконивать устаревшие конструкции, но предопределяет наиболее экономичные конструкции и методы их изготовления.

При этом, если в пределах конструктивно-нормализованных рядов нормализация и унификация достигла высокого уровня, то между рядами они развиты достаточно слабо.

Новой идеей или идеологией, решающей следующие задачи по унификации и повышения конкурентоспособности продукции и предприятия, может стать методологическое применение модульного принципа создания такой продукции.

С помощью модульных конструкций оборудования и машин можно в кратчайшие сроки запустить производство новой востребованной машиностроительной, в том числе энергомашиностроительной продукции.

Помимо детального описания подходов и возможностей, которые будут описаны ниже, необходимо обозначить, что укрупненно модульная конструкция оборудования позволяет:

- использовать прогрессивные конструкторские и технологические решения по разработке оборудования с учетом потребностей заказчика;
- повысить долю унификации основных узлов и вспомогательных систем для различных типов и рядов оборудования;
- повысить показатели надежности, безотказности и ремонтпригодности комплектующего оборудования;
- повысить возможности по модернизации оборудования с учетом замены модулей;
- снизить эксплуатационные и сервисные затраты в различных условиях объектов;
- снизить влияние человеческого фактора при сопровождении жизненного цикла оборудования;
- использовать новые современные методы диагностики оборудования, основанные на качественно новых принципах.

При этом оборудование, созданное с использованием концепции модульности, будет иметь высокие показатели надежности, технологичности и унификации, что позволяет развивать использование инновационных решений в части совершенствования и автоматизации его жизненного цикла.

Строительство. В наше время модульное строительство в промышленном секторе – это популярный вид работ, который позволяет быстро и качественно возводить производственные здания. Такое направление имеет массу достоинств.

Модульное строительство – современная технология с применением готовых блоков/модулей, позволяющая возводить постройки различной сложности от временных до капитальных. При этом возведенные здания и сооружения получаются надежными и удобными, должного качества и долговечности. Такая технология позволяет сокращать сроки строительства объекта и снижать стоимость. Сегодня модульные технологии и конструкции известны и активно используются во многих странах мира.

На рисунке 1.4 представлен модульный проект комплекса «461 Dean Street» в Нью-Йорке.

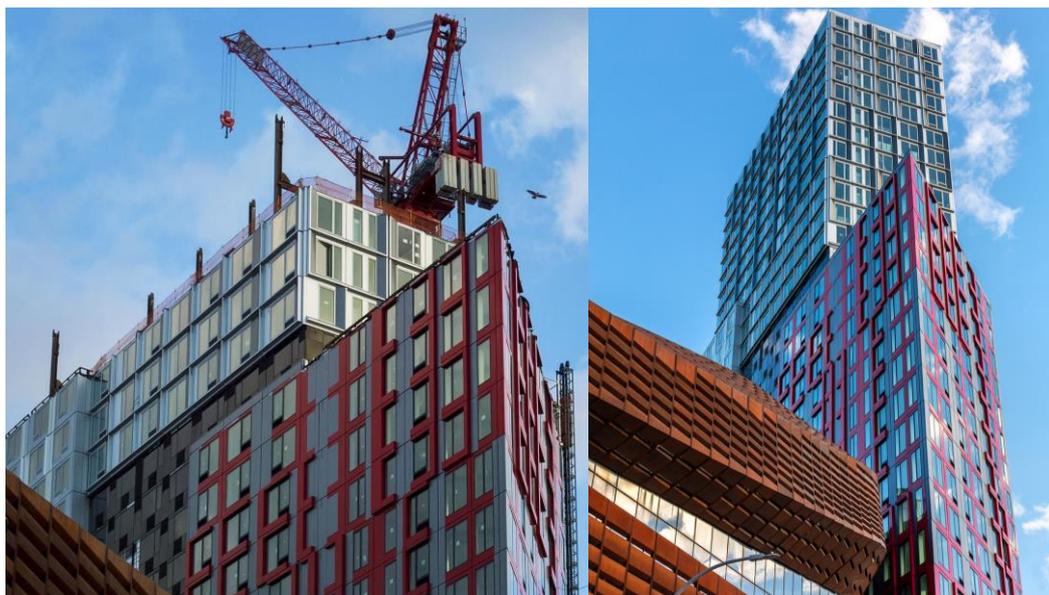


Рисунок 1.4 – Проект «461 Dean Street» в Бруклине (г. Нью-Йорк)
площадью 32516 квадратных метра

С использованием модульного принципа и с учетом конструкции модулей создаются помещения любой формы и размера. Модули могут быть в полностью заводской готовности или разборными для транспортировки.

Интересно и показательно обозначить, что одно из самых широких применений модульная технология получила в нефте- и газодобывающей промышленности. В этих сферах промышленности используют модульные конструкции при реализации проектов строительства нефтегазотранспортной

и добывающей систем трубопроводов – это крайне выгодно в условиях, когда капитальное строительство нецелесообразно с экономической точки зрения, так как вахтовые поселки должны постоянно перемещаться по мере продвижения трубопровода.

На рисунке 1.5 показан пример вахтового поселка комплекса нефтегазодобычи.



Рисунок 1.5 – Вахтовый поселок комплекса нефтегазодобычи

При этом особенно важно, что здания, возведенные при помощи модульных принципов, объединяют комфорт и экономичность размещения персонала. Решение применяется в труднодоступных местах в условиях отсутствия городских инженерных коммуникаций и сложных климатических условиях. Строящиеся по модульной концепции вахтовые поселки вводятся в работу в кратчайшие сроки.

Модульная конструкция зданий и сооружений имеет целый ряд преимуществ в сравнении с капитальным строительством промышленных объектов:

- относительно низкая стоимость;
- доступность и легкость транспортировки;
- простота в монтаже, пусконаладке и эксплуатации;
- возможность и простота модернизации и реконструкции;
- разнообразие объектов назначения;
- сокращение длительности строительства;
- сниженные затраты на эксплуатацию объекта.

«Модульный объект» соответствует всем требованиям и правилам безопасности и подходит для предприятий практически любых отраслей

промышленности: металлургии, нефтехимии, обрабатывающей, пищевой отрасли и т.д.

Развитие модульных технологий и проектных решений строительства в России и в мире, особенно в промышленном секторе, является крайне перспективным. Доступно быстро расширить действующее производство или ввести новый завод помогают быстровозводимые модульные объекты. При этом их возведение актуально и набирает популярность во многих отраслях промышленности.

За промышленными зданиями на основе модульных конструкций – будущее. Применение бюджетных материалов и технологий строительства в сочетании с использованием методов быстрой сборки из готовых стандартных элементов позволяет в кратчайшие сроки завершить строительство полноценного здания или объекта из нескольких зданий и сооружений. Особо актуально в сегодняшних экономических условиях и с учетом санкционных ограничений ввести промышленный объект всего за несколько месяцев и конкурентоспособно наладить производство необходимой для России продукции, в том числе наукоемкого энергомашиностроительного оборудования.

Промышленный дизайн. Да-да, модульные подходы в промышленном дизайне тоже используются (!), что позволяет делать выводы о возможности, целесообразности и актуальности использования модульности в различных сферах. В дизайне модуль – это величина, которая принимается за основу при расчете размеров предмета, оборудования, здания или сооружения, а также их деталей, узлов и элементов, которые кратны одному модулю. Модуль широко применяется в дизайне, особенно при проектировании различного оборудования из унифицированных элементов. Мебель и многие другие изделия для жилища проектируются на основе модуля, производного от основного модуля, принятого в архитектуре. Введение единой модульной системы в практику художественного конструирования облегчает решение многих задач, связанных с формообразованием изделий.

Пример модульного дизайна показан на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Пример модульного дизайна

Процесс распространения модульной архитектуры связан с тем, что в производстве, базирующемся на зрелых технологиях, использование модульных конструкций и модульного дизайна разнообразных платформ обеспечивает существенный выигрыш в гибкости этого производства и его экономической эффективности.

Поэтому необходимо обозначить, что модульный подход – это инструмент рационализации современного производства, эффективного управления его сложностью и его сложным жизненным циклом, но она целесообразна лишь в условиях, когда рынки зрелы, а технологические решения преследуют цели не столько радикального инновационного переворота, сколько оптимизации.

ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ ТУРБИН И ТУРБОУСТАНОВОК

На сегодняшнем конкурентном рынке нельзя добиваться 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 исключает большое разнообразие избыточных по составу и количеству технологических средств, что исключает 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 осуществлено быть 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 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.

Теперь что касается вопроса формирования профиля паровой турбины, связанного с выбором количества цилиндров и разделительного давления между цилиндрами или внутренним и внешним корпусами в петлевой схеме цилиндра. На такой выбор влияли следующие факторы:

- ограничение температурного перепада по корпусу цилиндра и, как следствие, установление пределов по требованиям к маневренности и малоцикловой усталости;

- изменение потерь энергии от соответствующего размещения ступеней в одном или другом цилиндре и их перенос в более низкопотенциальные цилиндры;

- статическая и динамическая прочность валов роторов, связанная в том числе с межопорными расстояниями и диаметрами, что определяет статический прогиб роторов;

- разная прочность элементов облопачивания при различных принципиальных схемах, что отличает объемный пропуск через ступени при различных разделениях расхода на потоки в многоцилиндровых турбинах, снижая высоты облопачивания;

- диаметры и длины перепускных труб, связанные с объемным пропуском, а также с компоновочными и схемными решениями;

- параметры и места отборов пара, что определяет возможность их организации по условиям вывода патрубков, организации коридоров вывода

трубопроводов как с точки зрения геометрии и скоростей среды, так и с точки зрения тепловой компенсации трубопроводов;

- конструктивный и технологический облики турбины, отвечающие на вопросы сложности и стоимости производства и обслуживания оборудования.

Описанные ключевые факторы выбора профиля паровой турбины претерпевали изменения в связи с пересмотром или оптимизацией конструкции корпусов цилиндров, роторов, лопаточного аппарата и других элементов, в том числе системы регулирования, получением опыта эксплуатации, что позволило скорректировать пусковые схемы, графики и технологии пуска и останова из различных тепловых состояний.

Одним из примеров пересмотра профиля паровой турбины стала турбина типа К-300-240, причем несмотря на выполнение ее разработки и производства разными предприятиями и по полному циклу этапов разработки, испытаний и опытно-промышленной эксплуатации: типа К-300-240 производства ЛМЗ и типа К-300-240-2 производства ХТЗ. Обе модификации получали новые конструкции ЦВД и реконструкцию ЦСД, различные пусковые схемы и технологии пуска для повышения показателей маневренности и многое другое, включая разделения на узлы, замену материалов, снижение и повышение параметров свежего пара и промежуточного перегрева.

Причем профиль турбин типа К-300-240 закладывался на перспективу развития паровых турбин большей мощности на эти параметры свежего пара. Турбина типа К-300-240 обоих производителей имеет ЦСД с совмещением ЧСД и ЧНД (часто называют ЦСНД) и двухпоточный ЦНД с унификацией ЧНД от ЦСД. Однако отечественные паровые турбины мощностью выше 300 МВт должны были иметь более одного двухпоточных ЦНД, а мощностью 500 МВт и более, по условиям проточной части необходимо было проектировать еще и двухпоточным ЦСД. При проектировании таких турбин была задача разработки и использования максимальных размеров последних ступеней, что позволяло добиться их максимальных ометаемых площадей с сокращением количества выхлопов и ЦНД с обеспечением их унификации как в одной турбине, так и в модельном ряду мощных многоцилиндровых турбин.

Важно отметить, что к многофакторному вопросу модульной концепции в многоцилиндровых паровых турбинах большой мощности, имеющих несколько ЦНД, добавляются свои факторы, связанные с расположением ЦНД. Есть возможность расположения ЦНД в типовой компоновке турбины – между ЦВД и генератором, но при большом количестве ЦНД появляется вариант размещения ЦНД по разные стороны от ЦВД, что принципиально изменяет компоновку турбины, сокращает длины перепускных труб и снимает часть ограничений при решении вопросов унификации ЦНД, включая узлы их соединений.

Другой пример пересмотра ключевых факторов выбора профиля паровой турбины, изменения подходов к проектированию и, как следствие, изменения профиля касается пересмотра ограничений возможностей одноцилиндровой турбины. Если изначально на этапе разработки турбин мощностью 50 МВт и в СССР, и за рубежом ограничивались предельной мощностью в 60 МВт, параметрами свежего пара и типами турбин, то затем были реализованы проекты одноцилиндровых конденсационных турбин для ПГУ мощностью 200 МВт без отборов на регенерацию с реактивным облопачиванием, а значит, с возможностью использования барабанных роторов, позволяющих обеспечить требования по статическому прогибу менее 0,5 мм с межопорным расстоянием до 9 метров. Одними из таких образцов стали турбины серии SST-800 компании Siemens.

Следующим показательным примером стоит привести разработку, производство, отработку и эксплуатацию одноцилиндровых теплофикационных турбин типа Т-63/76-8,8 с активным облопачиванием для работы в составе ПГУ-230 номинальной потенциальной мощностью 95 МВт, а максимальной до 120 МВт, которые предполагается достичь без реконструкции паровой части после модернизации газотурбинной части, имеющей в составе турбину типа ГТЭ-160 версии 3 номинальной мощностью 157 МВт, КПД ГТУ составляющим 34,4% и КПД ПГУ – 51,2% до ГТЭ-180 номинальной мощностью свыше 187 МВт с КПД ГТУ составляющим 36,7%, а КПД ПГУ достигающим 55,3%.

Профиль такой турбины типа Т-63/76-8,8 с петлевой схемой цилиндра удалось обеспечить путем получения наименьшего осевого расстояния между подшипниками турбины при обеспечении прочности и жесткости ротора, выполняя условия допустимого статического прогиба ротора и возникающих в нем напряжений при мощности турбины до 120 МВт путем сокращения осевого размера, упрощенного по сравнению с прямоточной схемой движения пара в цилиндре, переднего концевое уплотнения, которое уменьшает утечки пара контура низкого давления против высокого давления в прямоточной схеме, а также сокращения до размеров паровпуска высокого давления осевого размера промежуточного уплотнения, которое уменьшает утечки пара контура высокого давления в камеру перед ступенями частью среднего давления с давлением контура низкого давления близким к 1,3-1,5 МПа вместо часто 0,6-0,7 МПа. Это позволяет сократить утечки при одной и той же длине промежуточного уплотнения, и зазоре между промежуточным уплотнением и ротором. Все это реализовано с простотой конструкции, повышенной маневренностью, высокой экономичностью проточной части и оптимальности разгрузки осевых усилий, что придает преференций такой турбине при работе в составе ПГУ.

Важно также отметить сравнительный анализ ЖЦ турбин типа ПТ-60-130 (в том числе ПТ-65-130) и ПТ-80-130 производства ЛМЗ, введенных в эксплуатацию одновременно в 1977 году и турбины типа ПТ-50/60-130, введенной в эксплуатацию в 1963 году, а также турбины типа ПТ-90-12,8-1(2) производства УТЗ, введенной в эксплуатацию в 1999 году. Турбины ЛМЗ данных семейств стали неудачным примером выбранного профиля турбины, в первую очередь, из-за выбранного разделительного давления между цилиндрами ЦВД и ЦНД, значение которого совпадало с давлением производственного отбора и в зависимости от требований проекта и технических решений составляет 13-16 кгс/см². Такое решение привело к длинному ЦВД с 17 ступенями, корпус которого по опыту эксплуатации оказался медленно и неравномерно прогреваемым из холодного и неостывшего тепловых состояний, со значительным градиентом температур металла в осевом направлении и, как следствие, подвергающейся

малоцикловой усталости, которая приводила к трещинообразованию и значительным разрушениям уже к 100 тыс. н/ч наработки. При реализации проектов модернизации такие турбины претерпевали значительные изменения, связанные с переворачиванием ЦВД, изменением соединений роторов ВД и НД, вынужденной оптимизацией форм корпусов ЦВД и концевых уплотнений, а при капитальных ремонтах объем, как правило, превышал объем ремонтов аналогичных паровых турбин. Турбины же УТЗ не совмещались по разделительным давлениям и производственным отборам. Данные типы турбин, унаследовав корпуса турбин Т-50/60-130 и Т-100-130, имеют разделительное давление 29-32 кгс/см², безобойменную конструкцию ЦВД, что обеспечивает высокие маневренные характеристики и безаварийную наработку до 480 тыс. часов.

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТУРБОУСТАНОВКАХ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

Сложные физико-технические процессы, протекающие в проточных частях турбин, не позволяют в прямую использовать типовые модульные принципы. Попытки упорядочить, стандартизировать и унифицировать разработки турбинного оборудования не увенчивались существенным успехом, так как последнее является значительно наукоемким, требующим расчетных и эмпирических исследований и натурных испытаний, выпускалось даже тогда относительно мелкими сериями, что на тот момент усугублялось взрывным ростом объема научно-технических внедрений и ростом установленной мощности как оборудования, так и в целом энергетических объектов. Для элементов проточных частях необходимо использовать модули с возможностью параметрических изменений для целей адаптации к параметрам рабочего тела. В главе пойдет речь о конструкторско-технологических решениях, позволяющих при реализации модульного принципа удовлетворить технические требования проектов строительства и модернизации объектов электроэнергетики.

В Российской Федерации реализована Программа договоров о предоставлении мощности (ДПМ), которая позволила внести значительный вклад в обновление фондов электрогенерации. За период реализации Программы ДПМ с 2010 по 2016 гг. реализовано более 130 проектов общей мощностью 30 ГВт, большая часть из которых основывалась на использовании современных образцов оборудования. С 2022 по 2035 год в России будет реализован следующий этап Программы ДПМ, так называемый ДПМ-Штрих, с суммарным ограничением на объем модернизируемой мощности 39 ГВт. До 2025 года будет реализована инвестиционная Программа по развитию электроэнергетики Дальневосточного федерального округа, параллельно реализуются проекты по строительству мусоросжигательных заводов. Во всех программах реализация будет осуществляться в сжатые сроки, с высокими требованиями к оборудованию и подрядчикам, что обуславливается высококонкурентной средой участников рынка электроэнергии и дефицитом

ресурса производителей основного тепломеханического оборудования и подрядчиков реализации проектов строительства и реконструкции объектов энергетики. Выше обозначенное указывает на высокие требования к основному тепломеханическому оборудованию, в том числе к паротурбинному, которое должно иметь высокие технико-экономические и эксплуатационные показатели, позволяющие добиваться победы в конкурсах, в короткий период реализовать строительство или реконструкцию объекта, а после чего эффективно и надежно его эксплуатировать. Из чего очевидна актуальность новых подходов, связанных с разработкой и совершенствованием паровых турбин и паротурбинных установок мощностью от 0 до 850 МВт для тепловых электрических станций.

В своей практике авторы в разной степени глубины и детализации сталкивались с различными конструкциями паровых турбин и вспомогательного оборудования таких производителей, как General Electric, Siemens AG (в настоящее время Siemens Energy; имеющий для разной номенклатуры выпускаемой продукции разные турбинные школы: немецкую и чешскую), Alstom (в 2015 году энергетическое направление, и соответствующая ему номенклатура вошла в General Electric), Mitsubishi Power (MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD), Ansaldo Energia, Doosan Skoda Power, MAN Energy Solutions, АТ «Турбоатом» (в настоящее время АО «Украинские энергетические машины»), АО «Силовые машины» (СКБ «Турбина», Ленинградский металлический завод), ООО «НордЭнергоГрупп» (ПАО «КТЗ») и АО «УТЗ», которые, без сомнения, формируют полную картину о конструкциях и школах мировой практики паротурбостроения.

Однако необходимо отметить наблюдение авторов, что несмотря на безусловную многофакторность вопроса формирования конструктивного подхода и облика турбин из номенклатурного ряда продукции компании, основными факторами, влияющими на конструкцию паровых турбин, являются не размеры бюджетов на НИОКР, объемы производства продукции или масштабы присутствия на различных географических рынках, а традиции школы (советская: ленинградская, уральская, харьковская, калужская, брянская; европейская: немецкая, чехословацкая, французская; американская

и японская). Конечно, с учетом уровня консерватизма и специализации предприятия на разработке и производстве оборудования того или иного назначения (приводные; транспортные; энергетические: конденсационные, теплофикационные, атомные). При этом особое влияние на традиции конструкторских школ турбостроения, с учетом наукоемкости и междисциплинарности разработок, используемых в продуктах, оказывает доступность и уровень результатов смежных направлений научных технологических исследований: металловедение и металлургия, механическая, электрохимическая и электрофизическая обработка и т.д. Что касается назначения оборудования, то к подфакторам, влияющим на конструктивные особенности, относятся: компоновочные и схемные решения, функциональные особенности, возможности эксплуатации, то есть наличие и параметры отборов/подводов, режимы работы, стесненность размещения, сопряжение с основным и вспомогательным оборудованием объекта использования. Все перечисленные подфакторы относятся к эксплуатационному этапу ЖЦ оборудования и определяют функциональность оборудования. Именно эти факторы определяют необходимость или обязательную потребность и возможность реализации модульной конструкции, и наделение модулей или комбинации модулей, из которых складывается конструкция оборудования, функциональностью. Однако в настоящем мире практически все предприятия с точки зрения разработки, технологических и производственных возможностей находятся практически в одинаковых условиях доступности инструментов, средств и способов подготовки производства и технологий для собственно производства. Все зависит от старта, скорости и масштабов развертывания, внедрения и дальнейшего использования при КТПП принципов модульного проектирования, что в значительной степени зависит от уровня цифровизации предприятий или, как в том числе принято учитывать в России, от уровня готовности технологий предприятий к внедрению Новых производственных технологий (НПТ) [1-12].

Ранжирование задач. Систематизация обозначенных задач, ранжирование и потенциальные направления их решения с указанием

необходимости комплексности подхода как с точки зрения инструментов, так и с точки зрения охвата производителей основного энергетического оборудования, в номенклатуре продукции которых требуется внедрить результаты решения таких задач и привить не только вкус, но и культуру использования модульного принципа создания оборудования и современных инструментов обеспечения ЖЦ от создания до утилизации.

Критическая востребованность вопросов ранжирования и решения задач по теме у авторов возникла в период 2006-2009 годов, когда Российская Федерация взяла курс на обновление и модернизацию тепловых электростанций с парогазовыми циклами, целесообразность к строительству и перевооружению которых пропагандировалась в отечественном топливно-энергетическом комплексе еще до реализации Программы договоров о предоставлении мощности. Интерес к выбору профиля ПГУ за счет реального и планируемого строительства новых электростанций в России возрос в разы и говорил об «энергетическом буме» парогазовых технологий [13, 14].

В соответствии с ходом выполнения энергетической стратегии России на период до 2020 года по Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики и разработанной РАО «ЕЭС России» инвестиционной программой, которую обязались выполнять новые владельцы генерирующих энергокомпаний, на тепловых электростанциях за пять лет до 2012 года был намечен ввод мощностей приблизительно в размере 40 ГВт [15, 16].

В рамках подготовки к реализации инвестиционных проектов этой энергетической стратегии РФ все отечественные энергомашиностроительные заводы захлестнула волна материалов по запросам предтендерных, тендерных и предконтрактных проработок поставляемого этими предприятиями оборудования, которое, по мнению заказчиков, «могло бы» войти в состав прорабатываемых объектов. Запросы характеристик оборудования, нередко с опросными листами (на еще несуществующее, то есть несерийное оборудование по индивидуальному проекту под свои параметры) поступали от участников тендеров, генерирующих энергокомпаний или энергохолдингов, которые проводят такие тендеры, а также от сотрудничающих и конкурирующих заводов. В запросах рассматривалась

возможность проектирования или изготовления за довольно короткий срок оборудования, удовлетворяющего требованиям заказчиков.

Самые большие объемы таких запросов поступали в адрес заводо-изготовителей котлов-утилизаторов, а еще больший по понятным причинам – в адрес поставщиков паровых турбин. Такие запросы тогда не обошли и ЗАО (ныне – АО) «Уральский турбинный завод», который только в течение 2006-2008 годов проработал и подготовил предложения о поставке по новым проектам приблизительно 100 модификаций паровых турбин для ПГУ, предназначенных для строительства или расширения электростанций на территории России [17].

Из материалов презентаций Б.Ф. Вайнзихера «Обеспечение инвестиционной программы оборудованием и материалами» следует, что для выполнения намеченной РАО «ЕЭС России» инвестиционной программы до 2020 года требовалось ввести только паровых турбин единичной мощностью 60 и более МВт в составе ПГУ суммарной мощностью около 9 ГВт [16]. По данной программе ввод новых мощностей предполагается в максимальной степени удовлетворить силами отечественной энергомашиностроительной промышленности.

Авторы тогда предложили Министерству энергетики РФ и всей профессиональной общественности для обеспечения инвестиционной программы развития энергетики России оборудованием разработать и утвердить ряд типоразмеров модулей «ГТУ-КУ-ПТУ» для строительства ПГУ [17]. Это не только сократило бы сроки согласования и строительства энергообъектов, но и позволило бы сократить затраты на приобретение заказчиками специального оборудования с одиночным индивидуальным заказом. Такой комплексный подход предлагалось реализовать по государственной стратегической идеологии с поддержкой всех энергетических и энергомашиностроительных компаний. Идеологическая цепочка создания паровых турбин ограниченного для производителя паротурбинного оборудования ряда представлена на рисунке 3.1.

В свою очередь, утверждение ряда типоразмеров основного оборудования позволяет заводам-изготовителям, а их не так много в России,

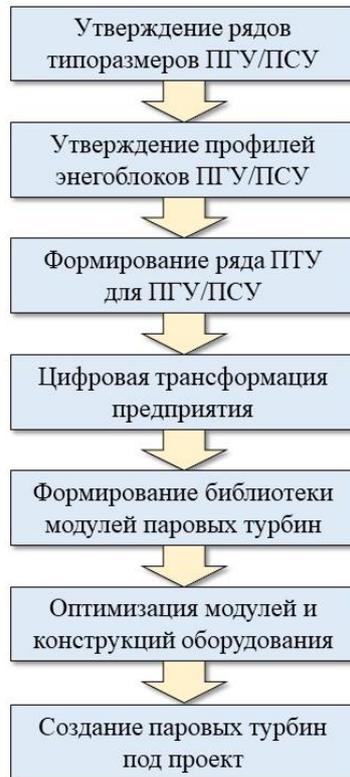


Рисунок 3.1 – Блок-схема стратегической идеологии создания паровых турбин

снизить затраты на его производство и более уверенно конкурировать с зарубежными поставщиками. К тому же энергомашиностроение не будет ограничиваться единичными образцами, а энергетика будет эксплуатировать отработанное современное серийное оборудование.

Несмотря на то, что в предпроектной стадии при участии в реализации программы и создании паровых турбин и турбоустановок на ЗАО «Уральский турбинный завод» (сейчас АО «УТЗ») не удалось утвердить на государственном уровне ряд типоразмеров ПГУ и ПСУ, частично уже на уровне заказчиков удалось типизировать профили энергоблоков ПГУ и ПСУ и в Обществе сформировать ряд ПТУ, и, как следствие, паровых турбин. При конструкторской подготовке производства закладывался модульный принцип создания паровых турбин 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 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 3.2.

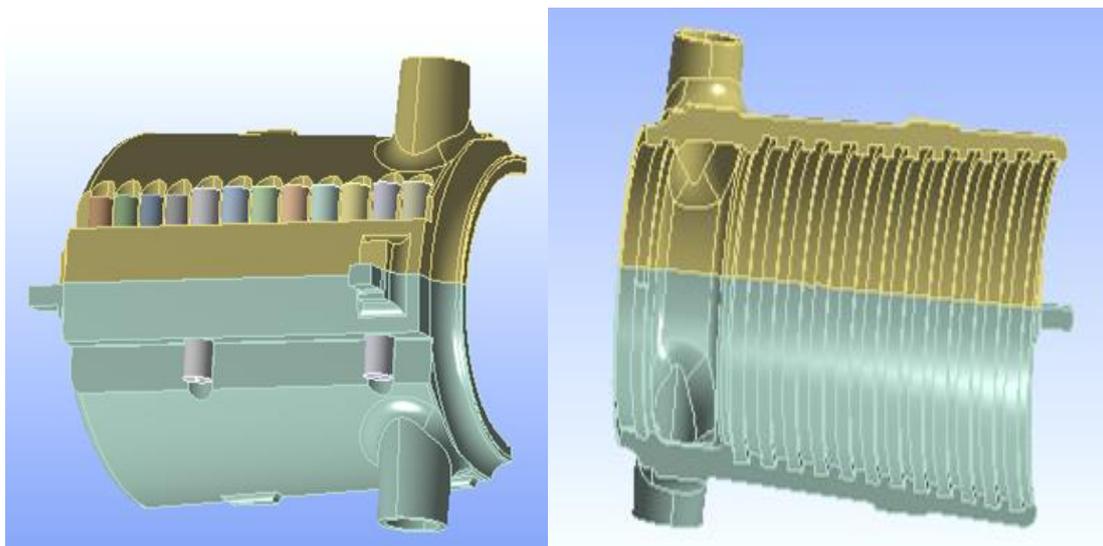


Рисунок 3.2 – Внешний вид расчетной модели унифицированного типового внутреннего корпуса паровых турбин УТЗ

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 натуральных экспериментов. Последнее обстоятельство является наиболее важным, поскольку измерения параметров при натуральных 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 [18-20].

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 САД-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 такой 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.

Следующим примером, позволяющим масштабировать подходы к конструктивно-технологической классификации ДСЕ и стандартным библиотечным модулям и другим элементам, следует представить тему по классификации диафрагм паровых турбин с целью унификации, в том числе по присоединительным и установочным размерам внутри группы для унификации установки их в обоймах и корпусах цилиндров, а также унификации деталей самих диафрагм, включая бандажи и облопачивание.

В рамках такой работы, которой в 2016-2017 годах занималась рабочая группа СКБт АО «УТЗ», сформировано разделение номенклатурного ряда

диафрагм по конструктивным и технологическим группам. Это позволяет использовать однотипные подходы к расчету, конструированию и выбору технологии изготовления, учитывая вопросы сложности раскроя и прожига профилей бандажей решеток, усадки при изготовлении сварных конструкций диафрагм и трудоемкости механической обработки «венцовых» диафрагм, а также вопросов изготовления диафрагм с полыми направляющими лопатками и обеспечения допустимых прогибов диафрагм при различных конструкциях и технологиях изготовления с одновременным сохранением надежности и функциональности. Например, обеспечением номинальных утечек пара через диафрагменные уплотнения и даже паразитные потоки через надбандажные уплотнения рабочих лопаток, на работу которых, безусловно, влияют периферийные обводы смежных диафрагм, обеспечивающих формирование основного потока пара.

Итак, оптимальная конструктивно-технологическая классификация всего номенклатурного ряда диафрагм с дальнейшей отработкой типовых конструкций и технологий их изготовления позволяет добиться:

- использования отработанной референтной конструкции;
- использования отработанной референтной технологии изготовления;
- высокого уровня полной унификации паровых диафрагм в паровых турбинах УТЗ;
- высокого уровня частичной унификации деталей в группах и групп облопачивания статора одной паровой турбины;
- высокого уровня унификации присоединительных и установочных размеров, что позволяет добиться высокой унификации смежных деталей и стандартных библиотечных модулей;
- сокращения временных, трудовых и финансовых затрат на КПП, ТПП, освоения и собственно производства;
- значительного повышения качества диафрагм, в том числе за счет снижения доли частичного и окончательного брака при освоении и производстве решеток;
- значительного снижения уровня отклонений по исполнению горл, каналов в целом, стыков элементов и неравномерности шагов, что, в свою

очередь, приближает фактическое исполнение диафрагм к расчетным показателям и повышает относительный внутренний КПД диафрагмы, характеризующий ее газодинамическое совершенство в проточной части турбины;

- увеличения типизации ДСЕ, что позволяет заблаговременно изготавливать большую долю ДСЕ серийно и на склад с учетом оборачиваемости по плану товарного выпуска;

- снижения продолжительности изготовления и испытания на прогиб.

При этом решением вопроса по классификации и унификации диафрагм закрывается вопрос с самым часто используемым элементом паровых турбин, формирующим наряду с ротором в сборе проточную часть.

С помощью диафрагм проточная часть разбивается на отдельные отсеки, а цилиндры турбины на отдельные камеры, которые, в свою очередь, формируют разделение корпусов цилиндров на модули и подмодули.

Диафрагма состоит из наружного полукольца (обода), внутреннего полукольца (тела), направляющего лопаточного аппарата и сегментов уплотнений.

В направляющем лопаточном аппарате диафрагм потенциальная энергия парового потока превращается в кинетическую, кроме этого, создается направление потока. Направляющий аппарат состоит из решетки направляющих лопаток, которые образуют сопловые каналы.

Сегменты уплотнений служат для уменьшения утечек пара между диафрагмой и валом турбины. Они крепятся в специальный паз, выполненный в теле диафрагмы и чаще всего представляют собой разрезанное на части кольцо, в которое завальцованы уплотнительные усики. Сегмент диафрагменного парового уплотнения лабиринтового типа представлен на рисунке 3.3.

В зависимости от параметров рабочей среды, конструкции цилиндра и других факторов диафрагмы оформляются конструктивно по-разному [21].

Диафрагмы паровых турбин «несут» на себе направляющий лопаточный аппарат. В зависимости от условий работы в турбине конструкции направляющих лопаток разнообразны.

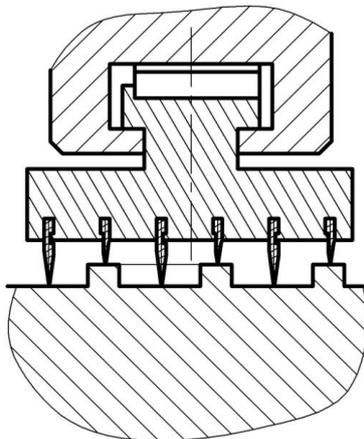


Рисунок 3.3 – Сегмент диафрагменного парового уплотнения лабиринтового типа

В современных паровых турбинах применяют различные типы диафрагмы [22-24]:

- литые стальные или чугунные. Отдельно изготовленные лопатки таких диафрагм устанавливаю в литейную форму и заливают обод и тело диафрагмы. Литые диафрагмы используются преимущественно в ЦНД. Такой тип диафрагмы представлен на рисунке 3.4, а;

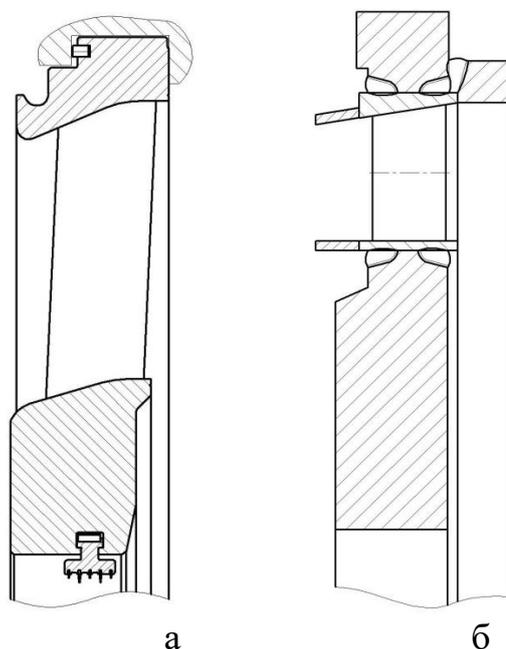


Рисунок 3.4 – Разновидности диафрагм:

а – литая диафрагма; б – сварная диафрагма

- сварные, изготавливаемые из проката или стальных поковок; лопатки таких диафрагм соединяются с ободом и телом электросваркой. Сварные диафрагмы применяют в области высоких давлений и температур, где высоты сопловых лопаток малы. Литые при малых высотах не может обеспечить

достаточной точности изготовления. Сварной тип диафрагмы представлен на рисунке 3.4, б;

- наборные, применяемые на первых ступенях, имеющих незначительную высоту лопаток, и где требуется точное соблюдение формы размеров каналов. Для таких диафрагм применяют цельнофрезерованные лопатки, для которых можно обеспечить высокое качество обработки. Наборный тип диафрагмы представлен на рисунке 3.5.

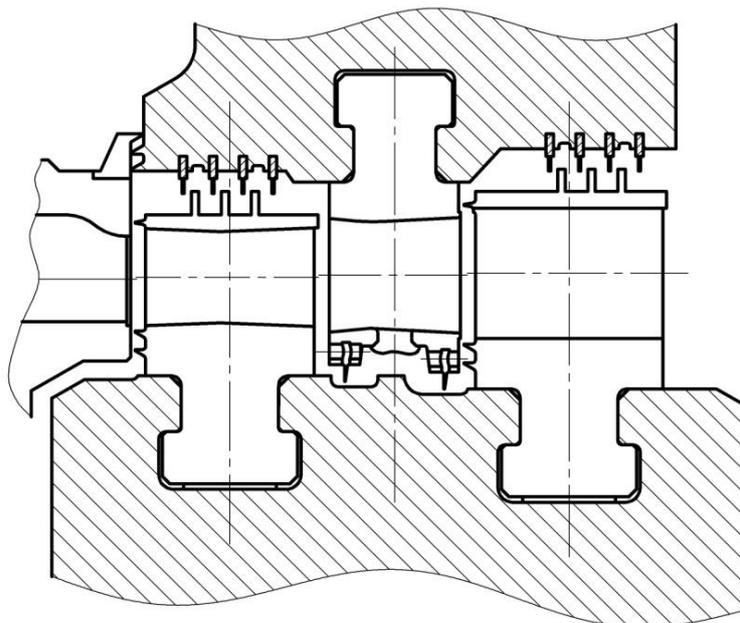


Рисунок. 3.5 – Наборная диафрагма

В турбинах УТЗ применяются направляющий аппарат двухвенечной регулирующей ступени высокого давления, направляющий аппарат первой ступени турбины с дроссельным и сопловым («квазидроссельным» – по терминологии, предложенной МЭИ) парораспределением и направляющий аппарат первой ступени среднего давления. Направляющий аппарат двухвенечной регулирующей ступени состоит из ковanej стальной обоймы из двух половин с круговым Т-образным пазом. Такая конструкция представлена на рисунке 3.5.

Направляющие лопатки с относительно небольшой рабочей частью выполняют с постоянным по высоте профилем. Направляющая лопатка с постоянным по высоте профилем представлена на рисунке 3.6, а. Как правило, такие лопатки применяются в ступенях высокого давления и первых ступенях среднего давления. Следующие лопатки по направлению движения пара выполняются с закрученным профилем (переменным по высоте).

Направляющая лопатка с переменным по высоте профилем представлена на рисунке 3.6, б.

Направляющие лопатки можно классифицировать по типу крепления бандажа:

- направляющие лопатки с цельнофрезерованным бандажом. Бандаж в такой конструкции выполняется заодно с лопаткой, что показано на рисунке 3.6, а, б;

- направляющие лопатки с приварным бандажом, в которых бандаж крепится посредством сварки;

- направляющие лопатки комбинированного типа, входящие в конструкцию диафрагмы «венцового» типа. В такой конструкции лопатка выполнена заодно с телом, а наружный бандаж и обод привариваются.

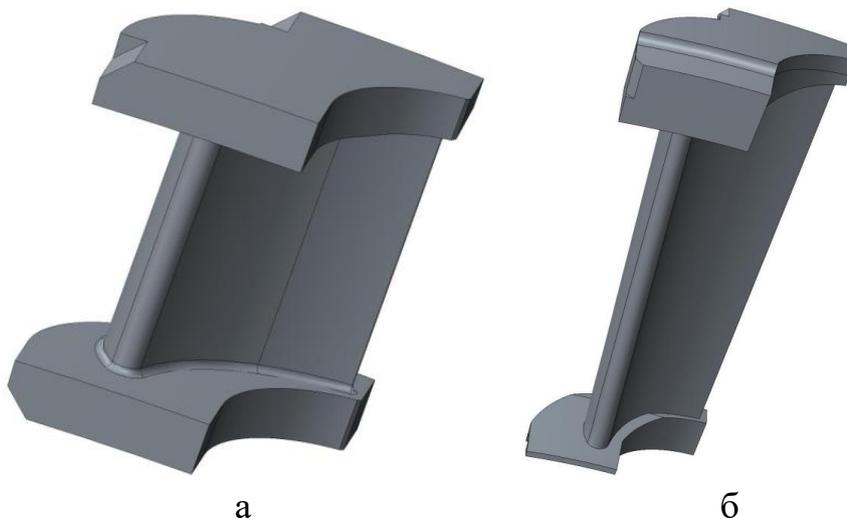


Рисунок. 3.6 – Направляющие лопатки:

а – с постоянным профилем; б – с переменным профилем

Направляющие лопатки комбинированного типа или «венцового», выполненные моноблоком с телом половины диафрагмы «венцового» типа, представлены на рисунке 3.7.

В связи с научно-техническим совершенствованием технологий изготовления на УТЗ активно развивалась тенденция к снижению количества сварки в диафрагмах паровых турбин. Диафрагма – это один из самых ответственных узлов турбины, а для сварщиков это еще и самый сложный



Рисунок. 3.7 – Направляющие лопатки комбинированного типа моноблоком с телом половины диафрагмы «венцового» типа

узел, поэтому специалисты СКБт УТЗ начали разработку новых конструкций для того, чтобы упростить работу по изготовлению диафрагм.

Так появились разработки конструкций диафрагм с «венцовыми» лопатками и диафрагм с цельнофрезерованными бандажами. Конструкция диафрагм с «венцовыми» лопатками на УТЗ началась с турбины типа Т-125/150-12,8 (до 7-й ступени ЦВД), затем было решено применить такие диафрагмы и для турбины типа Т-295/335-23,5 (также до 7-й ступени ЦВД включительно) и для турбины типа К-65-12,8 для Сахалинской ГРЭС-2. 3Д-модель диафрагма 5-й ступени ЦВД турбины типа Т-295/335-23,5 представлена на рисунке 3.8.

Данная конструкция диафрагм экономически оправдана с точки зрения изготовления, если длина лопатки не превышает 67 мм. Главным преимуществом такой конструкции является то, что очень точно выполняется проточная часть цилиндра, а также уменьшается усадка и разношаговость решетки по сравнению с диафрагмами, где лопатка вваривается в бандаж, а затем приваривается к телу и ободу.

По типу изменения расхода пара различают диафрагмы соплового типа, изменяющие за счет поворотного кольца количество каналов полного сечения, через которые проходит пар, и диафрагмы дроссельного типа, изменяющие за



Рисунок 3.8 – Диафрагма 5-й ступени ЦВД турбины типа Т-295/335-23,5

счет поворотного кольца площадь входного сечения каждого направляющего канала.

В турбинах УТЗ находят применение, главным образом, диафрагмы дроссельного типа как более простые в изготовлении и эксплуатации [21].

Для предотвращения появления потоков влаги, выпавшей на поверхность проточной части диафрагмы, на поверхность тела и обода перед входом в межлопаточный канал механической обработкой выполняется микрорельефная поверхность. Участки выходной кромки, прилегающие к телу и к ободу диафрагмы, прорезаются на длине 35...50 мм щелью шириной 5 мм, что способствует дроблению капель влаги при срыве с профиля по кромке щели, чем снижается интенсивность эрозионного разрушения входной кромки рабочей лопатки.

В последних ступенях теплофикационных турбин применяют направляющие лопатки с внутриканальным влагоудалением для повышения эрозионной надежности их работы за счет полного отвода пленочной влаги в периферийной части ступени.

Со стороны их выходных кромок выполнена сквозная проточка, длина которой составляет от 0,2 до 1 шага лопаток. Пример такой лопатки представлен на рисунке 3.9. Лопатка выполняется полой с щелью на «корытце».

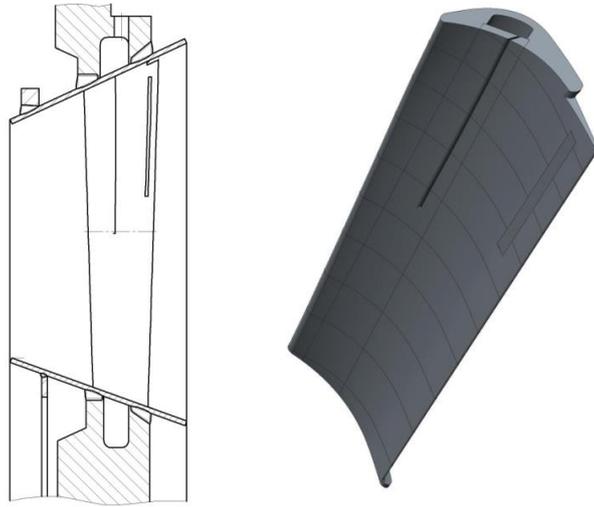


Рисунок 3.9 – Направляющая лопатка с внутриканальным
влагоудалением

Особый вид представляют собой регулирующие поворотные диафрагмы, 3Д-модель которых представлена на рисунке 3.10. Они устанавливаются непосредственно за камерами регулируемых отборов и изменяют под воздействием системы регулирования расход пара, направляемого в отбор, и расход пара, направляемого в последующие ступени. Регулирующая диафрагма состоит из двух основных частей – собственно диафрагмы с профилированными направляющими каналами и поворотного кольца, устанавливаемого со стороны входа пара в диафрагму.

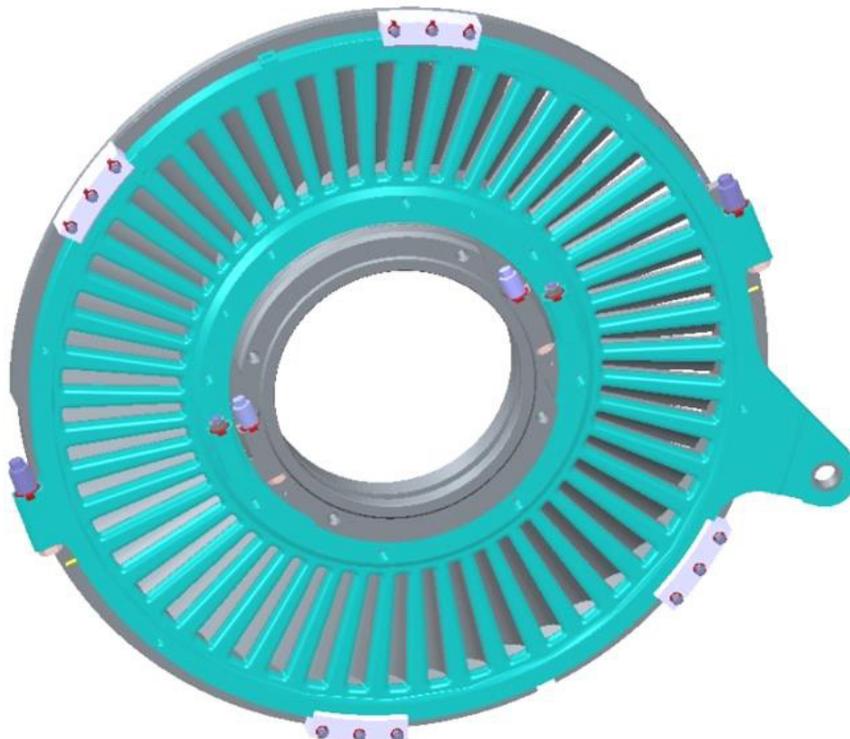


Рисунок 3.10 – 3Д-модель регулирующей поворотной диафрагмы

Конструкция диафрагм с цельнофрезерованными бандажами впервые разработана для турбины типа Т-113/145-12,4, когда в 2008 году было принято решение отказаться от диафрагм, отлитых из чугуна, потом такую же конструкцию применили и на турбины ПТ-65/75-12,8, Т-120/130-130-8МО, Т-50/60-8,8, Т-63/76-8,8, Т-125/150-12,8 (начиная с 8-й ступени ЦВД) и на ТНД-17 для универсального атомного ледокола проекта 22220. На рисунке 3.11 представлены: а – диафрагма с цельнофрезерованными бандажами; б – лопатка с цельнофрезерованными бандажами.

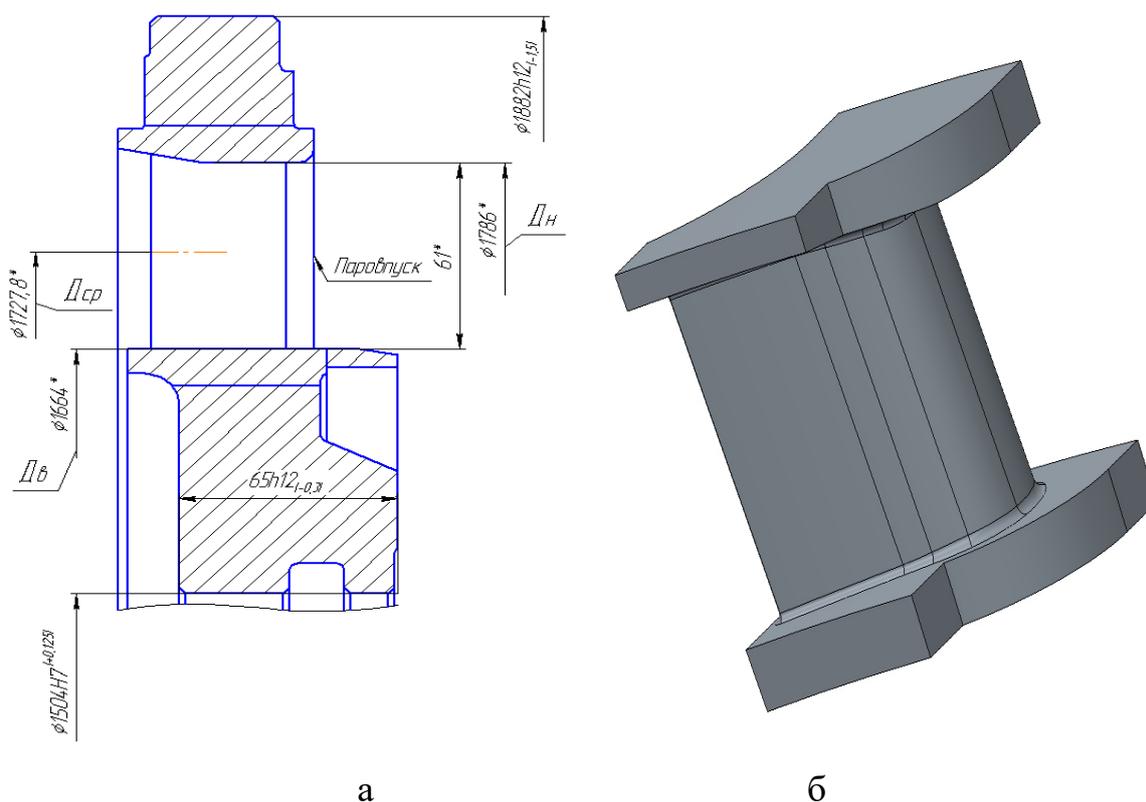


Рисунок 3.11: а – диафрагма с цельнофрезерованными бандажами;

б – лопатка с цельнофрезерованными бандажами

Такая конструкция диафрагмы позволяет уйти от ряда проблем сварных диафрагм:

- усадка и изменение угла установки профиля после сварки диафрагмы;
- неравномерность шагов;
- точность изготовления стыковых поверхностей;
- неточность выполнения горл и шагов.

Данная конструкция диафрагмы требует повышенной точности изготовления лопатки, чего проблематично достичь при изготовлении лопатки

методом механической обработки на станках. Существует более простой способ изготовления лопатки точным литьем, но он достаточно дорогой и не всегда экономически оправдан.

В связи с многообразием конструкций и технологий изготовления различных типов и типоразмеров диафрагм для обеспечения всего номенклатурного ряда паровых турбин УТЗ потребуются значительные временные, трудовые, материальные и финансовые затраты на дублирующие повторные действия по КТПП. К тому же возникают осложнения с внедрением параметрических АРМов разработки диафрагм, а также сложности разработки и внедрения концепции модульного создания паровых турбин, ввиду затруднения унификации смежных статорных элементов цилиндров (корпуса, обоймы и т.д.). Поэтому возникла крайняя необходимость создания системы классификации паровых диафрагм и используемых в процессе их производства стандартных комплектующих. Классификатор позволяет создать единую систему, которая будет доступна всем специалистам единого информационного поля, не будет нуждаться в дополнительных описаниях и разъяснениях при поиске и использовании образцов библиотеки.

При прочих равных условиях классификация в PDM/PLM-системе позволяет достичь цели по сокращению трудоемкости и длительности КТПП за счет исключения разработки дублирующих конструкций деталей и узлов, техпроцессов, инструмента, оснастки, а также предотвращения расширения номенклатуры прочих, стандартных изделий, инструмента и материала, что дополнительно позволит:

- организовать централизованное управление информацией о стандартных, типовых и пр. изделиях и конструктивных элементах в пределах всего предприятия;
- снизить вероятность повторного проектирования дубликатов деталей за счет их классификации (по классам критичности, по форме основных

поверхностей, габаритам и функциональному назначению, по способу изготовления на станках с ЧПУ и/или универсальных и пр.);

- обеспечить контроль и оптимизацию процессов для создания и многократного использования компонентов/элементов конструкции;

- обеспечить высокоскоростной параметрический поиск и инструменты сравнения, обеспечивающие многократное использование предпочтительных компонентов;

- сформировать ограничительный перечень (применяемость изделий) для службы или всего предприятия.

Поиск деталей занимает большое количество времени, которого не хватает собственно на проектирование, ведь инженеры тратят от 5 до 25% рабочего времени на поиск корректных деталей, проверку и перерисовку стандартных деталей. В среднестатистическом изделии может применяться до 70% повторно используемых деталей, отсюда и возникают большие временные затраты:

- сокращается количество времени на повторное применение наработок;

- сокращается количество времени на отработку новых компонентов и технологий;

- увеличиваются затраты на разработку.

Описанные выше проблемы определяют потребность в изменении подхода к разработке повторяющихся изделий. Поиск же на основе критериев сокращает число выводимых результатов, что упрощает принятие решений.

Рабочей группой конструкторов и расчетчиков СКБт УТЗ была составлена подробная классификация актуализированных конструкций диафрагм паровых турбин, используемых УТЗ при производстве паровых турбин за период 2007-2017 годов. Карта классификации вышеописанных типов диафрагм представлена на рисунке 3.12.

Представленная классификация позволяет выполнить требования к АРМам разработки всех типов диафрагм, а также выполнение требований к смежным сопрягаемым компонентам, которые формируют стандартные библиотечные модули концепции.

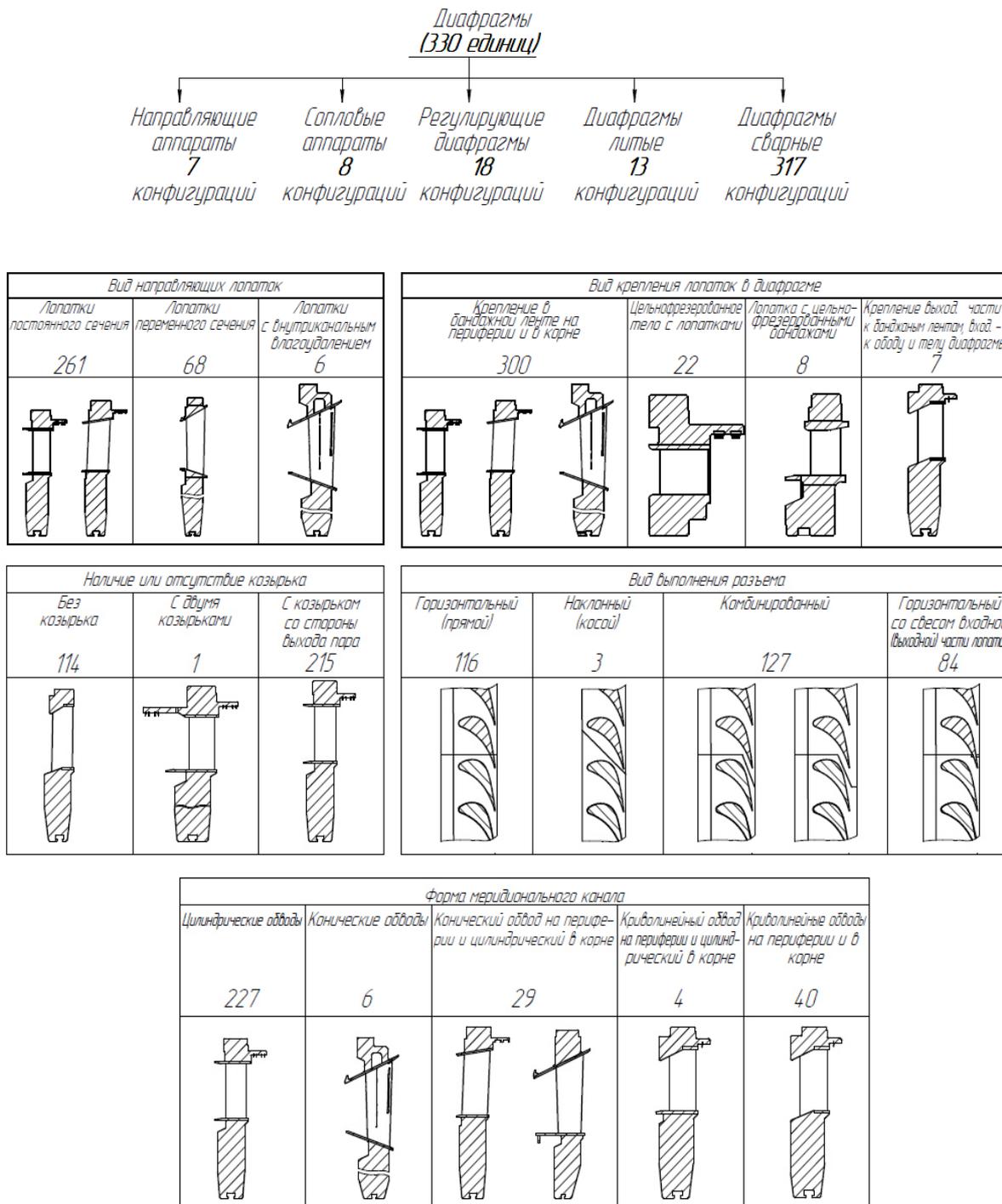


Рисунок 3.12 – Карта классификации диафрагм паровых турбин УТЗ

При этом в периметр ЕРК добавлены дополнительные расчеты [25, 26], позволяющие выполнять оценку сопряжения библиотечных модулей с параметрическими модулями. На рисунке 3.13 изолиниями представлены осевые перемещения ротора и статора относительно своего положения в

холодном состоянии турбины Т-40/50-8,8. Такой расчет выполнен по специально разработанной методике с использованием численных инженерных расчетов против укрупненной аналитической оценки при традиционных подходах КТПП.

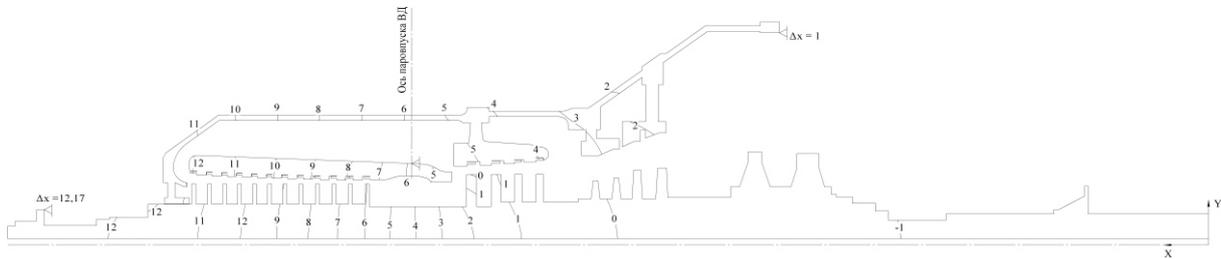


Рисунок 3.13 – Картина тепловых перемещений ротора и статора турбины при пуске турбины Т-40/50-8,8 из холодного состояния

По итогам выполнения расчета по определению относительных перемещений ротора и статора турбины на различных режимах работы выбираются аксиальные зазоры по проточной части, которая формируется путем набора диафрагм (параметрических модулей) в модули статорных элементов.

ГЛАВА 4. УНИФИКАЦИЯ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА

Развитие темы модульного проектирования и модульной технологии в отечественном и зарубежном машиностроении проходило с 50-х годов и объяснялось необходимостью совершенствования производства, которое на тот момент развивалось стихийно с отсутствием общей идеи, точно с использованием различных подходов и методов. Советскими специалистами (Базров Б.М., Васильев А.Л., Балакшин Б.С. и др.) по развитию машиностроительного производства признавалось, что развитие машиностроительного комплекса не происходило «как единого целого», а осуществлялось стихийно, неравномерно, нерационально, а многочисленные разработки не «поддавались учету, что делало машиностроение необозримым, а процесс его развития – неуправляемым». Энергомашиностроение не было исключением и турбостроение, в частности, также. Попытки упорядочить, стандартизировать и унифицировать разработки турбинного оборудования не увенчивались существенным успехом, так как последнее является значительно наукоемким, требующим расчетных и эмпирических исследований и натурных испытаний, выпускалось даже тогда относительно мелкими сериями, что на тот момент усугублялось взрывным ростом объема научно-технических внедрений и ростом установленной мощности как оборудования, так и в целом энергетических объектов. Другими словами, развитие машиностроительного производства попросту не успевало за эволюцией турбинного оборудования и профилей энергообъектов. Причем газотурбостроение использует большую унификацию, чем паротурбостроение, что объясняется еще большей наукоемкостью и трудоемкостью разработки. Ведь даже внегласно принято считать, что паротурбинное оборудование входит в разряд серийного начиная со второго-третьего образца, а газотурбинное – с пятидесяти первого, и это фактически определяет невозможность и убыточность создания и производства единичных образцов газовых турбин, а заказчикам необходимость останавливать свой выбор на ограниченных уже имеющихся предложениях производителей.

Вопросам унификации, совершенствования конструкции и ЖЦ паровых турбин и турбинного оборудования посвящено большое количество работ, выполненных различными профильными и специализированными организациями и заводами-изготовителями паровых турбин. Большой комплекс задач по унификации отдельных узлов и в целом паровых турбин, а также совершенствованию инструментов и средств разработки, производства, эксплуатации и управления ЖЦ паротурбинного оборудования решен учеными и разработчиками Щегляевым А.В., Кирилловым И.И., Трояновским Б.М., Костюком А.Г., Трухнием А.Д., Грибиным В.Г., Андриюшиным А.В., Кирюхиным В.И., Мильманом О.О., Кирюхиным А.В., Косяком Ю.Ф., Бузиным Д.П., Бененсоном Е.И., Баринбергом Г.Д., Бродовым Ю.М., Урьевым Е.В., Похорилером В.Л., Петреней Ю.К., Михайловым В.Е., Хоменком Л.А., Орликом В.Г., Шаргородским В.С., Розенбергом С.Ш., Плоткиным Е.Р., Иоффе Л.С., Авруцким Г.Д., Лейзеровичем А.Ш., Гаевым В.Д., Лисянским А.С., Мурманским Б.Е. и др.

«Тупик» предельной унификации, типизации и стандартизации ограничивает и останавливает развитие продуктов и их производства, поэтому нужна новая идея, позволяющая обеспечить единый системный подход к развитию и росту вплоть до взрывного на фоне остановившихся конкурентов. Такой новой идеей или идеологией может стать методологическое применение модульного принципа создания оборудования с одновременной цифровой трансформацией предприятия, что должно быть реализовано с методологической и административной поддержкой перехода загруженного предприятия со «старых» подходов на «новые».

Применение комплексного подхода к внедрению модульного подхода с одновременной цифровой трансформацией энергомашиностроительных предприятий открывает широкие возможности для повышения конкурентоспособности, а дальнейшее ведение операционной деятельности с использованием такой концепции – к взрывному росту компании.

Еще одной современной тенденцией развития производства является применение оперативного управления производством на основе так называемых MES-систем (Manufacturing Execution Systems), выполняющих задачу оперативной коррекции отклонений от производственного плана за

счет многократного оптимального перепланирования по реальному состоянию оборудования и производственных заказов. Такие проекты развития позволяют до 50 % увеличить скорость прохождения заказов в производстве, повысить коэффициент загрузки оборудования, снизить объемы незавершенного производства и тем самым повысить процент выполнения заказов в срок. Однако эффективность и вообще успех использования систем оперативного управления производством напрямую зависит от автоматизации КТПП и управления ЖЦИ, высокий уровень которых, по глубокому убеждению авторов, достигается только при использовании модульной концепции.

Развитие этой темы в паротурбостроении носило эволюционный характер до перехода к конкуренции в рыночных условиях, фактически в конце 90-х начале 2000-х годов. В этот период времени потребовалась разработка методов, позволяющих комплексным образом обеспечивать требуемые технические характеристики паровых турбин с максимальным сокращением сроков изготовления и минимизацией затрат в производстве, эксплуатации, модернизации и сервисе паровых турбин и ПТУ. В первую очередь это могло достигаться через совершенствование конструкции и переход к проектированию и изготовлению на базе крупных блоков, сборочных единиц, состоящих из унифицированных деталей, то есть модулей нового поколения.

Теперь что касается оценки предприятия по уровню унификации / модульности продукции. Для того чтобы сформировать методику оценки предприятия, разрабатывающего и производящего паротурбинное оборудование, изучим и проанализируем историю и опыт развития машиностроения и энергомашиностроения и определим, почему в сегодняшнем цифровом и технологичном профессиональном мире, который глубоко и детально проработал принципы и подходы теоретических основ разработки и производства машин и оборудования, не имеет смысла использовать сложные методологические средства оценки уровня унификации продукции, а стоит разработать и остановиться на упрощенной методике, основывающейся на использовании ограниченного ряда критериев и упрощенной шкале оценки.

Прежде чем изучить историю машиностроения и выстроить хронологию развития подходов создания и производства паротурбинного оборудования, хочется остановиться на двух тезисах. Первый – из резолюции XXI съезда Коммунистической партии Советского Союза по отчету Центрального Комитета КПСС: «...быстрее внедрять в производство новейшие достижения науки и техники, прогрессивную технологию, передовой опыт...», которая указывает на то, что в отечественной промышленности второй половины XIX и первой половины XX века теория деталей и машин, которая определяла теоретические основы конструирования оборудования, не успевала за конструированием и его производством. В такой ситуации конструктор больше изобретатель и под каждые параметры для каждого назначения разрабатывает индивидуальное оборудование. Второй тезис исходит от специалистов-аналитиков, которые изучают мировой опыт больших провалов крупных компаний и феномены экспоненциальных компаний, которые развивались взрывным ростом – если создатель выводит на рынок отработанный товар, а это происходит через длительный промежуток времени после задумки о его создании, то есть полностью удовлетворяет покупателя, то он уже опоздал с выходом товара на рынок. Создатели экспоненциальных компаний указывают, что человечество научилось создавать быстроразвивающиеся, высокоэффективные и дешевые технологии, и пришло время создавать организации, использующие такие технологии. Другими словами, если вам нестыдно выпускать ваш продукт на рынок, значит, вы выпускаете его слишком поздно. В [27] указывают на то, что «...экспоненциальные организации опираются на информационные технологии, которые переводят то, что некогда существовало в физической, материальной форме, в цифровую форму и делают доступным для всех и каждого».

Теперь что касается развития конструктивной нормализации, технологичности, унификации узлов и оборудования, использования подходов модульного проектирования.

В первой половине XIX века практически все конструкции оборудования, машин и механизмов разрабатывались и производились индивидуально:

- как изобретение без теоретических основ конструирования;
- на частные условия работы без обобщений;
- без системного подхода к используемым технологиям;
- отсутствие связи между конструктивными и технологическими решениями;
- преимущественно с целью повышения надежности и эксплуатационных функциональных свойств продукции выполнялись с моноблочными конструкциями;
- не уделялось достаточное внимание производительности труда;
- не использовалась конструктивная и технологическая преемственность;
- не использовалось даже размежевание заводов.

В 70-е годы в РСФСР перед экономикой ставились амбициозные задачи, то есть технический прогресс должен был обеспечить подъем во всех сегментах промышленности, сельском хозяйстве, строительстве, медицине, образовании, что, без сомнения, определяется уровнем развития машиностроения и, в частности, энергомашиностроения, как драйвер такого развития. Аналогичные задачи ставились и перед экономикой других стран, которые стремились быстро обеспечить технический прогресс и технологический прорыв за счет оснащения всех отраслей производительными технологиями, оборудованием, инструментами автоматизации.

Наращивание мощностей производства не давало требуемого кратного роста высокопроизводительного эффективного оборудования, то есть как раз экспоненциального роста, что требовало другой идеологии и подходов.

Новые взгляды отечественного машиностроения были построены на принципах, которые упрощенно можно сформулировать следующими тезисами:

- разработка и использование теоретических основ конструирования оборудования, теории деталей машин взамен интуитивных подходов;
- обобщение частных случаев, различных по назначению оборудования, конструкторским и технологическим решениям;

- оценка используемой технологии на рациональность в рамках конструкторской подготовки производства, а не после окончательной разработки конструкции оборудования, то есть использовался синтез конструктивных и технологических решений;

- одновременное решение ряда смежных задач, формирующих и даже предопределяющих сразу и функциональную, и технологическую преемственность ранее изолированных конструкций оборудования, приспособлений и оснастки для производства таких конструкций;

- поиск и объединение конструкций и технологий по общим признакам, что позволяет повысить унификацию узлов конструкций и технологии изготовления и, как следствие, перенести методы крупносерийного производства в мелкосерийное;

- реализация подходов по вышеуказанным принципам позволяет комбинировать различное оборудование из одних и тех же узлов и модифицировать путем замены отдельных узлов с сохранением остальных без изменения;

- выстраивание нормализованных рядов и формирование номенклатуры оборудования на предприятиях и иногда в отрасли между предприятиями как с использованием, так и без использования межзаводской кооперации против размежевания;

- повышение производительности за счет конструктивной, технологической преемственности, переработки конструкций оборудования под объем выпуска и других факторов прогресса машиностроения.

Эволюционные этапы развития КТПП и собственно производства в РСФСР и России паровых турбин авторы разделили на восемь этапов, которые показаны на рисунке 4.1.

На первом этапе в период с 1905-го до 40-х годов XX века в Советском Союзе, в паротурбостроении, как во всем машиностроении, преобладала моноблочность конструкций, что порождало увеличенные массогабаритные характеристики литых корпусов и, как следствие, турбин с индивидуальными решениями, разрабатываемыми для конкретного функционала, диктуемого условиями эксплуатации и целевого назначения, и выпускались единичными образцами.

На втором этапе 40 – 50-х годов XX века отечественное производство паровых и газовых турбин характеризуется обобщением различных частных взглядов на конструкции и технологию производства, причем независимо от разного типа и назначения основного турбинного оборудования. При этом данный период связан с внедрением теоретических основ деталей и машин, использованием нормализованного направления конструирования, развитием материаловедения и автоматизации производства. Однако важно отметить, что из изучения подходов к КТПП и анализа конструкции, выпущенного в тот период турбинного оборудования следует, что внедрение теоретических знаний и разработанных основ значительно отстает от практики создания и производства такого оборудования. Только в 60-е годы в отечественном паротурбостроении наблюдается создание первых мелкосерийных образцов паровых турбин отдельными семействами на НЗЛ, ХТГЗ (ХТЗ), ЛМЗ, КТЗ, УТМЗ (УТЗ, ТМЗ), БМЗ. На НЗЛ на базе турбин типа АК-6 и АК-4 был сформирован конструктивно-нормализованный ряд паровых турбин на параметры пара – 35 кгс/см², 435 °С и мощностью 4 и 6 МВт. Тем самым появились номенклатурные ряды паровых турбин типа АП-6, АТ-6, АК_в-6 и АК-4, АП-4, АТ-4, АР-4 с высокой долей унификации узлов и деталей, что позволило применять высокопроизводительные технологии и методы, используемые при крупносерийном производстве. С ростом установленной мощности паровых турбин, увеличением числа цилиндров и расширением номенклатуры вопрос унификации не только усложнялся, но и становился все более острым. Так, на ЛМЗ при производстве паровых турбин уже стояла более сложная задача по созданию конструктивно-нормализованного ряда турбин мощностью от 25 до 100 МВт. Разработан ряд на параметры пара – 90 кгс/см², 480...535 °С и мощностью 25, 50 и 100 МВт: ВК-25, ВТ-25, ВПТ-25, ВК-50 и ВК-100. В ходе разработки таких турбин ряда удалось без ущерба технико-экономическим показателям оборудования унифицировать облопачивание, выхлопные патрубки, парораспределение, подшипники, уплотнения и крепеж. При этом важным достижением этапа стала и унификация заготовок. Решение таких задач предопределило начало следующего этапа развития.



Рисунок 4.1 – Этапы эволюции отечественного паротурбостроения

На третьем этапе, который на разных предприятиях начался в разные годы в период 50 – 60-х годов, что зависело преимущественно от широты выпускаемой предприятием номенклатуры оборудования, конструкции турбин разных типов К, Т, ПТ и разных мощностей, а также смежное оборудование газовых и гидротурбин анализировались еще на стадии проектирования на предмет общих признаков. То есть устанавливалась конструктивная и технологическая преемственность, использование которой позволяло размежевать заводские производственно-технологические цепочки и разделять производство конкретной номенклатуры в отдельных цехах и тем самым формировать в этих цехах или участках производство с применением крупносерийного изготовления деталей и узлов, унифицируемых по своей сути в мелкосерийном производстве турбинного оборудования. Большинство номенклатурных рядов оборудования построены по смешанному принципу: назначение и характеристики (параметры и показатели).

Следующий, четвертый, этап, проходящий в 60-е, 70-е годы стоит охарактеризовать выстраиванием номенклатурных рядов паровых турбин после разделения отечественных турбинных заводов по преимущественной специализации: теплофикационные турбины, конденсационные средней и большой мощности, приводные малой мощности, транспортные, наземные и подводные, паровые турбины для АЭС. Например, ТМЗ (УТЗ) специализировался на выпуске теплофикационных паровых турбин мощностного ряда от 6 до 100 МВт разных типов, произведя несколько групп как единые серии с общими конструктивными решениями и в связи с этим широкой унификацией: 6-25 МВт; 40-100 МВт [21, 22, 28].

Согласно [30] в турбинах группы 40-100 МВт типа Р-40-130/31, Т-50-130, Т-50/60-130, Т-60-130-6, ПТ-50/60-130/7, Т-100/120-130, Т-100/120-130-2, Т-110/120-130-3, Т-110/120-130-4 одновременно с применением унификации значительные ресурсы затрачивались на оптимизацию и отработку унифицированных узлов и достигалось «комплексное повышение эффективности в сравнении с ранее выпускавшимися турбинами за счет следующих основных решений:

- снижения температурного отвода теплоты из цикла путем организации двухступенчатого подогрева сетевой воды, исключения дросселирования пара, уменьшения потерь давления в трубопроводах отбора и недогревов в сетевых подогревателях;

- рационального выбора конструкции турбины исходя из условия совместной работы теплофикационной турбины и тепловых сетей, аэродинамической отработки лопаточного аппарата и элементов парового тракта;

- исключения потерь теплоты с паром, поступающим в конденсатор, работы турбины с регулируемые отборами пара в режиме теплового графика (режим с противодавлением);

- обеспечения высокой эксплуатационной надежности и коротких сроков освоения нового оборудования;

- повышения степени автоматизации турбины и всей турбоустановки».

Такие подходы по унификации конструкторских и технологических решений внутри ограниченных групп и семейств, а также использование конструкторско-технологического синтеза позволяют ограничить выпускаемую номенклатуру паровых турбин и значительно повысить уровень унификации на конкретных предприятиях. Например, выпуск до двух в месяц однотипных турбин типа Т-100-130 на ТМЗ и двух в месяц однотипных турбин типа К-100-130, К-200-130 и К-300-240 на ЛМЗ, являющихся базовыми основаниями для других выпускаемых турбин групп и семейств, позволяло загрузить конкретные станки выполнением однотипных операций, а участки производством однотипных изделий.

Пятый этап, в период конца 60-х и 70-х годов, для отечественного паротурбостроения является логическим продолжением развития турбинных заводов и их конструкторских бюро, характеризуясь формированием современного ряда таких предприятий. При этом, несмотря на рост единичной мощности агрегатов и, как следствие, расширение номенклатурного ряда и увеличение количества групп и семейств, вновь проектируемые турбины учитывали подходы КТПП. На ЛМЗ выпущена серия турбин типа К-800-240 в одновальном исполнении, на ХТГЗ – К-500-240, а ТМЗ – турбин типа

P-100-130/15, а затем типов Т-250/300-240, ПТ-135/165-130/15. На данном этапе новые турбины выпускались с учетом развития унификации и преемственности.

На шестом этапе, в 80-е годы, номенклатурные ряды предприятий еще расширяются за счет новых образцов турбин внутри групп и модификаций ранее выпускаемых турбин, например, на ТМЗ появились турбины типа ПТ-140/165-130/15-2 (3), Т-175/210-130 и Тп-185/220-130. Тем самым несмотря на сохранение общих принципов создания паровых турбин, общий уровень унификации значительно снизился.

На седьмом этапе развития отечественного паротурбостроения, в 90-е и 2000-е годы, вопрос разунификации усугубился уменьшением рынков сбыта, снижением спроса и увеличением конкуренции на «рынках покупателя», что привело в условиях гонки за сроками и демпинга к индивидуальным проектам по индивидуальным запросам «горячих голов» заказчиков, вовлечением в индивидуальные проекты незавершенного производства и складских запасов. Так в постперестроечный период в условиях выживания выполнялись индивидуальные проекты, которые в дальнейшем ни разу не повторялись.

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 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 будет неэффективно. 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 подлинником и ассоциативными связями на всех этапах подготовки производства. На рисунке 4.2 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.



Рисунок 4.2 – Современная концепция развития турбинного предприятия

Значительное повышение эффективности оборудования и его ЖЦИ 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.

Трудоемкость работ по созданию и производству сложного наукоемкого основного и вспомогательного оборудования настолько велика, что совершенно точно технически и экономически оправдан отказ от индивидуального проектирования и производства. Следует использовать не только унификацию, но и четко отлаженные принципы и методологию, позволяющие применять глубоко проработанный модульный подход с разносторонне и многофакторно оптимизированной архитектурой конструкции и компоновки оборудования и собственно самих модулей.

Развитие отечественного энергомашиностроения особенно в последние годы показало, что текущий и перспективный уровни конкурентоспособности могут быть обеспечены за счет радикального увеличения степени унификации и внедрения модульных конструкций паровых турбин. Это положение также подтверждается направлением развития основных мировых компаний разработчиков и производителей такого оборудования.

Опыт развития и новые требования рынка указывают на актуальность разработки и реализации модульной конструкции паровых турбин.

Разработка модульного принципа создания оборудования и, в частности, турбинного оборудования, является основополагающей группой задач, решение которых приводит к значительному росту эффективности деятельности энергомашиностроительного предприятия за счет унификации и стандартизации, которые позволяют снизить долю единичного индивидуального производства.

ГЛАВА 5. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ УНИФИКАЦИИ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ПРАКТИКЕ ТУРБОСТРОЕНИЯ

Модульный принцип используется достаточно давно, в отечественном паротурбостроении с 50-х годов XX века (второй этап, обозначенный авторами), то есть с начала внедрения теоретических основ деталей и машин и использования нормализованного направления конструирования. Однако до сих пор в машиностроении, и турбостроении в частности, не разработаны научные основы, и есть только лоскутные методики, подходы и принципы без формирования концепции.

Развитие отечественной истории унификации и 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, что связано с потребностью стремительного роста энергетики, которая несколько запаздывала за ростом промышленности. Такие задачи решались с созданием одновременно быстроходных турбин мощностью 50 и 100 МВт с частотой вращения 3000 об/мин, что решало задачи двух этапов удвоения единичной мощности [29]. Одна из самых наукоемких задач, разработка последней ступени, была общей для этих турбин: однопоточной для одноцилиндровой К-50-90 с одновенечной регулирующей ступенью и двухцилиндровой с двухпоточным ЦНД К-100-90. Помимо такой унификации, на этом этапе развития паротурбостроения использовалась прогрессивная унификация: ступени ЧНД в целом, элементы ЦВД с паровыми коробками, передний подшипник, узлы регулирования, выхлопные патрубки и др. Такие подходы и решения с учетом опыта разработки, производства и эксплуатации использовались и на ЛМЗ, и на ХТГЗ, что позволяло быстро развивать энергосистемы. Однако формирование расширенного ряда паровых турбин различного типа, мощности и решений приводило к разнообразию типоразмеров и к конструктивно-технологическим излишествами, что неблагоприятно сказывалось на унификации в номенклатурном ряду каждого завода и увеличении стоимости, сроков разработки и изготовления и, как следствие, необоснованной загрузке ресурса конструкторов, технологов и

дефицитных, особенно на тот период развития, производственных мощностей. В тот момент стали очевидными проблемы дефицита ресурса сопровождающего ЖЦ оборудования и необходимость формирования профиля номенклатурного ряда с учетом горизонта планирования развития и различных уровней унификации оборудования в модельном ряду конкретного завода. Снова следует обратить внимание на этапы 3 и 4 эволюции отечественного паротурбостроения, обозначенные на рисунке 4.1.

Согласно источнику [29]: «Стало ясно, что турбины конденсационные с отборами пара и с противодавлением, близкие по расходу свежего пара, следовало проектировать **одновременно** на одном заводе и на базе общих идей как единую серию, по возможности из однотипных узлов и деталей, включая системы регулирования. К концу первого периода отрицательные стороны отступлений от этого принципа построения ряда турбин были уже очевидны».

Задачи по унификации основного и вспомогательного паротурбинного оборудования ставились не только предприятиям, но и головным отраслевым научно-исследовательским институтам, что определяло и позволяло решать сложные, масштабные и при развитии оборудования не только отдельно турбин, а модельных рядов и в целом в связке турбин, котлов, генераторов и вспомогательного оборудования. При этом масштабы касались не только межзаводской или межотраслевой, но и межгосударственной кооперации, так как охватывали страны СССР и СЭВ. Поэтому история развития унификации паровых турбин касается всех этапов развития отечественного энергомашиностроения, имеет свои особенности и достойна отдельного внимания обзора, который основывается на различных источниках, в том числе на общении и совместной работе с участниками тех периодов развития, и отвечает на вопросы достигаемых уровней и подходов к унификации, а также особенностей развития КТПП и влияния развития номенклатурного ряда оборудования советских турбинных заводов.

При разработке и постановке на производство новых турбин, даже несмотря на поставленные стратегические задачи сокращения издержек и повышение уровня конструктивной и технологической унификации в условиях отсутствия опыта в разработке и эксплуатации принципиально

новых образцов техники, принималось решение о разработке не только в рамках детальных эскизно-технических и технических проектов, но и с доведением до производства и эксплуатации сразу нескольких вариантов оборудования с дальнейшим выбором наилучшего. Необходимо отметить, что этапы разработки, подготовки производства и производства с дальнейшими стендовыми и натурными испытаниями с накоплением опыта занимало продолжительные периоды времени, до десятилетия, что предопределяло необходимость в условиях развития экономики семимильными шагами выпускать серийно стандартные турбины со стремлением развития межзаводской и межотраслевой кооперации и унификации.

Важно отметить, что подходы отечественных отраслевых институтов и профильных турбинных заводов к унификации развивались по синусоиде с выбираемыми решениями по повышению уровня унификации и при проектировании некоторых образцов со снижением унификации в пользу индивидуальных решений и увеличения технико-экономических показателей. Такие решения руководителей конструкторских бюро ЛМЗ, ХТГЗ и УТМЗ (ныне – АО «УТЗ») объясняются несколькими факторами, которые преимущественно зависят от персональных решений до жесткости требований проектов. Несмотря на значительные отличия подходов того времени по унификации оборудования и современных методологических модульных подходов, разницу в достигаемых уровнях технико-экономических показателей при разработке индивидуальных проектов паровых турбин, турбоагрегатов и оборудования турбоустановок и с использованием модульных или блочно-модульных подходов иллюстрируется на рисунке 18.5.

Следует отметить, что при необходимости обеспечить самые высокие требования проекта, не удастся добиться их только за счет подбора или адаптации новой проточной части с использованием стандартных библиотечных модулей. Особенно это касается случаев, когда требования проекта имеют значительные отклонения по мощности, параметрам пара и принципиальной схеме турбоустановки. Справедливо добавить, что это касается не только использования платформ или базовых конфигураций в диапазонах больших мощностей и параметров, но и при неоправданном

использовании непрофильного оборудования, например, при отсутствии у производителя/партнера необходимого генератора на 3000 об/мин используется генератор на 1500 об/мин с редуктором, который значительно снижает технико-экономические показатели турбоагрегата и усложняет компоновку как агрегата, так и турбоустановки.

Если же вернуться к роли руководителей, принимающих решения, и развитию отечественного паротурбостроения по синусоиде, то стоит описать возникновение ситуаций, в которых наблюдались разночтения при разработке профилей турбоустановок не только между, например, заводом и отраслевым институтом, но и между отделами конструкторского бюро одного предприятия при разработке разных проектов, например, с новым или модифицированным основным оборудованием. Это зачастую удваивает затраты трудовых и финансовых ресурсов на такие проекты и, что еще важнее, усугубляет дальнейшее развитие централизованного подхода к формированию номенклатурного ряда, модельных рядов внутри него и наполнение библиотеки стандартных модулей.

Если вернуться к эволюционному развитию отечественного паротурбостроения, представленному на рисунке 4.1, то на втором этапе 40 – 50-х годов XX века отечественное производство паровых турбин, характеризуемое обобщением различных частных взглядов на конструкции и технологию производства, создало первые мелкосерийные образцы паровых турбин отдельными семействами на НЗЛ, ХТГЗ (ХТЗ), ЛМЗ, КТЗ, УТМЗ (ныне – УТЗ, ранее также – ТМЗ), БМЗ. Ранее было описано создание номенклатурных рядов паровых турбин типа АП-6, АТ-6, АК_в-6 и АК-4, АП-4, АТ-4, АР-4 с высокой долей унификации узлов, а на ЛМЗ создание конструктивно-нормализованного ряда турбин мощностью от 25 до 100 МВт: ВК-25, ВТ-25, ВПТ-25, ВК-50 и ВК-100, разработанного с высокой долей унификации и без ущерба технико-экономическим показателям оборудования. При этом и на ЛМЗ, и на ХТГЗ широко развивалась унификация при разработке турбин 50 и 100 МВт. Для этого на заводах принималось решение о принятии ведущего, то есть базового типа турбины, технико-экономические показатели которой становились базовыми, целевыми. Правильно

выстроенный ЛМЗ номенклатурный ряд с конструктивной унификацией позволил эффективно использовать межзаводскую унификацию изготовления этого ряда на УТМЗ (ныне – УТЗ) и БМЗ, а в дальнейшем построить УТМЗ на базе этого переданного ряда свой номенклатурный ряд паровых турбин с вовлечением унифицированных узлов ЛМЗ.

Анализируя развитие отечественного и зарубежного паротурбостроения, необходимо обозначить, что на темпы и уровень развития унификации, а впоследствии и модульной концепции оборудования турбинного предприятия оказывало влияние три ключевых базовых принципа:

- правильность определения границ унификации, то есть границ семейства, построенного на одной базе/платформе;
- правильность разделения базовой турбины на модули и подмодули;
- качество обеспечения взаимозаменяемости/применимости модулей и подмодулей, характеризующее затраты на формирование профиля из стандартных библиотечных модулей.

Если по этим ключевым базовым принципам разобрать отечественное паротурбостроение второго этапа, периода 40 – 50-х годов прошлого века, то необходимо обозначить, что был выбран правильный для развития паротурбостроения диапазон мощности от 25 до 100 МВт и ряд 25, 50, 100 МВт с принципиально правильным и благоприятным для модульной концепции и оптимизации конструкции выделением модулей: передняя часть ЦВД, паровые и сопловые коробки, автотаторы и другие узлы системы регулирования, регулирующие клапаны, корпус переднего подшипника, фундаментные рамы. Что же касается качества взаимозаменяемости/применимости модулей, то стоит отметить недостаточное уделение внимания конструкторов тому, чтобы обеспечить возможность формировать профиль турбин совсем без затрат на КТПП, то есть использовать документацию на модули «один к одному». При этом ранее для достижения высоких технико-экономических показателей необходимо было сформировать, отработать и оптимизировать ряд облопачивания от профилей пера рабочих и направляющих лопаток, профилей хвостовиков в целом до лопаток преимущественно ЧСД и ЧНД. Создание академическими, научно-

исследовательскими институтами и заводами альбомов профилей и библиотеки облопачивания позволяло оптимизировать компоненты проточных частей и значительно снизить трудоемкость и продолжительность КТПП новых образцов техники или новых образцов семейств, так как на облопачивание с учетом масштабности и наукоемкости междисциплинарных вопросов с решением сложных расчетно-аналитических и эмпирических тепловых, газодинамических, прочностных, вибрационных, технологических задач приходится доля 40-50 % от общей трудоемкости разработки турбины. Также сокращался размер рядов направляющих и рабочих лопаток: направляющие были преимущественно не только постоянного профиля, но и группами одинаковых профилей, рабочие унифицировались рабочими колесами на разных внутренних расточках, что было связано с использованием одних и тех же степеней в разных температурных зонах при одинаковых Gv проточных частей разных турбин. Примером того времени по повышению уровня унификации ступеней также были ступени ЧВД турбин до 25 МВт, в которых использовалось изменение парциальности за счет закрытия каналов. Такие подходы использовались НЗЛ и КТЗ. Также стоит заметить, что в американских паровых турбинах, например, General Electric большей мощности до 50 МВт и более поздних периодов разработки, просматривались конструктивные сходства с турбинами НЗЛ и использовался тот же подход подбора площадей облопачивания с сохранением высоты ступеней и даже рабочих колес и путем закрытия каналов. Этот же подход является примером снижения КПД облопачивания, а значит, и технико-экономических показателей турбин в угоду повышения уровня унификации, которого добивались в том числе за счет унификации заготовок.

Четвертый этап эволюции отечественного паротурбостроения, проходящий в период 60 – 70-х годов прошлого века, стал важной отправной точкой для ограничения номенклатурных рядов основного и вспомогательного оборудования ПТУ, выпускаемого заводами. Такое ограничение номенклатуры стало возможным, в первую очередь, после разделения отечественных турбинных заводов по преимущественной специализации: теплофикационные турбины, конденсационные средней и

большой мощности, приводные малой мощности, транспортные наземные и подводные, паровые турбины для АЭС.

Итак, стало возможно централизованно сформулировать задачи для каждого турбинного завода и тем самым определить номенклатурные ряды турбин: конденсационные под разные технические задания для ЛМЗ и ХТГЗ с закреплением за ними теплофикационных турбин только комPLEMENTАРНЫХ конденсационным внутри семейства, например, турбины типа Т-180/210-130 ЛМЗ в семействе турбин К-200-130 ЛМЗ; теплофикационные за УТМЗ (ныне – УТЗ).

На рисунке 5.1 представлены схемы основных конденсационных турбин ЛМЗ и ХТГЗ, а на рисунке 5.2 – схемы основных теплофикационных турбин ЛМЗ и УТМЗ, часть из которых легла в основу производства и развития данных отечественных турбинных заводов.

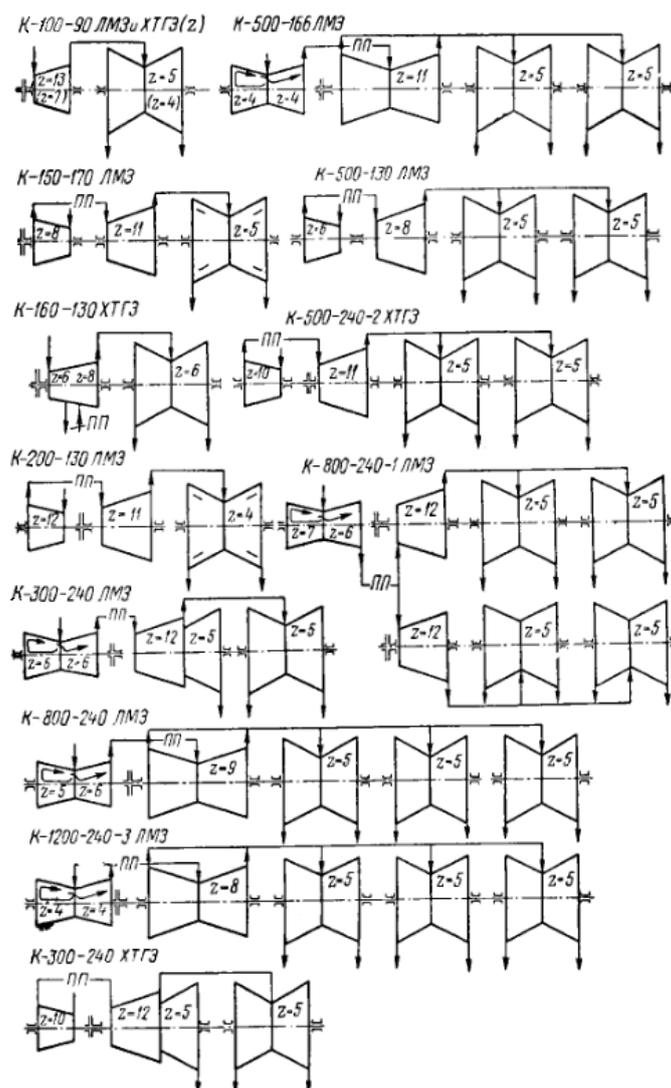


Рисунок 5.1 – Схемы базовых конденсационных турбин типа «К» производства ЛМЗ и ХТГЗ: z – количество ступеней в отсеке

В 1951 году ЛМЗ выпустил самую мощную в Европе паровую турбину типа К-150-170 мощностью 150 МВт на начальные параметры 16,6 МПа и 550 °С и частоту вращения 50 Гц.

В 1958 году ЛМЗ изготовил паровую турбину типа К-200-130 мощностью 200 МВт на начальные параметры 12,75 МПа и 565 °С с промежуточным перегревом до 560 °С, ставшую в дальнейшем одной из базовых турбин для ЛМЗ и одной из основных для отечественной энергетики. Турбина стала базой для семейства турбин, в которое входит, например, турбина типа Т-180/210-130.

В 1960 году на ЛМЗ была разработана и произведена первая турбина на сверхкритические параметры пара (23,5 МПа и 560 °С) с промежуточным перегревом до 565 °С мощностью 300 МВт. Опыт освоения и эксплуатации этой турбины позволил ЛМЗ создать в 1964 году – двухвальную, а в 1970 году – одновальную паровые турбины мощностью 800 МВт также на сверхкритические параметры пара и частоту вращения 50 Гц.

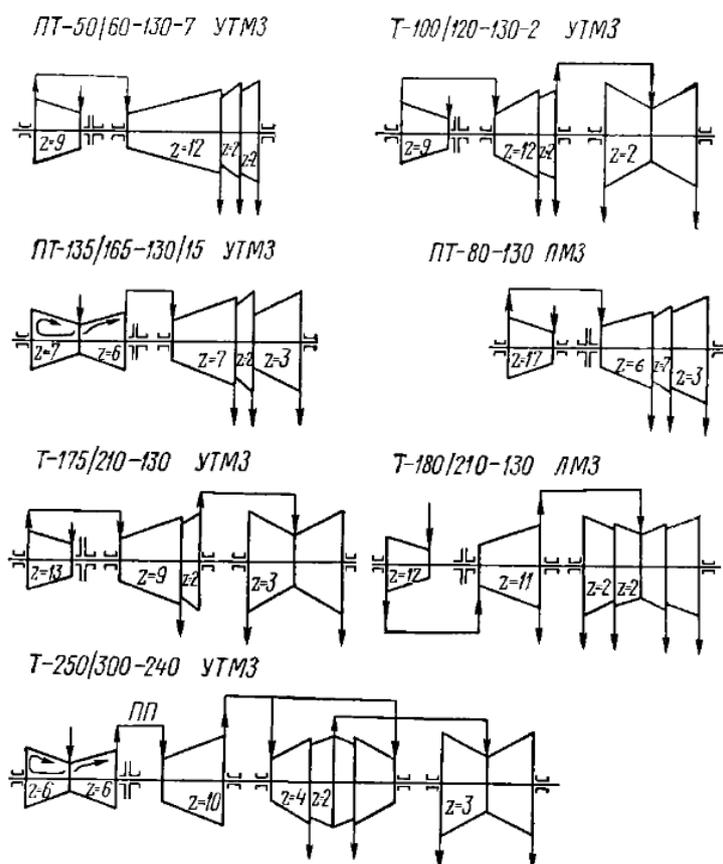


Рисунок 5.2 – Схемы базовых теплофикационных турбин типа «Т» и «ПТ» производства ЛМЗ и УТМЗ (ныне – УТЗ): z – количество ступеней в отсеке

Часть из турбин, схемы которых представлены на рисунке 5.1, как раз разрабатывались по варианту, который не получил развития в будущем, и турбины не пошли в серию. В 1964 год ЛМЗ выпустил единственную в СССР двухвальную турбину мощностью 800 МВт, установленную на Славянской ГРЭС (Украина). На первом валу на генератор мощностью 500 МВт работают ЦВД, ЦСД и два ЦНД, на втором валу – ЦСД и два ЦНД на генератор мощностью 300 МВт. С 1969 года ХТГЗ начал выпускать турбины типа К-500-240 мощностью 500 МВт, а ЛМЗ – турбины типа К-800-240 мощностью 800 МВт в одновальном исполнении, которые на тот момент стали самыми мощными в Европе. В 1978 году введена в эксплуатацию турбина типа К-1200-240 производства ЛМЗ мощностью 1200 МВт на сверхкритические параметры пара.

На развитие модельных рядов мощных паровых турбин на сверхкритические параметры пара отечественных заводов оказывало влияние несколько взаимосвязанных факторов:

- отсутствие в СССР должного опыта эксплуатации отечественного энергетического оборудования на параметры пара свыше 8,8 МПа, что связано с освоением параметров пара 23,5 МПа и 565 °С практически сразу после разработки и эксплуатации оборудования на 8,8 МПа;

- в соответствии с источником [29]: «если с 1960 по 1970 год производство электроэнергии выросло с 290 до 750 млрд. кВт·ч, то есть в 2,6 раза, то мощность единичного агрегата за это время выросло с 300 до 800 МВт, то есть приблизительно в том же соотношении», поэтому на этом этапе была потребность в выработке электроэнергии и удвоении установленной мощности каждые 6-7 лет, что приводило к необходимости начинать работу над новыми образцами и сериями оборудования до завершения предшествующих проектов;

- для ускорения процесса освоения необходимо подвергать эксплуатационным ресурсным испытаниям сразу несколько образцов однотипного оборудования;

- отсутствие завершенных исследований, подготовки производства и недостаточность уровня качества собственно производства по работе с конкретными марками сталей;

- необходимость, как было обозначено ранее, разработки, подготовки производства и производства одновременно турбинного, генераторного, котельного и вспомогательного оборудования, что могло занимать применительно к новым конструкциям такого оборудования около 10 лет.

Как следствие, учитывающее все эти факторы, борьба идей и вариантов различных конструкций оборудования должна была происходить на полномасштабных стадиях эскизно-технических и технических проектов, которые учитывали не только проверку расчетно-аналитическими расчетами, но и использование имитационного моделирования [18] вместе с натурными испытаниями на стендах и модернизируемом оборудовании. Использование проектов модернизации паротурбинного оборудования в том числе позволяло задумываться о принципах взаимозаменяемости/применимости и добиваться результатов оптимизации ранее разработанных стандартных узлов и деталей.

Необходимо отметить, что в связи с потребностью выполнения полномасштабных, наукоемких, междисциплинарных и межотраслевых стадий КТПП, эти стадии проектов создания турбинного оборудования следовало отделить от организационных вопросов производственной загрузки предприятий.

С учетом описанной истории развития отечественного паротурбостроения, принципов и факторов, влияющих на формирование номенклатурных и модельных рядов основного паротурбинного оборудования заводов, необходимо обозначить текущее состояние по предлагаемым линейкам паровых турбин производства ЛМЗ, УТЗ и КТЗ и указать на используемые ими основные принципы проектирования, а также достигнутые уровни модульного проектирования.

На рисунке 5.3 представлено продуктивное поле компаний ОАО «ЛМЗ» и ОАО «КТЗ» после объединения в Группу «Силовые машины».

В данный момент в рамках внутригрупповой кооперации и распределения производственной загрузки КТЗ освоил по конструкторской документации ЛМЗ производство паровых турбин семейства ПТ-80-12,8 и отдельных компонентов турбины семейства К-200-12,8.

В таблице 5.1 представлен номенклатурный ряд паровых турбин ЛМЗ, каждая из типов которого является базовой турбиной для соответствующего семейства турбин, выпускаемых и потенциально предлагаемых ЛМЗ заказчику.

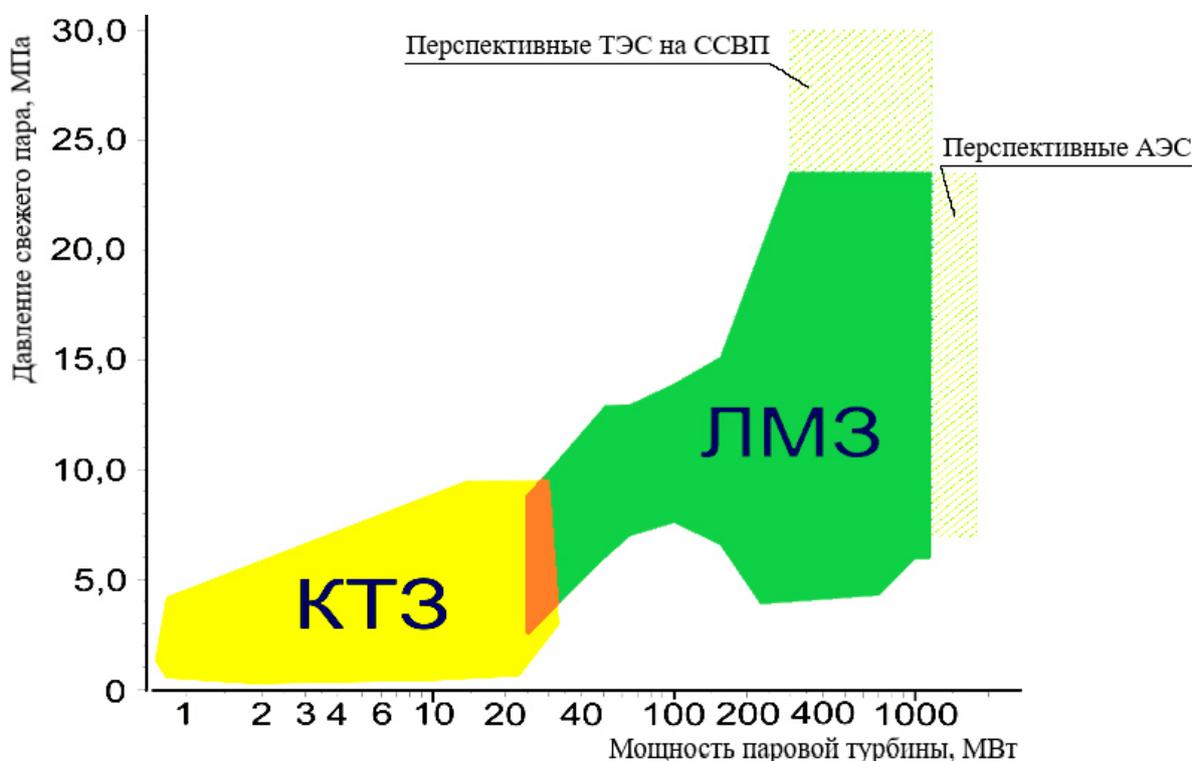


Рисунок 5.3 – Продуктивное поле компаний ОАО «ЛМЗ» и ОАО «КТЗ»
(в момент объединения в Группу «Силовые машины»)

На рисунке 5.4 представлен продольный разрез паровой одноцилиндровой турбины типа К-50-8,8 производства ЛМЗ, являющейся базой для соответствующего семейства, на котором цветами выделены стандартные библиотечные подмодули.

Таблица 5.1 – Номенклатурный ряд паровых турбин производства ЛМЗ

конденсационные турбины								
конденсационные	K-40-62	K-55-8,8	K-55-60	K-100-90	K-110-140	K-165-130	K-180-8,0	K-200-181
	K-210-130	K-215/130	K-225-12,8	K-225-162	K-300-170	K-300-170-1P	K-330-240	K-500-166
	K-500-240	K-660-247	K-800-240	K-1000-60/3000-1	K-1000-60/3000-2	K-1000-60/3000-3	K-1200-240	
конденсационные с теплофикационным отбором	КТ-115-8,8	КТ-120/140-12,8	ТК-330-240					
теплофикационные турбины								
теплофикационные	T-25-3,4	T-30-2,9	T-50-8,8	T-60-112	T-115-8,8	T-120/140-12,8	T-130/160-12,8	
	T-140-145	T-150-7,7	T-180/210-130-1	T-180/215-130-2	T-185/220-12,8-1	T-185/220-12,8-2		
теплофикационные с производственным отбором пара	ПТ-30-2,9-2	ПТ-30-3,4	ПТ-30-8,8	ПТ-30/40-2,9	ПТ-35/55-3,2	ПТ-40/50-8,8	ПТ-65/75-8,8	
	ПТ-65/75-12,8	ПТ-80/100-12,8						
теплофикационные с противодавлением и с производственным отбором пара	ПР-30-2,9	ПТР-30-2,9	ПР-32-8/1,5					
турбины с противодавлением								
	P-25-90/30		P-25-8,8-2		P-50-8,8/1,0	P-50/60-12,8/1,3-2		P-85-8,8/0,2

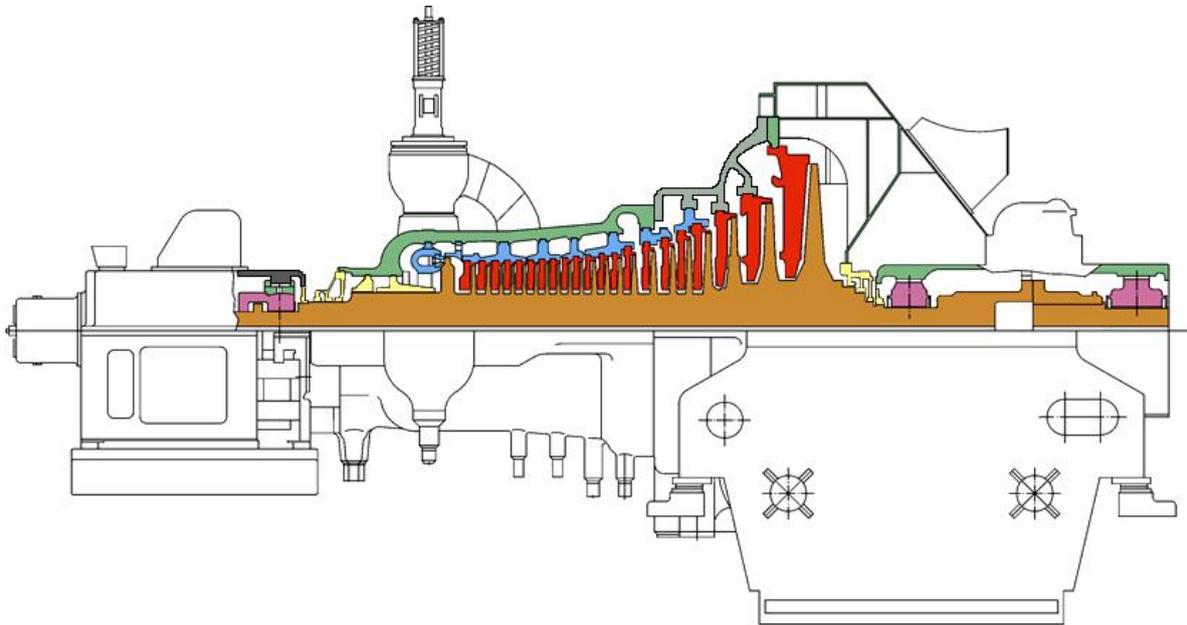


Рисунок 5.4 – Продольный разрез базовой паровой турбины типа К-50-8,8 производства ЛМЗ: цветами выделены стандартные библиотечные

На рисунке 5.5 представлена 3Д-модель паровой турбины типа К-50-8,8 производства ЛМЗ.

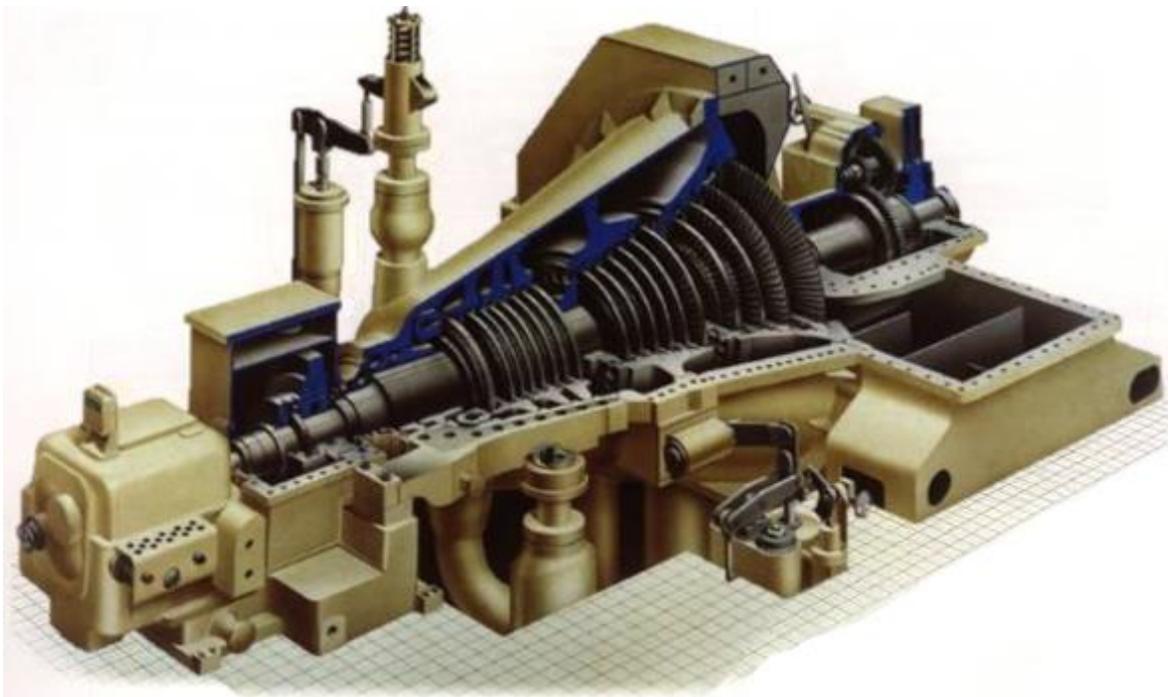


Рисунок 5.5 – 3Д-модель паровой турбины типа К-50-8,8 ЛМЗ

На рисунке 5.6 представлен продольный разрез паровой двухцилиндровой турбины типа К-100-8,8 производства ЛМЗ, являющейся базой для соответствующего семейства, на котором цветами выделены стандартные библиотечные подмодули.

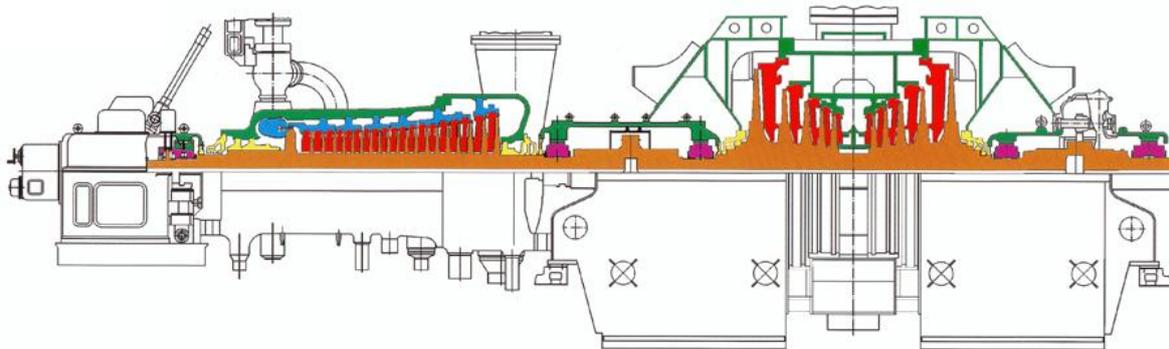


Рисунок 5.6 – Продольный разрез базовой паровой турбины типа К-100-8,8 производства ЛМЗ: цветами выделены стандартные библиотечные подмодули

На рисунке 5.7 представлена 3Д-модель паровой турбины типа К-100-8,8 производства ЛМЗ.

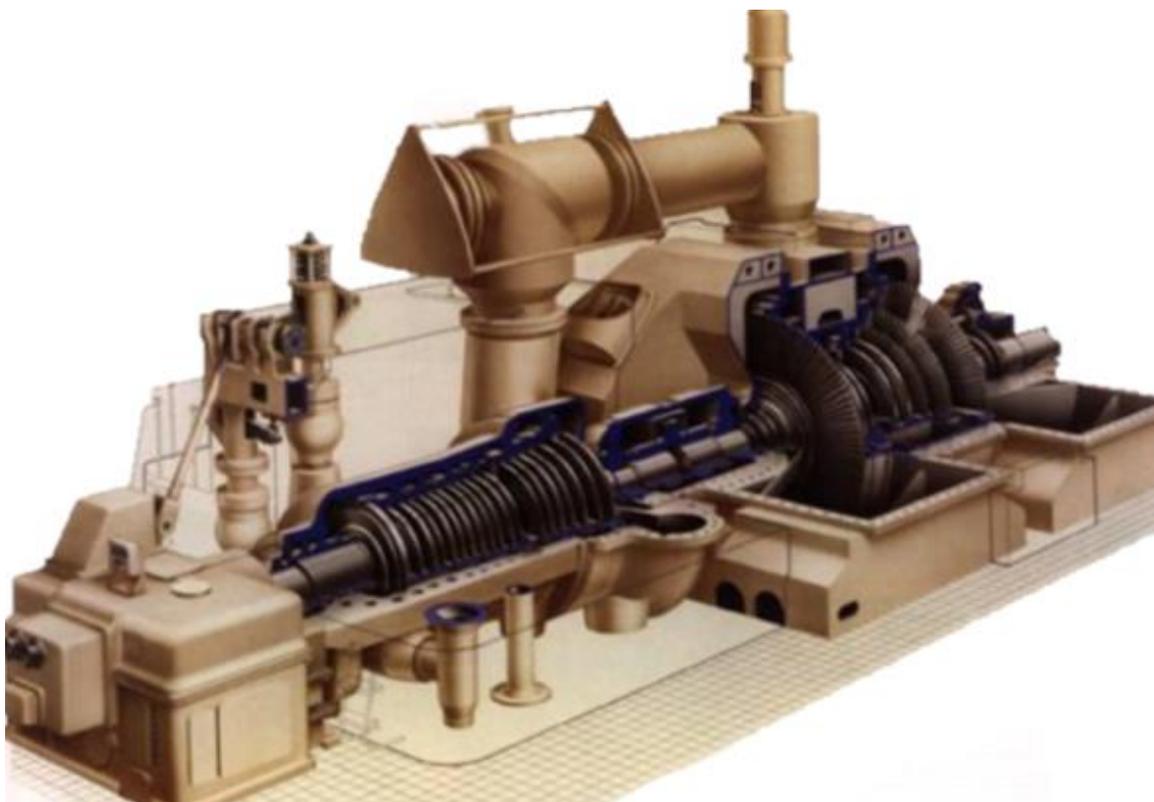


Рисунок 5.7 – 3Д-модель паровой турбины типа К-100-8,8 производства ЛМЗ

На рисунке 5.8 представлен продольный разрез паровой трехцилиндровой турбины типа К-200-12,8 производства ЛМЗ, являющейся базой для соответствующего семейства, на котором цветами выделены стандартные библиотечные подмодули.

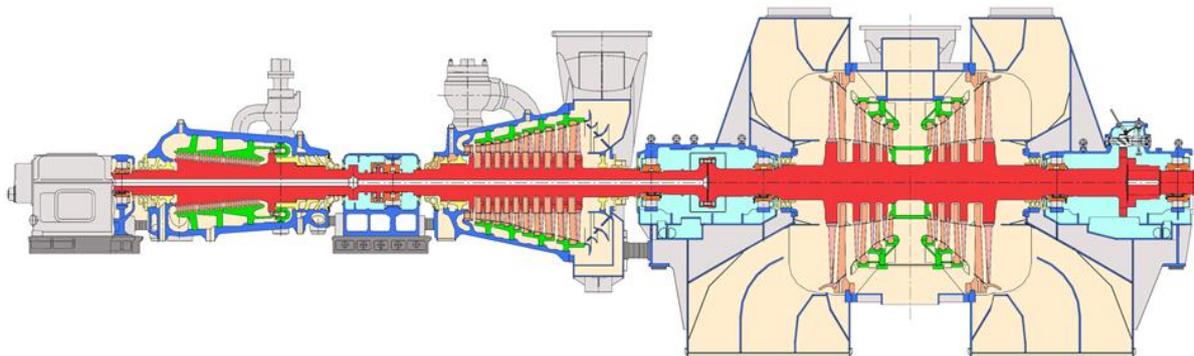


Рисунок 5.8 – Продольный разрез базовой паровой турбины типа К-200-12,8 производства ЛМЗ: цветами выделены стандартные библиотечные подмодули

На рисунке 5.9 представлена 3Д-модель паровой турбины типа К-200-12,8 производства ЛМЗ.

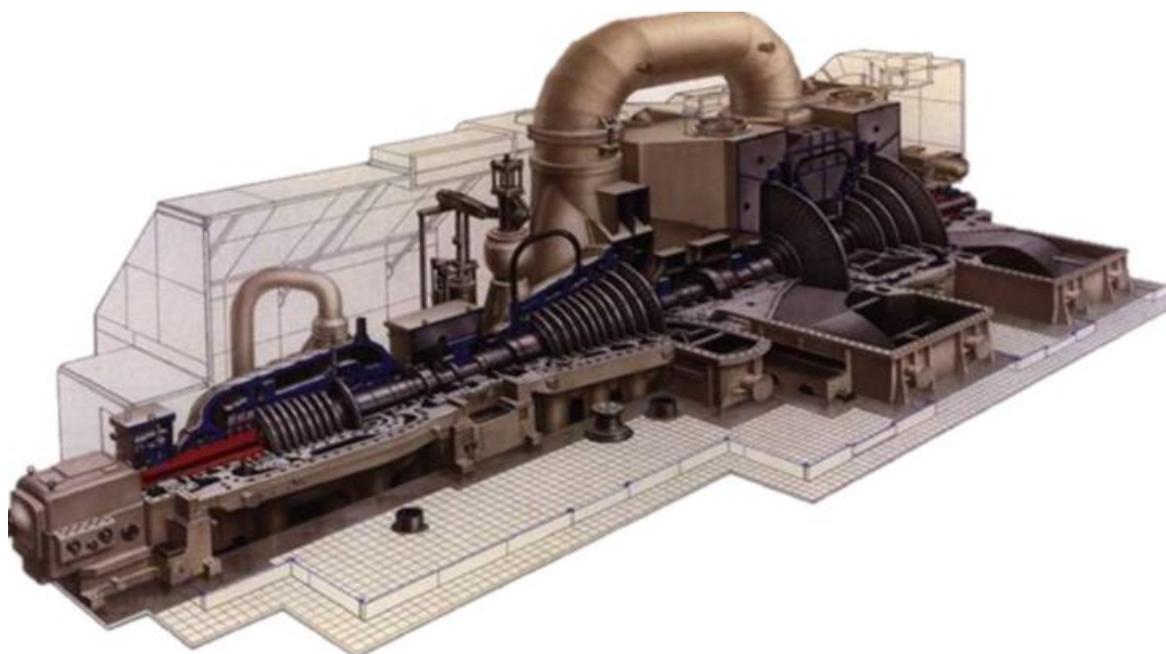


Рисунок 5.9 – 3Д-модель паровой турбины типа К-200-12,8 производства ЛМЗ

Согласно каталогу [30] Группы «Силловые машины» по средним и мощным паровым турбинам ЛМЗ: «Подход «Силловых машин» к разработке нового оборудования соответствует главной тенденции развития энергетики – постоянному увеличению КПД за счет повышения начальных параметров пара и совершенствования конструкции турбины и вспомогательного оборудования.

При создании паровых турбин используется принцип модульного проектирования, основанный на применении базовых элементов: цилиндров, группы ступеней, отдельных ступеней, роторов, корпусов, подшипников и других. Базовые элементы турбин имеют высокую степень конструкторско-технологической отработки и подтвержденные эксплуатационные характеристики. Такой подход позволяет воплотить в новых конструкциях все положительные наработки, накопленные при эксплуатации обширного парка турбин-прототипов, а также сократить время выполнения проекта».

Однако следует отметить, что несмотря на декларирование ЛМЗ о том, что в их конструкциях, в том числе представленных выше, используется модульный принцип проектирования, далее будут обозначены особенности используемых подходов, которые, безусловно, обеспечивают значительную степень унификации конструкции паровых турбин внутри семейства, однако не позволяют говорить об отсутствии затрат в КТПП новых образцов на вовлечение стандартных библиотечных элементов. Это указывает на отсутствие полноценного архива именно «библиотечных» модулей, а значит, и на использование не чисто классической модульной концепции, которая позволяет **совсем** без затрат на корректировку унифицируемых модулей/подмодулей и их соединения формировать по «принципу LEGO» новый образец. Вторая немаловажная причина сложности вовлечения модулей и формирования нового профиля заключается в неадаптированности конструкторской структуры или «дерева изделия» к модульной конструкции. Проще говоря организована неправильная входимость спецификаций узлов, что нарушает простоту формирования новой конструкторской структуры.

Такую концепцию авторы называли «квазимодульной» концепцией, от которой, помимо всего прочего, внедряя принципы построения «дерева изделия», разделения на модули/подмодули, подходы к конструированию и технологической подготовке производства, оптимизацию модулей и совершенствуя цифровые инструменты всего ЖЦ оборудования, предлагается развиваться к «модульной» концепции.

В таблице 5.2 представлен номенклатурный ряд паровых турбин КТЗ.

Таблица 5.2 – Номенклатурный ряд паровых турбин производства КТЗ

турбины для привода электрического генератора							
теплофикационные с регулируемыи отборами	ПТ-25/30-8,8/1,0-1	ПТ-30/35-3,4/1,0	ПТ-27/35-3,9/1,7	ПТ-29/35-2,9/1,0	ПТ-25-3,4/0,6	ПТ-12/13-3,4/1,0-1	П-25-3,4/0,6
	П-6-3,4/1,0	П-6-3,4/0,5-1	П-6-1,2/0,5				
конденсационные	К-20-6,1Т	К-12-4,2	К-7,5-6,4	К-6-3,4	К-6-1,6У	К-6-1,6	
конденсационные с понижающим редуктором	К-2,5-3,4	К-4,9-4,4Р					
конденсационные с воздушным конденсатором	К-37-3,4						
с противодавлением	Р-25-3,4/0,1	Р-25-3,4/0,1	Р-12-8,8/1,8-1	Р-12-3,4/1,0	Р-12-3,4/0,5-1	Р-12-3,4/0,1	Р-12-2,7/0,2
	Р-6-3,4/1,0-1	Р-6-3,4/0,5-1	Р-4-3,4/1,5-1	Р-4-3,4/0,5-1	Р-4-2,1/0,3	Р-2,5-3,4/0,3-1	Р-2,5-2,1/0,6
	Р-2,5-2,1/0,3	Р-1,6-2,8/0,7	Р-1,4-3,4/1,3	Р-1,4-2,3/0,7			
с противодавлением и отбором	ПР-12/15-8,8/1,5/0,7	ПР-12-3,4/1,0/0,1	ПР-12-3,4/0,6/0,1	ПР-6-3,4/1,5/0,5-1	ПР-6-3,4/1,0/0,5-1	ПР-6-3,4/1,0/0,1-1	ПР-6-3,4/0,5/0,1-1
турбины приводные							
приводные конденсационные	К-11-1,0 П-1	К-17-1,5 П-1	К-12-1,0 ПА	К-10-0,5 ПА	К-6-3,0 П	К-2,6-4,0 П	
приводные противодавленческие	Р-11-1,5/0,3 Пс	Р-11-1,5/0,3 П	ТП-1250	ТП-1100	ТП-750	ТП-600	ТП-320
турбогенераторы блочные малой мощности							
блочные конденсационные	ТГУ-500К	ТГ-500М	ТГУ-600	ТГУ-800К	ТГУ-1000К	ОК-3С-01	
блочные конденсационные с отбором пара	П-0,6-13/6	П-1,2-13/6	П-1,5-24/5	П-1,5-40/8КР	П-1,5/10,5-1,4/0,7	П-2/6,3-2,4/0,5	П-2,5-4,2/0,9
конденсационные с отбором и бойлером для выработки электроэнергии и подогрева сетевой воды	П 1,5/10,5-2,4/1,0Б	ПР 0,6/0,4-1,3/0,65/0,04					
блочные с конденсатором-бойлером для выработки электроэнергии и подогрева сетевой воды	ТГ-0,6/0,4-К1,3	ТГ-0,6/0,4-К 2,8					
блочные противодавленческие	ТГ-0,5А/0,4 Р13/3,7	ТГ-0,6А/0,4 Р12/3,7	ТГ-0,75А/0,4 Р13/2	ТГ-1,25А/0,4 Р13/2,5	ТГ-1,5А/10,5 Р13/3	ТГ-0,5ПА/0,4 Р11/6	ТГ-0,6ПА/0,4 Р13/6
	ТГ-0,75ПА/0,4 Р13/4	ТГ-1,2/0,4 Р24/1,2	ТГ-1,7/0,4 Р5/1,0	ТГ-3,5АЛ/10,5 Р12/1,2	ТГ-4АС/10,5 Р14/1,2		
турбины геотермальные							
геотермальные	К-17-5-Гео	К-23-7-Гео	ПТУ-25				

Согласно каталогу Группы «Силовые машины» по паровым турбинам малой мощности производства КТЗ: «При разработке нового оборудования основное внимание уделяется увеличению КПД, совершенствованию конструкции турбин. Проектирование изделий на основе конструкторско-технологической взаимозаменяемости основных модулей конструкции, подтвержденных эксплуатационными характеристиками. Современные прогрессивные методы расчетов, моделирования и проектирования».

На рисунке 5.10 представлен продольный разрез паровой турбины типа П-25-3,4/0,6 производства КТЗ, являющейся базой для соответствующего семейства: цветами выделены стандартные библиотечные подмодули.

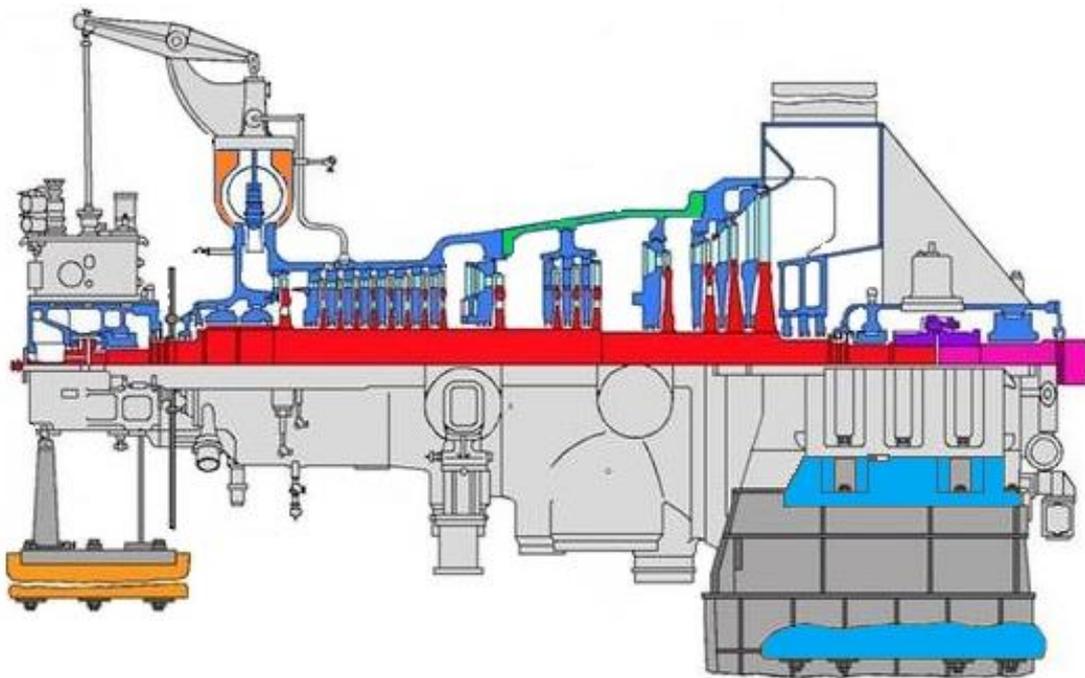


Рисунок 5.10 – Продольный разрез базовой паровой турбины типа П-25-3,4/0,6 производства КТЗ: цветами выделены стандартные библиотечные подмодули

На рисунке 5.11 представлено фото паровой турбины типа П-25-3,4/0,6 производства КТЗ в процессе монтажа на объекте.

В оборудовании производства КТЗ достигается достаточно высокий уровень унификации, который даже при разработке новых образцов техники достигает в отдельных случаях 85%, однако следует используемые принципы и подходы к проектированию считать «квазимодульной» концепцией, описанной выше.



Рисунок 5.11 – Фото паровой турбины типа П-25-3,4/0,6 производства КТЗ

Необходимо заметить, что несмотря на декларирование АТ «Турбоатом» (в настоящее время АО «Украинские энергетические машины») аналогично ЛМЗ и КТЗ о том, что в их конструкциях используется модульный принцип проектирования, подходы к КТПП пришли из советской школы паротурбостроения, и используемую при разработке паровых турбин концепцию также следует считать «квазимодульной». Стоит обозначить, что в отдельных вопросах развития современных инструментов цифровой трансформации предприятие продвинулось в особенности, например, выполнение расчетно-аналитических задач численными САЕ-методами инженерного анализа. Поставленные предприятием проблематика развития унификации и модульного проектирования усугублялась сложной номенклатурой паровых турбин, выпускаемых на 1500 и 3000 об/мин, ограниченностью рынка сбыта и необходимостью в новейшей истории реализовывать преимущественно проекты реконструкции энергоблоков и модернизации паротурбинного оборудования чужого производства, тем самым вынужденно переходя к индивидуальным проектам.

На рисунке 5.12 представлены продольные разрезы нескольких типов паровых турбин ХТЗ (далее АТ «Турбоатом», в настоящее время АО «Украинские энергетические машины»): а) Продольный разрез паровой турбины типа К-160-130; б) Продольный разрез паровой турбины типа К-300-240; в) Продольный разрез паровой турбины типа К-500-240.

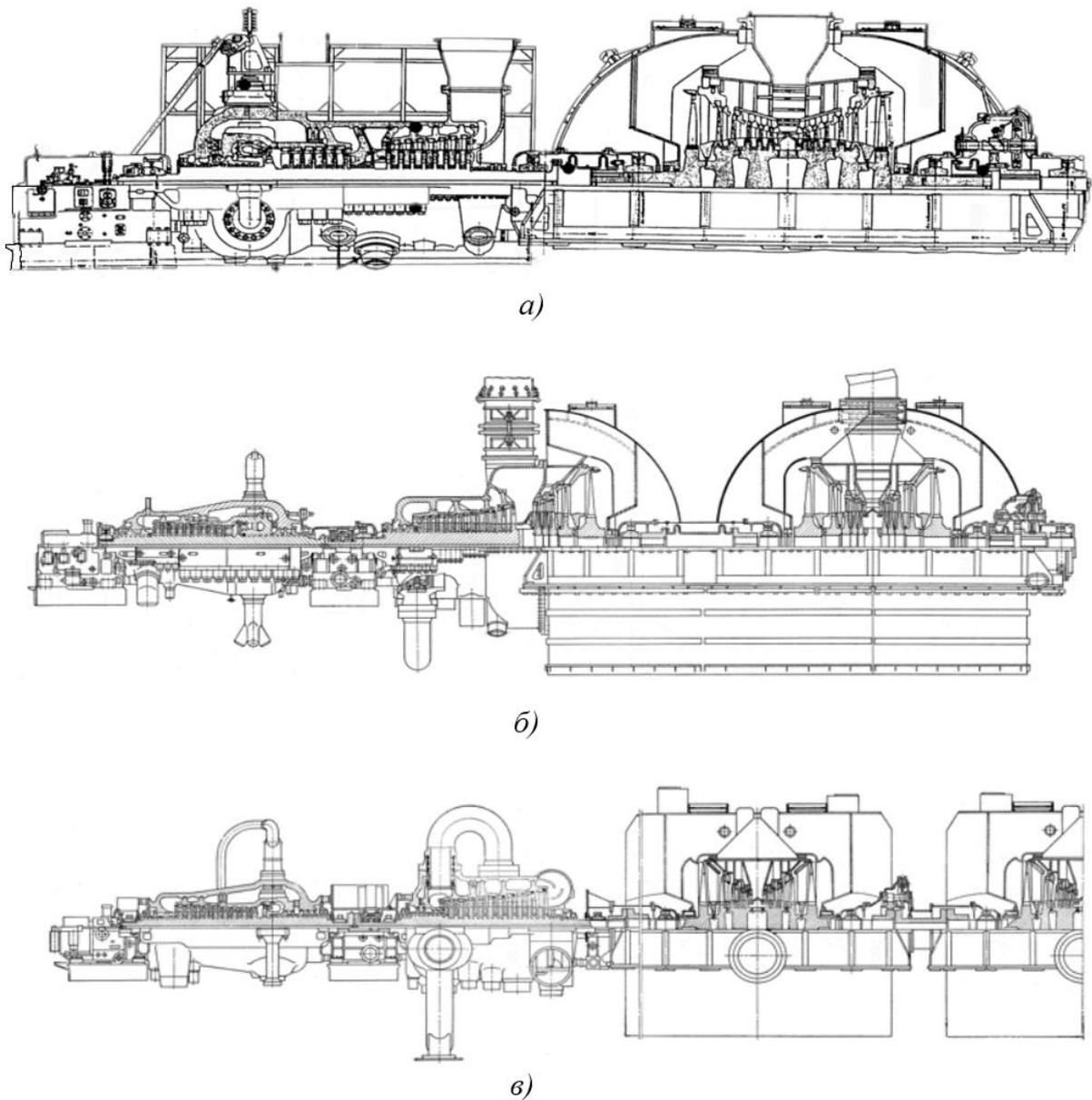


Рисунок 5.12 – Продольные разрезы паровых турбин ХТЗ АО «Украинские энергетические машины»: *а)* продольный разрез паровой турбины типа К-160-130; *б)* продольный разрез паровой турбины типа К-300-240; *в)* продольный разрез паровой турбины типа К-500-240

Интересно представить обзор паровых турбин и подходов к унификации и модульной концепции АО «Уральский турбинный завод» (ранее УТМЗ, ТМЗ). На разных этапах истории развития предприятие использовало и использует различную терминологию описания и разделения номенклатурного ряда паровых турбин: модельный ряд, семейство, серия, класс, тип, модель.

Модельный ряд – некоторый произвольный ряд, ограничивающий основное и вспомогательное оборудование по одному или нескольким признакам, например, модельный ряд конденсационных паровых турбин, или модельный ряд теплофикационных турбин, или только модельный ряд турбин типа «ПТ», или всех противодавленческих, то есть типа «Р», «ПР», «ТР», «ПТР» или только «Р». Также модельный ряд может ограничивать по параметрам пара и назначению, например, «приключенные», модельный ряд паровых турбин для ПГУ и т.д.

Семейство – ограниченная группа оборудования, которая привязывалась к базовой турбине и изначально, в том числе характеризовалась едиными конструктивными признаками, но впоследствии развитие семейства отходило от единообразия конструктивного признака. Это касается даже семейства турбин типа Т-100-12,8, когда в последних модификациях была значительно пересмотрена конструкция ЦВД турбины типа Т-125/150-12,8 [31-33]. При этом в семейство могли входить турбины с разными параметрами свежего пара, но с единым конструктивным обликом, например, Тп-100-8,8 и Тп-115/125-12,8.

Термин «серия» использовался в контексте серийности производства однотипной продукции, поэтому в новейшей истории предприятия, а точнее даже отечественного энергомашиностроения и энергетики, термин использовался применительно к серии турбин Т-63/76-8,8 и КТ-63-7,7, которые спустя почти двадцатилетие с момента условно мелкосерийного выпуска турбин типа ПТ-90-12,8 производились в рамках участия предприятия в реализации Программы ДПМ в количестве 7 единиц за 4 года.

Понятие «класс» предприятие ввело лишь в 2018 году, и такая потребность была связана с необходимостью описания сформированного к тому времени номенклатурного ряда паровых турбин компании, который включал старые референтные и зарекомендовавшие себя долгими годами

надежной эксплуатации на объектах энергетики и совершенно новые образцы турбин разной мощности и назначения: от судовой тематики для атомных ледоколов проекта 22220 и приключенных турбин до паровых турбин для ПГУ и ПСУ, использующих уникальные технические решения, получившие признание отраслевым экспертным сообществом и зафиксированные за собой компанией [17, 34-94]. Как обозначено в каталогах и на сайте компании [95] «главная особенность совершенно новых турбин заключается в том, что они практически не укладываются ни в один ранее считавшийся серийным модельный ряд. Одна и та же конструкция турбины может быть использована в прямо противоположных типах. Например, основные узлы турбины могут быть использованы как для чисто конденсационной установки, так и для паротурбинной установки с большим теплофикационным отбором. Либо турбина одного и того же облика может быть использована для широкого мощностного ряда. В связи с этим в целях внедрения оптимальной классификации турбинного оборудования Уральский турбинный завод ввел для своих турбин новое понятие для определения типов и моделей турбин – классы. Каждый класс предполагает включение в себя набора конструктивных признаков, объединенных единым неделимым применением в конкретной турбине».

Классификация турбин УТЗ по классам представлена на рисунке 5.13 и в таблице 5.3.

Отдельные классы на УТЗ разрабатывались или расширялись с их концептуальным наполнением представителями и использованием модульных подходов и принципов проектирования. При формировании текущего Класса А.2 на предприятии в 2006 году только зарождалось модульное проектирование: турбина типа Т-50/60-8,8 разрабатывалась с учетом одновременных заделов на создание потенциальной турбины типа К-63-8,8 [96, 97].

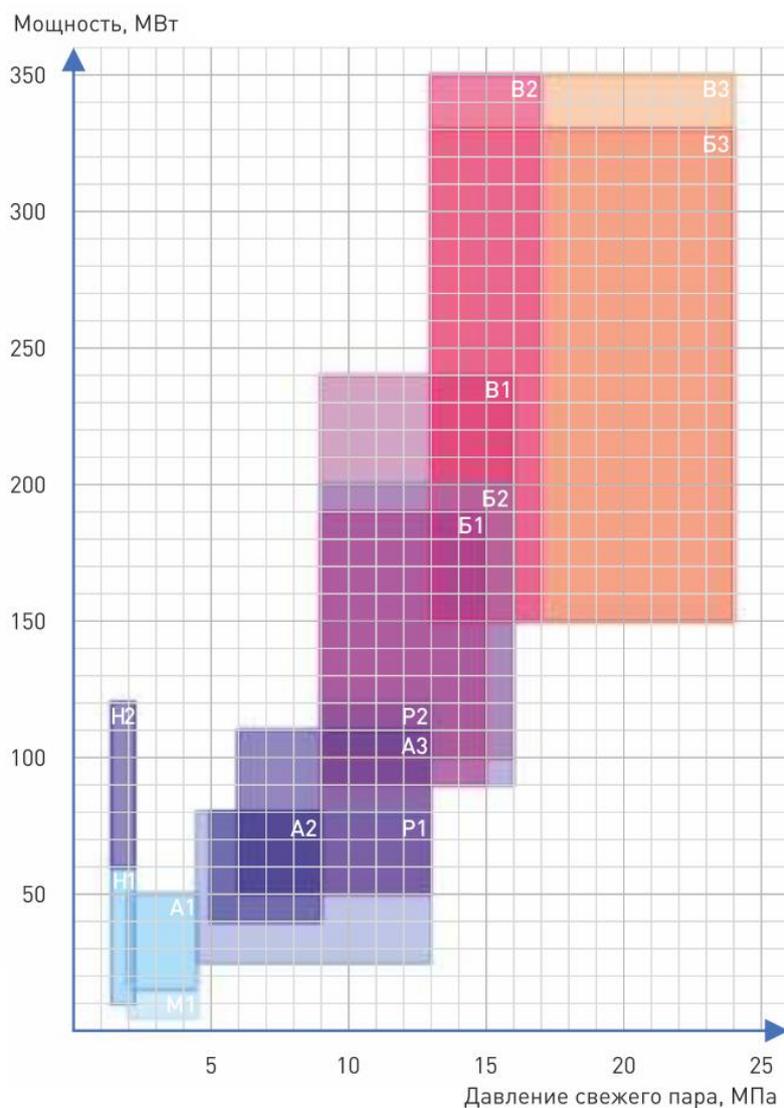


Рисунок 5.13 – Классификация продуктового поля паровых турбин АО «УТЗ»

Таблица 5.3 – Классификация паровых турбин АО «УТЗ» по классам

Класс	Давление свежего пара, МПа		Электрическая мощность, МВт	
	Начало диапазона	Конец диапазона	Начало диапазона	Конец диапазона
Основные классы				
A.1	2,0	4,5	14	50
A.2	4,9	8,8	40	80
A.3	5,9	12,8	50	110
Б.1	8,8	14,7	90	190
Б.2	8,8	15,7	90	200
Б.3	12,8	23,5	150	330
В.1	8,8	15,7	100	240
В.2	12,8	23,5	150	350
В.3	12,8	23,5	150	350
Дополнительные классы				
Н.1	1,4	2,2	10	60
Н.1.1	1,4	2,2	10	60
Н.2	1,4	2,2	60	120
Р.1	4,5	12,8	25	80
Р.2	8,8	12,8	50	120
М.1	2,0	4,5	5	16

Одновременно необходимо говорить о сложностях, связанных с использованием в унифицированных узлах ранее разработанной турбины типа ПТ-30/35-8,8-5 [97], которая разрабатывалась с накладываемыми ограничениями, так как турбина должна была с минимальными переделками устанавливаться взамен турбин типа ВПТ-25-90-4 УТЗ и ВПТ-25-90-3 ЛМЗ, которые имели значительные отличия по проточным частям и схемно-компоновочным решениям. Важно отметить, что при разработке представителей данного класса уже не только закладывалось разделение модулей и пересматривалась структура изделия, но и выполнялась оптимизация таких модулей, как паровпускная и выхлопная части, парораспределение и подшипники, с возможностью их 100%-ного использования при разработке турбин данного класса.

Явно выраженный модульный подход начал использоваться на УТЗ начиная с 2011 года с разработки паровых турбин Класса А.3, в который входят турбины типа Т-63/76-8,8, КТ-63-7,7, К-60-12,8, К-65-12,8, К-85-8,0, Т-40/50-8,8 [98-106]. При этом еще до принятия предприятием решения по классификации с разделением на классы в рамках модульной концепции и с одновременным формированием профилей разрабатывались турбины типа Т-40/50-8,8, Т-63/76-8,8, КТ-63-7,7 для ПГУ и чуть позже остальные на базе них для ПСУ.

Каждый класс четко и однозначно описывается профилем конструкции с обозначенными возможностями, принципиальными схемами с опциональными возможностями и техническими показателями с конкретными значениями или ограниченными диапазонами.

Класс А.3 согласно источнику [95] описывается так: «одноцилиндровые турбины с петлевой схемой движения пара, с внутренним цилиндром и межкорпусным пространством. Межкорпусное пространство может использоваться как для подвода пара (например, при использовании в блоках ПГУ), так и для осуществления отбора пара (например, на регенерацию или производственный отбор. Мощность от 50 до 100 МВт, давление свежего пара от 5,9 до 12,8 МПа (60-130 кгс/см²), лопатка последней ступени может быть применена длиной от 430 до 660 мм, регулирование дроссельное с выносным

блоком клапанов либо сопловое с размещением регулирующих клапанов на цилиндре, исходя из предполагаемых условий эксплуатации. Турбина предполагается как с радиальным выхлопом на один водяной конденсатор, так и с осевым на воздушную конденсационную установку. В турбине предусмотрена возможность организации одноступенчатого или двухступенчатого регулируемого теплофикационного отбора».

В таблице 5.4 представлены основные параметры и показатели паровых турбин Класса А.3 производства УТЗ.

Таблица 5.4 – Основные параметры и показатели Класса А.3 производства УТЗ

Наименование показателя	Значение
Основной тип турбины	Теплофикационная/конденсационная
Основной конструктивный признак	Одноцилиндровая с петлевой схемой движения пара с внутренним корпусом
Тип парораспределения	Дроссельный/сопловой
Варианты типа выхлопного патрубка	Радиальный/осевой
Диапазон электрической мощности, МВт	50-110
Диапазон параметров свежего пара:	
- давление, МПа	5,9-12,8
- температура, °С	400-560
Возможность организации теплофикационного отбора пара:	
- схема	Регулируемый отбор; Одноступенчатый/двухступенчатый подогрев сетевой воды
- максимальная тепловая нагрузка, Гкал/ч	50-190
- расход пара в отбор, т/ч	100-370
Возможность организации производственного отбора пара:	
- расход, т/ч	50-250 т/ч
- схема	Нерегулируемый/регулируемый отбор
- обеспечиваемое давление, МПа	0,8-2,0
Характеристики основного применяемого в турбоустановке конденсатора:	
- расход охлаждающей воды, м ³ /ч	8000-13500
- площадь поверхности теплообмена, м ²	3100-6000
Реализованные проекты турбин класса	Т-63/76-8,8, КТ-63-7,7, К-60-12,8, К-65-12,8, К-85-8,0

К данному Классу А.3 относится новая турбина типа Кп-77-6,8, разработанная для мусороперерабатывающего завода.

На рисунке 5.14 представлен продольный разрез паровой одноцилиндровой турбины типа Кп-77-6,8 производства УТЗ, в которой используются ранее разработанные модули внутреннего цилиндра, паровпускной, обойм уплотнений. На рисунке 5.15 представлена 3Д-модель паровой турбины типа Кп-77-6,8 производства УТЗ.

В таблице 5.5 представлены основные параметры номенклатурного ряда паровых турбин УТЗ.

Таблица 5.5 – Основные параметры паровых турбин номенклатурного ряда УТЗ

ВИД ТУРБИНЫ	МАРКА ТУРБИНЫ	НАЧАЛО ПРОИЗВОДСТВА, ГОД	МОЩНОСТЬ, МВт			ПАРАМЕТРЫ И РАСХОД СВЕЖЕГО ПАРА, КГС/СМ ²			
			N _н	N _м	N _г	P _н	t _н /t _г	D _н	D _г
С ОТОПИТЕЛЬНЫМИ ОТБОРАМИ	T-60/65-130-2M	2004/2012	60	65	65	130	555	282	300
	T-50/60-130-6M	-	50	60	50	130	555	245	255
	T-50/60-8,8	2008	50	60	60	90	535	240	255
	T-60/65-8,8	2014	60	65	65	90	500	319	345
	T-95/105-8,8	2014	92	102.5	84.5	90	535	405	405
	Tn-115/125-130-1MO	1992/2010	115	125	80	130	555	490	500
	Tn-115/125-130-2MO	-	115	125	125	130	555	490	500
	Tn-115/125-130-3	-	115	125	125	130	555	490	500
	T-110/120-130-5MO	1984/-	110	120	120	130	555	480	485
	T-116/125-130-7MO	1991/-	116	125	125	130	555	505	510
	T-120/130-130-8MO	1996/2011	123	130	130	130	555	520	525
	Tn-185/220-130-2M	-	185	220	220	130	555	785	810
	Tn-185/215-130-4M	-	186	215	215	130	555	785	810
	T-255/305-240-5M	1991/-	200	305	305	240	540/540	980	1,000
	T-250/305-240-Д	-	250	305	305	240	540/540	980	1,000
	T-265/305-240-С	-	265	305	305	240	540/540	980	1,000
T-250/305-240-ДБ	-	250	305	305	240	540/540	980	1,000	
T-295/335-23,5	2015	295	335	335	240	565/565	1,007	1,030	
С ПРОМЫШЛЕННЫМИ И ОТОПИТЕЛЬНЫМИ ОТБОРАМИ	ПТ-30/35-90/10-5M	2004/2008	30	35	30	90	535	190	240
	ПТ-40/50-8,8/1,2	-	40	54	50	90	535	220	220
	ПТ-50/60-130/7-2M	-	50	60	50	130	555	280	300
	ПТ-60-8,9/1,9	2015	60	60	60	91	515	450	450
	ПТ-65/75-130/13	2010	65	75	75	130	555	415	430
	ПТ-90/120-130/10-1M	1999/2007	90	120	80	130	555	490	500
	ПТ-90/120-130/10-2M	2000/-	90	125	125	130	555	490	500
	ПТ-140/165-130/15-2M	1984/-	142	167	120	130	555	788	810
	ПТ-140/165-130/15-3M	1989/-	142	165	120	130	555	788	810
С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ, ПРОМЫШ. И ОТОПИТЕЛЬНЫМИ ОТБОРАМИ	ТР-110-130	-	112	114	-	130	555	480	485
	ПТР-90/100-130/10	-	90	125	-	130	555	490	500
	ПР-30/35-90/10/1,2M	-	30	35	-	90	535	190	240
С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ	P-102/107-130/15-2M	1984/-	102	107	-	130	555	782	810
	Pn-105/125-130/30/8	-	105	125	-	130	555	790	810
	Pn-80-130/8-3	-	80	90	-	130	555	520	550
для пгу	Tn-35/40-8,8	2012	35	40	40	90/6,1	500/210	150/51	-
	T-40/50-8,8	2012	40.2	49.6	49.6	90/7,2	550/208	165/15,6	-
	T-53/67-8,0	2008	53	66.5	66.5	78.5	488	212,5	-
	КТ-63/77	2014	63.9	63.9	63.9	73/11,5	476/214	204/39	-
	T-63/76-8,8	2012	63	75.5	75.5	89.8/14,25	502.8/296	237/35	-
	K-80-7,5	-	80	80	80	7,5	516/213	231/55	-
	T-113/145-12,4	2010	113	145.7	145.7	126/4,8	556/551/257	317/54,1/37,1	317/54/37
	K-150-7,6	-	150	150	150	7,6	513/189	454/100	-
	K-160-7,6	-	160	160	160	7,6	513/189	481/106	-
K-170-7,6	-	170	170	170	7,6	513/189	513/112	-	
ПРИКЛЮЧЕННЫЕ	T-70/110-1,6	-	70	110	110	16	285	593	645
	ТР-70-1,6	-	70	70	-	16	285	593	645
	T-35/55-1,6	2007	39	55	55	16	330	315	350
	ТР-35-1,6	-	35	35	-	16	285	325	325
	K-110-1,6	2009	110	110	110	16	285	645	645
	K-55-1,6	-	55	55	55	16,3	285	325	330
	K-17-0,16	2002	17	17	17	0,16	112,7	222	222
КОНДЕНСАЦИОННЫЕ	K-63-8,8	2009	63.5	63.5	63.5	90	535	257	247
	K-65-12,8	2016	65	65	65	130	555	237	237
	K-130-12,8	-	130	130	130	130	540/540		390
	K-350-24,5	-	350	350	350	24,5	570/570	989	989

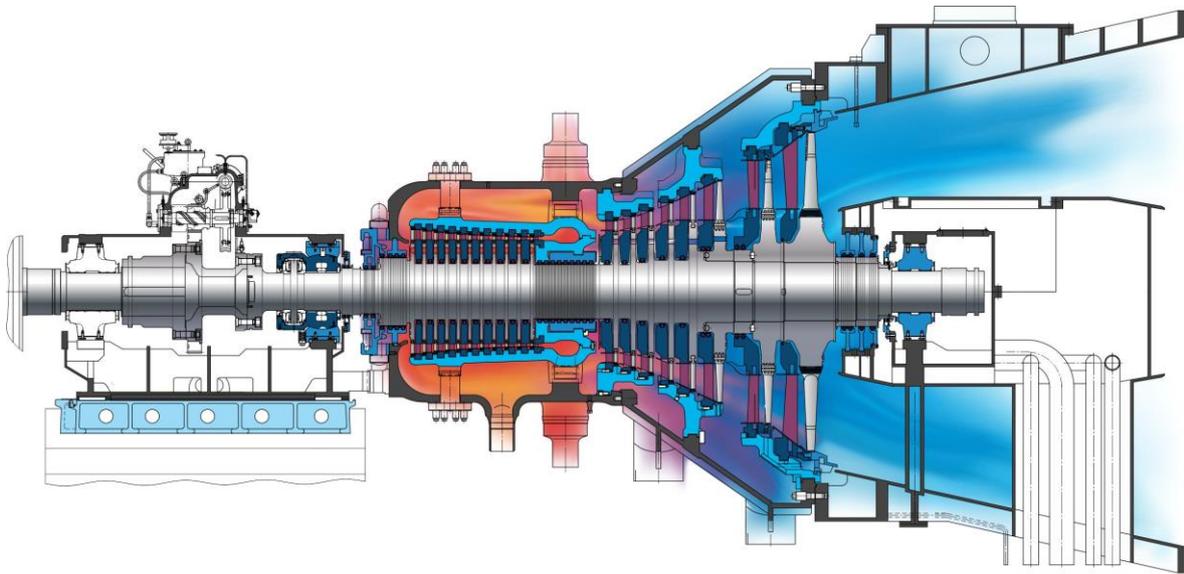


Рисунок 5.14 – Продольный разрез паровой турбины типа Кп-77-6,8
производства УТЗ

Выше уже была отмечена важность одновременного формирования профиля каждого семейства/серии/класса с использованием единой базовой платформы такой конструктивной группы, то есть формирование перечня библиотечных стандартных модулей/подмодулей и разработка таких составляющих, которые бы взаимозаменяемо заполняли облики паровых турбин такой группы. При этом следует обозначить, что следующим этапом

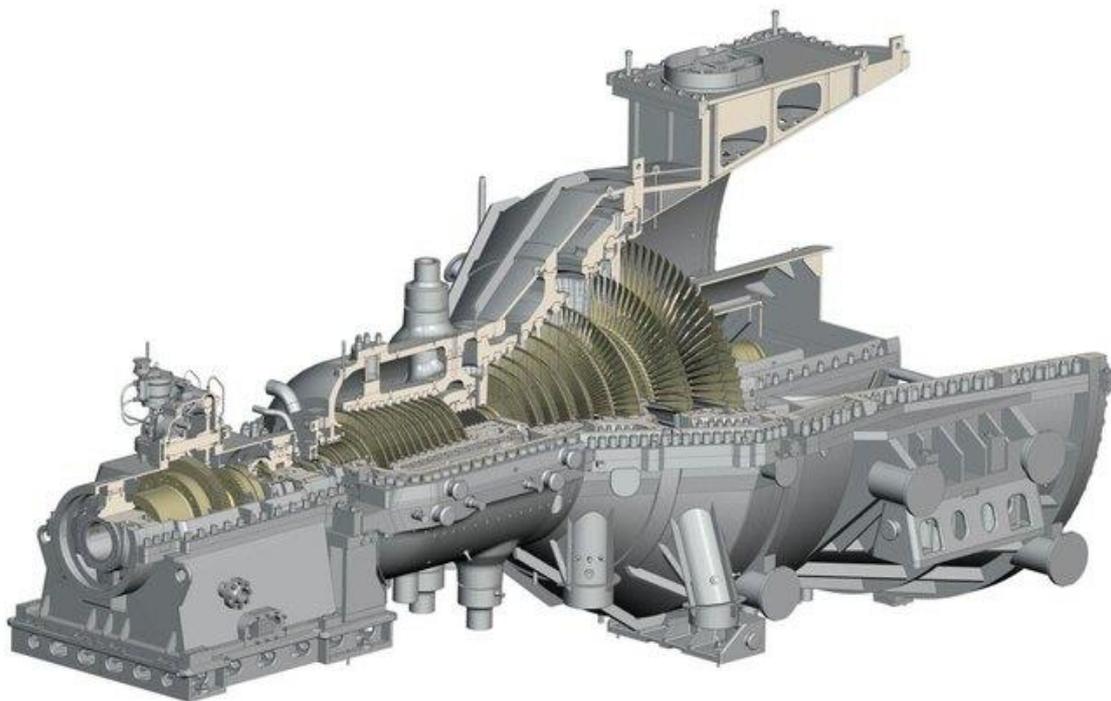


Рисунок 5.15 – 3Д-модель паровой турбины типа Кп-77-6,8
производства УТЗ

эволюции внедрения на предприятии с соответствующей школой и историей турбиностроения модульной концепции должно быть, как это осуществлено на УТЗ, переосмысление разделения номенклатурного ряда на группы (семейства/серии/класса) с учетом новых подходов не только к КТПП продукции предприятия, но и сопровождение всего ЖЦ всей выпускаемой продукции предприятия с дальнейшим формированием профиля следующей и следующей такой группы и перевыпуском оборудования с учетом внедряемой концепции, оптимизации конструкции и технологии производства модулей и инструментов сопровождения ЖЦ.

На УТЗ был реализован и этот этап при проектировании паровой турбины Т-125/150-12,8 [33], которая будет использована для работы в составе новых энергоблоков и для реконструкции существующих с турбинами семейства типа Т-100-130 разных модификаций.

Определяющим фактором конструкции данной турбины типа Т-125/150-12,8 стала необходимость использования ее не только при новом строительстве, но и возможно в большей степени – при замене изношенных турбин семейства Т-100-130 (за историю предприятия к моменту разработки в 2013 году было суммарно изготовлено более 250 таких турбин) более совершенной турбиной нового поколения, устанавливаемой на старом фундаменте и в границах старой ячейки турбоустановки существующего машинного зала или модернизации старых турбин путем последовательной замены в ней цилиндров комплектно с размещаемыми в них проточными частями с улучшенными технико-экономическими и эксплуатационными характеристиками, применения принципиально новой системы регулирования и использования новых решений в прочих конструктивных единицах, входящих в состав. Предполагаемое широкое использование новой разработки, в том числе для модернизации старого турбинного оборудования, определило необходимость сохранения длин и присоединительных размеров всех роторов турбины и присоединительных размеров корпусов цилиндров и корпусов подшипников, опорных вкладышей и патрубков регенеративных и теплофикационных отборов. Также существенным образом конструкцию турбины Т-125/150-12,8 определило требование достичь максимально

возможного для активной турбины относительного внутреннего к.п.д. проточной части. Кроме того, оптимизация ЖЦ новой турбины потребовала новых конструктивных решений, что было заложено в новую конструкцию в части всех цилиндров, системы регулирования, что предопределило базовую платформу для турбин Класса В.1 с дальнейшим пересмотром конструкции и компоновочных решений его других представителей.

В конструкции турбины реализовано много концептуальных конструктивных решений, позволяющих реализовывать и развивать в данном классе турбин УТЗ модульную концепцию: использование блока клапанов высокого давления, ЦВД выполнен двухкорпусным, включающим наружный и внутренний корпуса, корпус ЦСД комбинированной конструкции, выхлопные части ЦСД и ЦНД выполнены из модулей, которые разработаны с использованием уже отработанного на предприятии решения с применением штампованных эллиптических днищ, что даже без применения оребрения позволило снизить напряжение в стенках цилиндра от внутреннего давления.

На рисунке 5.16 представлен продольный разрез паровой трехцилиндровой турбины типа Т-125/150-12,8 производства УТЗ.

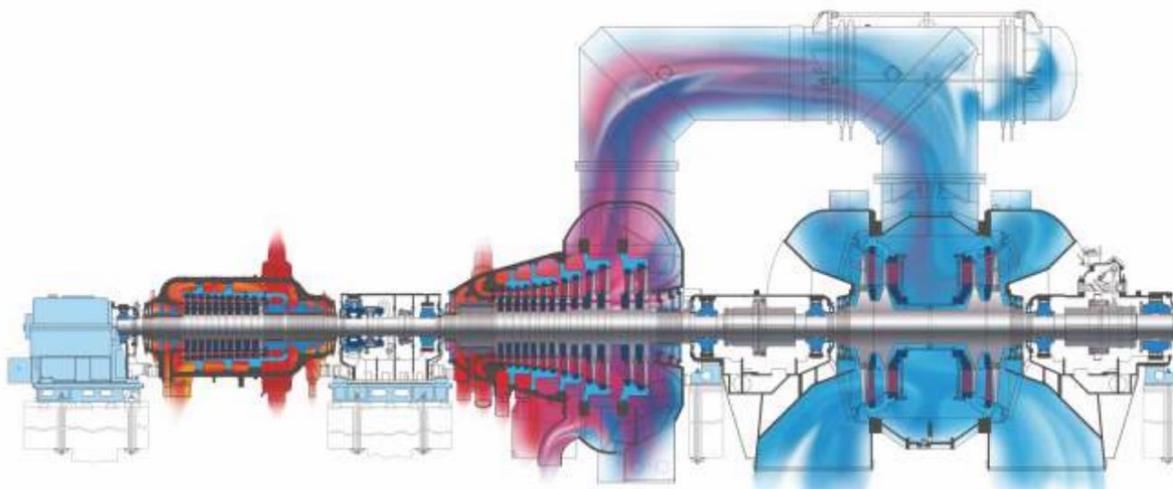


Рисунок 5.16 – Продольный разрез паровой турбины типа Т-125/150-12,8 производства УТЗ

ГЛАВА 6. МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП: ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КРИТЕРИИ

Авторами настоящего издания выполнена исследовательская работа по разработке, обоснованию и внедрению модульного принципа в производстве турбинного оборудования.

Целью работы являются методы и критерии модульного принципа проектирования паровых турбин, позволяющие обеспечить требуемый уровень технико-экономических показателей и повышение конкурентоспособности на всех этапах ЖЦ, то есть разработка и научное обоснование модульного принципа создания паровых турбин и паротурбинного оборудования с формированием подхода к проектированию и оптимизации модулей, позволяющих повысить эффективность выполнения КТПП, производства, монтажа, пусконаладочных работ, сервисного обслуживания, а также эксплуатационные и технико-экономические показатели при эксплуатации такого оборудования, что позволит снизить стоимость всего ЖЦ ПТУ, повысить технологичность конструкции, поднять конкурентоспособность производителя оборудования, исполнителей строительно-монтажных работ и пусконаладки, а также эксплуатирующей организации.

Достижение цели работы позволило разрабатывать и совершенствовать паровые турбины и паротурбинные установки с использованием новых принципов и технических решений, позволяющих добиться высоких технико-экономических и эксплуатационных показателей при сниженных затратах на КТПП и изготовление оборудования, а также с минимальными временными и финансовыми затратами выполнять реконструкцию и сервисное обслуживание такого действующего оборудования путем смены модулей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- комплексное исследование современного развития методов и подходов к проектированию, конструктивных схем с учетом оптимальности, адаптивности и технологичности конструкций паровых турбин отечественных и зарубежных производителей;
- разработка критериев и шкал оценки модульности конструкций

паровых турбин, в том числе с учетом цифровой зрелости предприятий-изготовителей;

- оценка модульности конструкций, применяемых в практике мирового паротурбостроения;

- разработка модульной концепции (комплекс принципов, методов и критериев) создания паротурбинного оборудования;

- расчетно-аналитическое исследование совершенствования конструкции паровых турбин при применении модульной концепции проектирования;

- выбор профилей модулей с определением требований к инструментам проектирования паровых турбин;

- исследование влияния инструментов модульной концепции на сопровождение различных этапов ЖЦ паровых турбин;

- апробация модульного принципа при разработке и совершенствовании паровых турбин производства УТЗ на различных этапах ЖЦ.

Работа построена на результатах теоретических и опытно-промышленных работ, которые позволяют разрабатывать и совершенствовать конструкции высококонкурентных паровых турбин для применения в строительстве и при реконструкции тепловых электрических станций.

В рамках выполнения работ получен ряд новых научных результатов:

- на основе комплекса междисциплинарных расчетно-аналитических исследований разработаны конструкции модульных паровых турбин и отдельных модулей, позволившие при оптимизации номенклатурного ряда турбин предприятия добиться высоких уровней технико-экономических показателей и надежности турбоустановок в целом, снизить трудоемкость, длительность разработки и стоимость изготовления оборудования, повысив привлекательность и конкурентоспособность продукции турбинного предприятия;

- впервые системным образом разработан, обоснован и реализован комплекс принципов, методов и критериев модульного проектирования паровых турбин;

- разработаны специальные шкалы комплексной оценки уровней модульности конструкций паровых турбин и цифровой зрелости турбинных предприятий; сформулированы целевые уровни унификации паровых турбин;

- показано, что внедрение модульных принципов создания паротурбинного оборудования позволяет повысить качество, технико-экономические показатели и конкурентоспособность паровых турбин и ПТУ при снижении затрат на их ЖЦ, а также сократить трудоемкость и длительность изготовления оборудования с получением дополнительных возможностей и инструментов для модернизации и сервиса такого оборудования;

- разработаны и изготовлены новые конструкции паровых турбин с оригинальными конструкторскими решениями, использующими модульный принцип, среди которых:

- одноцилиндровая теплофикационная паровая турбина для работы в составе двухконтурной парогазовой установки с двумя регулирующими отопительными отборами и одним производственным с возможностью достижения в одноцилиндровой турбине с активным облопачиванием мощности до 120 МВт [34];

- цилиндр турбины с унифицированным «квазидроссельным» парораспределением [107];

- разработаны и внедрены подходы, методики и инструменты совершенствования режимов эксплуатации паровых турбин и ПТУ, среди которых:

- методика повышения эффективности эксплуатации паровой турбины, основанная на «ведении» операционных параметров по критериальным кривым работы энергоблока [108];

- диаграмма режимов теплофикационной турбины для ПГУ;

- технические решения, основанные на результатах расчетно-аналитических исследований оптимизации переходных режимов эксплуатации паровых турбин.

Обозначая теоретическую значимость работы, необходимо сказать, что впервые разработанная модульная концепция (комплекс принципов, методов

и критериев), а также внедренные с ее использованием подходы и конструкции оборудования позволили заложить фундаментальную базу знаний для решения практических проектно-конструкторских оптимизационных задач, решаемых конструкторскими и технологическими бюро при создании современного паротурбинного оборудования.

Исследования позволили определить влияние подходов и инструментов конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) на конструкцию паротурбинного оборудования, процесс управления его ЖЦ и получаемый от их внедрения технико-экономический эффект. В работе выявлен потенциал развития и обеспечено совершенствование используемых подходов и инструментов на всех стадиях ЖЦ паротурбинного оборудования.

Также указывая на практическую значимость работы, необходимо обозначить, что внедрение разработанного комплекса принципов и результатов работы в процесс создания новых и модернизации существующих образцов паровых турбин позволяет существенно повысить эффективность разработки, изготовления, монтажа и пуско-наладки оборудования, а также повысить технико-экономические и эксплуатационные показатели паротурбинного оборудования энергоблока строящихся и реконструируемых объектов энергетики.

Проведенные исследования базировались на сочетании расчетных методов, основанных на использовании современного специализированного сертифицированного программного обеспечения, верифицированных и валидированных подходах и способах инженерного анализа, и решении практических задач при производстве, испытаниях и эксплуатации разработанного с использованием результатов работы оборудования. В работе использован системный подход и методы расчетно-аналитических исследований, опирающихся на опыт отечественного и мирового паротурбостроения.

Модульное проектирование турбин – определение и разработка отдельных блоков (модулей) для компоновки турбин с минимизацией затрат в течение их ЖЦ (и/или сроков изготовления) и управляемым уровнем их технико-экономических и эксплуатационных показателей.

Модульный принцип используется достаточно давно, в отечественном паротурбостроении с 50-х годов XX века, однако до сих пор в турбостроении не разработаны научные основы, и есть только лоскутные методики, подходы и принципы без формирования комплексной концепции.

В настоящей главе книги представлено описание разработки концепции модульного проектирования и сопровождения ЖЦ паровых турбин и турбинного оборудования как основного научно-технического направления развития турбинного завода и его продукции с реализацией, в том числе с реализацией и внедрением результатов проектов цифровой трансформации предприятий-участников этапов ЖЦ и оптимизации стандартных библиотечных модулей, что, как показано выше, является неотъемлемыми направлениями эффективного внедрения модульной концепции создания паротурбинного оборудования.

Трудоемкость работ по созданию и производству сложного наукоемкого основного и вспомогательного оборудования велика и потенциал ее снижения значителен не только на этапах КТПП и производства. Совершенно точно технически и экономически оправдан отказ от индивидуального проектирования и производства, поэтому следует использовать научно-обоснованные принципы и методологию, позволяющие применять глубоко проработанный модульный подход с разносторонне и многофакторно оптимизированной архитектурой конструкции и компоновки оборудования и собственно самих используемых модулей и других стандартных библиотечных элементов, включая специальные и общепромышленные для организации соединения модулей и их наполнения.

Сформулируем термин «Концепция модульного проектирования» – это развитие машиностроительного предприятия и его продуктов по трем направлениям: реализация модульного подхода, достижение цифровой

зрелости предприятия разработчика-производителя и постоянное автономное совершенствование библиотечных модулей.

При разработке концепции сформулировано целевое состояние по итогу ее внедрения – достижение уровня «Инновационный» по разработанной укрупненной шкале экспертной оценки, в соответствии с которым на турбинном предприятии происходит непрерывное совершенствование методов, подходов, бизнес-процессов, инструментов и ресурсов модульного проектирования с разработкой и внедрением инновационных решений. Это становится системой и культурой, и доля модулей в основном паротурбинном оборудовании по численности ДСЕ составляет более 70%, унификация – более 80%. В каждом новом проекте доли модульности и унификации должны расти относительно средних показателей по имеющемуся на тот момент на предприятии номенклатурному ряду его продукции, в том числе не только за счет создания более современных модулей и его наполнения, но и за счет оптимизации существующих библиотечных наработок с приданием им все большего числа признаков и большей функциональности.

Модульная концепция, включающая подходы по разработке и оптимизации модулей, модульной КТПП, основана на накопленном опыте проектирования, производства, анализе эксплуатации и сервиса турбин и турбинного оборудования преимущественно в АО «Уральский турбинный завод», АО «РОТЕК», на предприятии Группы «Силовые машины» на площадке Ленинградского металлического завода, Группы «НордЭнергоГрупп» в ПАО «Калужский турбинный завод» и дополнительно на предприятиях Группы «Газпром энергохолдинг индустриальные активы». При разработке учтен опыт, полученный из совместной работы с компанией Siemens, которая реализовывает деление оборудования на элементы и использует их в конструкции оборудования только на основании хорошо зарекомендовавших себя референтных конструктивных решений, которые

прошли все этапы ЖЦ с учетом всех возможных особенностей, выстраивая в новых проектах создания паровых турбин высококомодульную систему из современных компонентов (модулей).

По итогам разработки и внедрения на различных турбинных предприятиях принципов создания модульной конструкции паровых турбин сформулированы основные тезисы такой методики, которая использовалась при разработке паровых турбин [33, 98-106]:

1. Единовременно рассматривать создание нового или расширение существующего номенклатурного ряда продукции турбинного предприятия.

2. Модельный ряд (класс, семейство или серия) внутри номенклатурного ряда создается одновременно с созданием профиля базового для него типа.

3. При разработке конструкции оборудования обязательно (!) использовать конструктивную и технологическую нормализацию, стандартизацию, конструктивную и технологическую преемственность.

4. Закладывать в стандартные библиотечные элементы (модули, подмодули) автономность их использования в максимальном количестве типов оборудования.

5. Закладывать в стандартные библиотечные элементы возможность их использования в оборудовании без изменения не только на этапе КПП, но и на этапе ТПП и последующих этапах, то есть без дополнительных доработок различного рода приспособлений, оснастки, инструмента, сопроводительных документов и атрибутов, технологических процессов.

6. Закладывать в стандартные библиотечные элементы автономность и гибкость их совершенствования и оптимизации.

7. Использовать только стандартизированные библиотечные соединения стандартных библиотечных элементов.

8. Организовать ведение параллельной работы по КПП, ТПП и на других этапах ЖЦ оборудования в едином информационном поле.

9. Закладывать в стандартные библиотечные элементы равноценность вариантов их автономного собственного производства, автономного производства по внешней кооперации или смешанного производства.

10. Удобство и преемственность использования и замены параметрических стандартных библиотечных элементов.

11. Нормализация и стандартизация ряда оборудования и модулей, что не должно приводить к ухудшению параметров массогабаритных характеристик, показателей качества и эксплуатационных показателей надежности.

12. Научно обоснованные и «точно по правилам» выбор параметров геометрического и функционального описания и оптимизация стандартных библиотечных элементов.

13. «Точно по правилам» выбор рабочих диапазонов параметров геометрического и функционального описания в соответствии с запросами к конструктивным, технологическим, функциональным и технико-экономическим требованиям проектов.

14. Использовать конструктивный синтез, включающий конструктивный, технологический и функциональный синтез – возможность присоединения к одной других, неважно «новых» или «старых».

15. Использовать комплексные обобщенные решения конструкторских, технологических и других подразделений турбинного предприятия и всех участников этапов ЖЦ оборудования.

16. Конструкция стандартных библиотечных элементов должна обладать наибольшим числом геометрических и функциональных признаков без ущерба надежности, качеству и себестоимости.

17. Использовать цифровые принципы, подходы, методики, средства и инструменты управления ЖЦ оборудования: от КТПП до сервиса.

В рамках разработки Концепции создания паровых турбин и турбинного оборудования на основании приведенных тезисов используемой методики и анализа Рекомендаций Р 50-54-103-88 «Модульные и базовые конструкции изделий. Основные положения» [109], разработанный по этой части взамен ГОСТ 23945.1-80 [110], входящий в комплекс нормативно-технических документов по унификации [110-118], сформулируем основные положения Концепции.

Для решения задачи разработки методики анализа конструкции и потенциала совершенствования конструкции основного и вспомогательного оборудования паротурбинных установок требуется последовательно и циклически реализовывать следующие мероприятия:

1) Организовать обратную связь от собственных участников ЖЦ, то есть обеспечивать по принадлежности информирование сотрудников турбинного предприятия о протекании ЖЦ оборудования на системной основе. Для этого организовывается ограниченный настроенный доступ к PDM-системе и PLM-системе, к любым другим служебным площадкам и ресурсам (библиотеки, архивы, файл-серверные площадки, чаты, платформы, настройка электронной почты и др.), обеспечивающим как оперативное системное объединение и контактирование участников процессов сопровождения и совершенствования ЖЦ оборудования, так и хранение и связь с информационными ресурсами других цифровых систем. Важно отметить, что качество налаженных связей, информирования и использования ресурсов зависит от количества и квалификации, подготовки и инструктирования работе с ресурсами собственных участников на различных этапах ЖЦ (конструктор, технолог, шеф-инженер, наладчик, сервис-инженер, инженер-резидент, испытатель и т.д.), а также доступности и уровня таких информационных ресурсов.

2) Разработать и внедрить механизм сбора информации по оборудованию от сторонних организаций – участников ЖЦ, на этапах, где по объективным причинам не могут комплексно участвовать собственные сотрудники турбинного предприятия. Таким образом, организовывается системная работа по заочному участию предприятия-разработчика и производителя оборудования в сопровождении ЖЦ. Средствами сбора и анализа являются:

- периодические офлайн-запросы данных различными специализированными отделами КБ (отделы надежности, эксплуатации, сопровождения сервиса и др.);

- онлайн автоматизированные и автоматические системы мониторинга, прогностики и диагностики оборудования с последующей разноуровневой

обработкой;

- формирование профильными конструкторскими отделами КБ информационных бюллетеней и отчетов по эксплуатации и сервису, а также корректировке работы и конструкции оборудования с обязательными требованиями по заполнению эксплуатирующими и сервисными организациями опросных листов;

- проведение конференций и семинаров с эксплуатирующими и сервисными организациями;

- испытания, исследования и др.

Ранее предприятиями частично использовался ГОСТ 19490-74 [119], устанавливающий содержание форм учета эксплуатационной информации о надежности изделий: сводного перечня видов отказов изделий и сводного перечня оценок показателей надежности изделия и его составных частей.

3) Анализ информации и оценка потенциала совершенствования оборудования и его ЖЦ с учетом разрыва текущего и целевого состояния на основании знаний и требований современных «инновационных» уровней развития модели турбинного предприятия.

4) Разработка, имитация, опробование и внедрение мероприятий по совершенствованию оборудования и его ЖЦ.

5) Помимо экспертных оценок технического уровня оборудования, его уровней унификации и стандартизации, в том числе с использованием специальных экспертных шкал для оценки уровня унификации/модульности разработчиков и производителей паротурбинного оборудования в рамках выполнения критического обзора источников, возможно использование стандартов предприятия или отраслевых, которые разработаны специально для конкретного оборудования. В отечественном паротурбостроении такие стандарты отсутствуют, однако отдельные предприятия в рамках проектов трансформации устанавливают свои показатели такой оценки, их номинальные и целевые уровни.

Ключевыми показателями такой оценки следует считать отдельные показатели назначения, надежности, технологичности, унификации и экономичности. Такие показатели обозначены в государственных

методических указаниях по оценке технического уровня и качества промышленной продукции, и определению уровня унификации и стандартизации [120, 121].

Важными показателями назначения применительно к турбинному оборудованию являются:

- конструктивные показатели;
- функциональные показатели.

Функциональные показатели характеризуют полезный эффект от эксплуатации и инновационность технических решений, реализованных в оборудовании и, как правило, являющихся эксплуатационными или технико-экономическими. К таким показателям относятся: удельная мощность, производительность оборудования, эксплуатационная точность и различные другие выходные показатели, являющиеся результатом качества и свойств оборудования.

Конструктивные показатели характеризуют основные проектно-конструкторские решения: типоразмер, возможности монтажа, пусконаладки и установки оборудования, агрегатирование, взаимозаменяемость и другие. К таким показателям относятся такие важные показатели: коэффициент сборности (блочности, который можно интерпретировать в коэффициент модульности, характеризующий уровень модульности если вместо доли элементов в специфицируемых блоках использовать долю элементов в стандартных библиотечных модулях), удельные размеры, присоединительные размеры, многофункциональность, коэффициент эффективности взаимозаменяемости отдельных частей изделия, наличие дополнительных устройств и другие.

В соответствии с [120] «Коэффициент сборности (блочности) изделия характеризует простоту и удобство его монтажа и представляет собой долю конструктивных элементов, входящих в специфицируемые блоки, в общем количестве элементов, входящих в состав изделия.

Коэффициент сборности (блочности) изделия определяют по формуле:

$$K_{сб} = \frac{Q_c}{Q_{об}} = 1 - \frac{Q_n}{Q_{об}}$$

где Q_c – количество специфицируемых составных частей изделия; Q_n – количество неспецифицируемых составных частей изделия; $Q_{об}$ – общее количество составных частей изделия, рассчитываемое по формуле:

$$Q_{об} = Q_c + Q_n».$$

Под уровнем унификации и стандартизации изделий понимают насыщенность их, соответственно, унифицированными и стандартными библиотечными составляющими (детальями, модулями, подмодулями), а также уровень унификации с другим оборудованием номенклатурного ряда предприятия».

В соответствии с [120] «унифицированными являются:

- составные части изделия, выпускаемые по стандартам данного предприятия, если они используются хотя бы в двух различных изделиях, изготавливаемых этим предприятием;

- составные части изделия, не изготавливаемые на данном предприятии, а получаемые им со стороны в готовом виде в порядке кооперирования;

- заимствованные составные части изделия, т. е. ранее спроектированные для конкретного изделия и примененные в двух или более других изделиях.

Допускается заимствование составных частей у изделий, снятых с производства, при условии, что эти части отвечают современным требованиям, и техническая документация на изготовление сохранилась».

Стандарты [120, 121] обозначают для оценки уровня унификации и стандартизации нескольких основных коэффициентов:

- коэффициент применяемости:

$$K_{np} = \frac{n - n_0}{n} \cdot 100,$$

где n – общее число типоразмеров составных частей в изделии; n_0 – число типоразмеров оригинальных деталей, то есть деталей, разработанных впервые для этого изделия.

Коэффициент применяемости может рассчитываться:

- по типоразмерам деталей в соответствии с представленной формулой;

- по сборочным единицам или стандартным библиотечным модульным элементам, тогда вместо n и n_0 в формуле должно быть использовано общее число и число оригинальных сборочных единиц или модулей в изделии/оборудовании;

- по трудоемкости, массе, стоимости, числу деталей, тогда вместо n и n_0 в формуле должны быть использованы соответствующие параметры.

Коэффициент межпроектной (взаимной для групп оборудования: серий, семейств, классов) унификации, $K_{му}$, %:

$$K_{му} = \frac{\sum_{i=1}^H n_i - Q}{\sum_{i=1}^H n_i - n_{max}} \cdot 100,$$

где H – количество рассматриваемых изделий/оборудования/проектов;

n_i – количество типоразмеров составных частей в i -м изделии;

Q – общее количество типоразмеров составных частей, из которых состоит группа из H изделий;

n_{max} – максимальное количество типоразмеров сборочных единиц одного изделия/проекта.

Коэффициент повторяемости составных частей в общем числе составных частей изделия K_n , %:

$$K_n = \frac{N - n}{N - 1} \cdot 100,$$

где N – общее количество всех составных частей изделия;

n – общее количество типоразмеров оригинальных составных частей.

При расчете приведенных коэффициентов крепежные детали, детали соединений, шпонки, прокладки и другие подобные детали не берутся в учет.

В таблице 6.1 приведены результаты расчета коэффициентов унификации по выборке паровых турбин АО «УТЗ», разработанных до 2012 года с использованием традиционных подходов к КТПП.

Расчетными исследованиями показано, что оценочные коэффициенты унификации паровых турбин УТЗ без применения модульных принципов (разработки до 2012 года) достигли своих предельных значений.

Максимальное значение коэффициента применяемости K_n составило 67,9%; коэффициента межпроектной унификации, $K_{му}$ – 74,6%, а коэффициента повторяемости – 28,5%.

До 2012 года ни по одной турбине УТЗ не были достигнуты максимальные значения 3 (и даже 2, кроме К-63-8,8) коэффициентов. Из результатов расчета сделаны выводы о том, что без применения в конструкции паровых турбин модульных принципов невозможно дальнейшее повышение коэффициентов унификации.

Таблица 6.1 – Коэффициенты унификации по выборке паровых турбин производства УТЗ, разработанных с использованием традиционной КТПП

Тип турбины	Коэффициенты унификации		
	применяемости K_{np}	межпроектной унификации $K_{му}$	повторяемости K_n
ПТ-30/35-8,8	0,667	0,746	26,7
Т-50/60-8,8	0,679		28,5
К-63-8,8	0,679		28,5
Т-60/65-12,8	0,600	0,692	22,2
ПТ-65/75-12,8	0,630		23,9
ПТ-90/120-12,8	0,620		24,1
Т-95/105-8,8	0,636		23,4
Тп-115/125-12,8	0,667		23,3
Т-120/130-12,8	0,440		25,0
Т-53/67-8,0 (для ПГУ-230)	0,609	–	24,3
Максимальные значения коэффициентов	0,679	0,746	28,5

Оптимальные уровни унификации и стандартизации оборудования определяются по сравнительной себестоимости различных вариантов производства.

Как обозначено выше и следует из приведенных выше формул, для повышения показателей следует закладывать и выполнять высокие

требования к конструкции основного оборудования, к принципиальным схемам, компоновкам, характеристикам вспомогательного оборудования, что максимально эффективно с минимальными затратами необходимо обеспечивать на этапе КПП, устранять недостатки на этапах ТПП, производства, испытаний, монтажа, пусконаладки с дополнительными затратами на возможную корректировку КПП с последующей доработкой оборудования и всей вспомогательной обвязки, что зачастую приводит к дублированию затрат на всех последующих этапах до ввода в эксплуатацию, но приведет к серьезному снижению затрат на этапах эксплуатации и сервиса.

Применение в конструкции паровых турбин УТЗ модульных принципов обеспечило улучшение всех коэффициентов унификации по отношению к их уровню до 2012 года.

В таблице 6.2 показан рост коэффициентов унификации паровых турбин производства АО «УТЗ» с внедрением модульных конструкций.

Таблица 6.2 – Рост коэффициентов унификации паровых турбин производства УТЗ с внедрением модульных конструкций

Тип турбины		Коэффициенты унификации		
До 2012 года	После 2012 года	применяемости K_{np}	межпроектной унификации $K_{му}$	повторяемости K_n
Т-50/60-8,8	Т-40/50-8,8	0,679 → 0,695	0,746 → 0,824	28,5 → 28,8
Т-60/65-12,8	К-65-12,8	0,600 → 0,712		22,2 → 23,9
Т-53/67-8,0	Т-63/76-8,8	0,609 → 0,794		24,3 → 29,4
Т-120/130-12,8	Т-125/150-12,8	0,440 → 0,647	0,692 → 0,772	25,0 → 25,5
Максимальные значения коэффициентов до 2012 года		0,679	0,746	28,5
Максимальные значения коэффициентов после 2012 года		0,794	0,824	29,4

Достигнутый уровень унификации обеспечил сокращение трудоемкости и длительности разработки и производства паровых турбин УТЗ на 25-30% и позволил изготавливать образцы из номенклатурного ряда в течение 10-14 месяцев против 14-20 месяцев в период до внедрения.

Для оценки уровня унификации и использования модульных подходов к разработке паротурбинного оборудования использовалась собственная экспертиза и специально разработанная шкала, которая сведена в таблицу 6.3.

Авторами изучены различные подходы [122-124] к унификации и модульности, используемые в разные периоды времени в различных сегментах промышленности, и принял решение для аналитического обзора использовать собственную укрупненную «сквозную» шкалу от уровня начальной унификации безмодульных конструкций до инновационного наукоемкого подхода к созданию номенклатурного ряда основной продукции паротурбинных предприятий.

Уровень унификации/модульности (далее – уровень модульности) основной продукции предприятия, естественно, зависит от заложенных в концепцию подходов и принципов создания модульной конструкции и стадии реализации принятой целевой концепции. При этом такая укрупненная шкала является экспертной, учитывает использование методов обеспечения модульности, уровни развития модульных подходов при выполнении эскизно-технического проекта, технического проекта, КТПП при достижении показателей надежности, функциональности, конструктивности, технологичности изготовления, эксплуатационной технологичности, ремонтпригодности, контролепригодности, простоты взаимозаменяемости модулей/блоков и других основных показателей оборудования на всех этапах ЖЦ и использована только для критического обзора, что позволяет выполнить обзор и при разном доступе к источникам и их качестве составить резюме, необходимое по содержанию для постановки задач и формирования целей работы.

В рамках разработки модульной концепции разработана методика комплексной количественно-качественной оценки модульности создания основного паротурбинного оборудования.

Таблица 6.3 – Шкала оценки турбинного предприятия по уровню модульности основной паротурбинной продукции

Уровень	Наименование уровня	Описание оценочных критериев уровня модульности
1	Начальный	<p>При разработке и производстве основного и вспомогательного оборудования используются внедренные теоретические основы деталей и машин. КТПП является «реактивной», то есть результаты такой деятельности мало предсказуемы, а подходы и результаты от проекта к проекту не всегда повторяются. Использовано нормализованное конструирование: типизация и стандартизация, которая позволяет добиваться унификации до 50%. Коэффициент применяемости $K_{пр}$ не превышает 50%.</p>
2	Базовый	<p>Методология модульного проектирования отсутствует. Подходы, процессы и ресурсы модульного проектирования используются индивидуально, нестабильно. Только некоторые процессы определены документами, результат модульности конструкции отдельного оборудования зависит от усилий отдельных сотрудников и руководителей. Процессы в отдельных номенклатурных рядах становятся повторяющимися, что позволяет повторять успешные решения. Доля модулей в основном паротурбинном оборудовании по численности ДСЕ составляет менее 25%, унификация – менее 50%. Коэффициент применяемости $K_{пр}$ не превышает 50%.</p>

Продолжение таблицы 6.3

Уровень	Наименование уровня	Описание оценочных критериев уровня модульности
3	Средний	Методы, подходы, процессы и ресурсы модульного проектирования используются, но документированы, стандартизованы лоскутно, что не позволяет управлять ими на всех уровнях комплексно. Доля модулей в основном паротурбинном оборудовании по численности ДСЕ составляет более 25%, унификация – более 50%. Коэффициент $K_{пр}$ превышает 50%.
4	Высокий	Методы, подходы, процессы и ресурсы модульного проектирования документированы, стандартизованы и интегрированы, что позволяет управлять ими на всех уровнях комплексно. Доля модулей в основном паротурбинном оборудовании по численности ДСЕ составляет более 50%, унификация – более 60%. Коэффициент $K_{пр}$ превышает 70%.
5	Инновационный	Происходят непрерывные совершенствования методов, подходов, бизнес-процессов, инструментов модульного проектирования с разработкой и внедрением инновационных решений, что становится системой и культурой. Доля модулей в оборудовании по численности ДСЕ составляет более 70%, унификация – более 80%. В каждом новом проекте доли модульности и унификации растут относительно средних показателей. Модули оптимизируются. Коэффициент $K_{пр}$ превышает 80%.

$K_{пр}$ – коэффициент применяемости по РД 50-33-80 [125] характеризует уровень конструктивной преемственности деталей и сборочных единиц (ДСЕ) из актуального архива предприятия в разработанном изделии.

Такая шкала, как и шкала модели оценки цифровой зрелости, соответствует модели оценки «снизу-вверх», так как авторами для удобства оценки введена пятибалльная шкала с равнением на целевую эталонную бизнес-модель на Уровне 5, для достижения которой необходимо шаг за шагом реализовать план мероприятий, направленных на совершенствование модульных подходов и принципов, средств и инструментов их разработки и применения на протяжении всего ЖЦ выпускаемого оборудования, что, как следствие, приводит к зрелости предприятия максимально эффективно создавать, производить и сопровождать основное и вспомогательное паротурбинное оборудование модульной конструкции.

ГЛАВА 7. АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ НА МОДУЛЬНЫХ ПРИНЦИПАХ

Основные тезисы процессов разработки и внедрения эффективной модульной концепции создания паротурбинного оборудования сформулированы так:

1. Внедрение Единого информационного пространства предприятия, создающего и производящего паротурбинное оборудование или уже ставшая привычной аббревиатура PLM (Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом продукции) с возможностью расширения до управления всем ЖЦ оборудования на всех этапах с участием всех участников ЖЦ (CALS-технологии (Continuous Acquisition and Lifecycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции).

2. Внедрение цифровых средств КПП, позволяющих использовать: ЦМИ как аннотированный подлинник с бесчертежными технологиями, управление требованиями и конфигурациями, сквозное нисходящее проектирование, выстроенные ассоциативные связи, широкое и эффективное использование инженерных расчетов и многокритериальной оптимизация конструкции.

3. Внедрение связки БС-ЦМИ для реализации концептуального проектирования с дополнительными функциями интеллектуальности, с широкими функциями ассоциативности и параметризации, а также возможностью определения основных осей, плоскостей, систем координат разрабатываемого изделия и взаимного расположения отдельных узлов и агрегатов, и задания требований к точности их расположения относительно основных осей и систем координат изделия и др.

4. Внедрение подходов к унификации технологических процессов и переход к групповым и типовым технологическим процессам.

5. Разработка и внедрение специальных правил формирования профиля базовых образцов оборудования, создания и развития номенклатурного ряда предприятия.

6. Разработка и внедрение специального классификатора всех типов объектов НСИ (стандартные изделия, прочие изделия, материалы и др.) для

всех этапов ЖЦ с использованием принципов создания абстрактной иерархической структуры изделия.

7. Разработка и внедрение конструкторско-технологических подходов, принципов, правил, средств и инструментов, позволяющих ограничить номенклатурные ряды оборудования и увеличить серийность составных частей, то есть стандартных библиотечных модулей и подмодулей, и повысить эффективность ЖЦ такого оборудования от его разработки до сервисного обслуживания и утилизации.

8. Формирование и расширение библиотеки стандартных библиотечных модулей, осуществляя планомерную комплексную разработку и модифицирование модулей и подмодулей одновременно с нормализацией и стандартизацией их соединений, решая такие задачи силами конструкторских подразделений под контролем подразделений по стандартизации в едином информационном поле с настроенными научными подходами.

9. Подбор геометрических параметров модулей и подмодулей должен позволять их взаимозаменяемость, обеспечение технологичности и добиваться малозатратными способами их максимальной оптимизации для обеспечения высоких технико-экономических показателей и функциональных параметров оборудования при сохранении высоких показателей его качества и надежности.

10. Реализовать и поддерживать возможность непрерывного совершенствования методов, подходов, бизнес-процессов, инструментов и ресурсов модульного проектирования с разработкой и внедрением инновационных решений.

11. Реализовать и поддерживать в конструкции и ЖЦ оборудования возможность и гибкость использования инструментов взаимовыгодной синхронизации ЖЦ смежного основного оборудования энергоблока.

На рисунке 7.1 представлено выделение конструктивных частей, в которых в соответствии с модульными подходами к разработке паровых турбин формируется разделение на модули, подмодули и автоматизированные рабочие места (АРМ), использующие параметрические модели для разработки модуля или изменяемой части, не являющейся модулем, например,

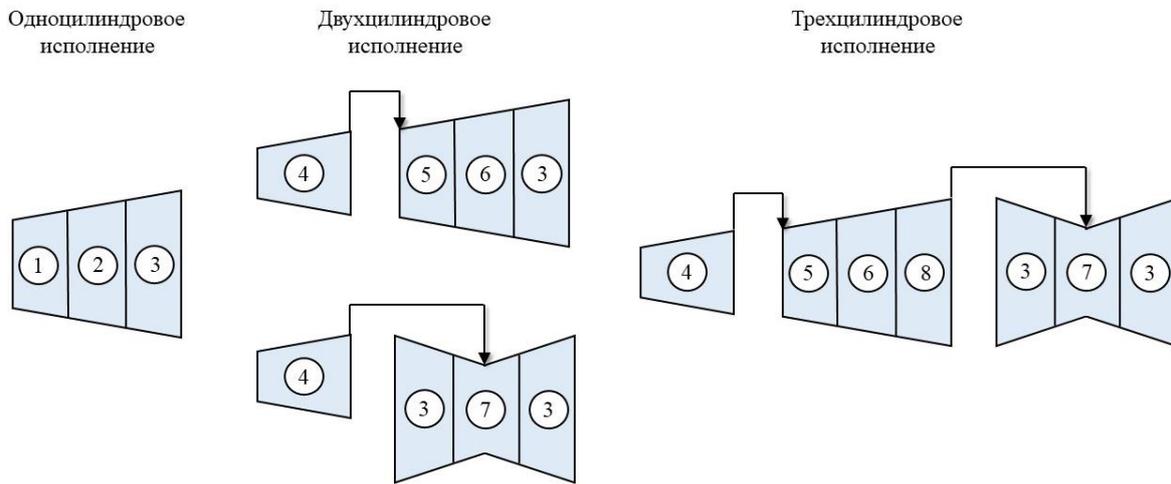


Рисунок 7.1 – Выделение конструктивных частей на конструктивных схемах паровых турбин АО «УТЗ»: нумерация конструктивных частей в тексте

адаптируемый под конкретные параметры пара и режимы отсек проточной части. Таких модулей и АРМов может быть как один, так и несколько на каждую часть, но именно так в «крупную клетку» авторами принято разделять на зоны паровую турбину. Такое разделение позволяет оперативно сформировать возможный концепт нового проекта турбины. Такой подход разработан и применен на АО «УТЗ» и основывается на следующем разделении конструкций паровых турбин на функциональные модули или части [107]:

1. Цилиндр. Паровпускная часть с крепежом (одноцилиндровое исполнение) – варианты для разного давления свежего пара;
2. Цилиндр. Средняя часть с крепежом (одноцилиндровое исполнение);
3. Цилиндр. Выхлопная часть с крепежом (одно-, двух- и трехцилиндровое исполнение) – несколько вариантов под разные ступени с высотами рабочих лопаток: 432, 550, 660, 830 и 940 мм;
4. Наружный корпус цилиндра высокого давления (двух- и трехцилиндровое исполнение);
5. Паровпускная часть цилиндра: цилиндра среднего давления (трехцилиндровое исполнение); однопоточного цилиндра низкого давления (двухцилиндровое исполнение);
6. Цилиндр среднего давления. Средняя часть (трехцилиндровое исполнение);

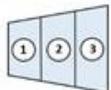
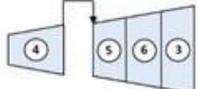
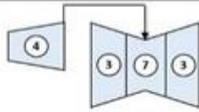
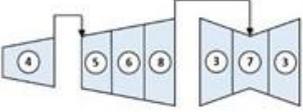
7. Двухпоточный цилиндр низкого давления. Паровпускная часть с крепежом (двух- и трехцилиндровое исполнение).

8. Выхлопная часть ЦСД трехцилиндровой турбины.

Такое выделение конструктивных частей на конструктивных схемах дает предпосылки и является первым подготовительным шагом к реализации модульной концепции создания паровых турбин.

В таблице 7.1 представлено выделение конструктивных частей на конструктивных схемах номенклатурного ряда паровых турбин АО «УТЗ» с учетом типов турбин, диапазонов мощности и давлений свежего пара.

Таблица 7.1 – Выделение конструктивных частей на конструктивных схемах паровых турбин номенклатурного ряда АО «УТЗ»: нумерация конструктивных частей в тексте

№	Наименование конструкции	Типы турбин	Диапазоны мощности, МВт/ давление свежего пара, МПа	Конструктивная схема турбины
1	Одноцилиндровая	ПТ-30/35-8,8; К-63-8,8 Т-50/60-8,8; К-65-12,8 Т-40/50-8,8; Т-63/76-8,8	10...120/ 1,0...12,8	
2	Двухцилиндровая с одним выхлопом	Т-60/65-12,8; Т-53/67-8,0 ПТ-65/75-12,8 ПТ-90/120-12,8 ПТ-140/165-12,8	50...190/ 8,8...14,7	
3	Двухцилиндровая с двумя выхлопами	КТ-120-8,8 К-200-12,8	90...330/ 8,8...23,5	
4	Трехцилиндровая	Т-120/130-12,8 Т-113/145-12,4 Т-185/220-12,8	120...400/ 8,8...23,5	

На рисунке 7.2 укрупненно показано выделение модулей в конструктивных частях паровой турбины типа Т-63/76-8,8 производства АО «УТЗ».

Далее на базе выполненного критического обзора и проведенного детального анализа существующих конструкций паровых турбин, компоновочных решений и подходов к созданию паровых турбин различных отечественных и зарубежных производителей и ранее сформулированных основных положений новой концепции модульного проектирования паровых турбин и паротурбинных установок изложены детали и условия реализации

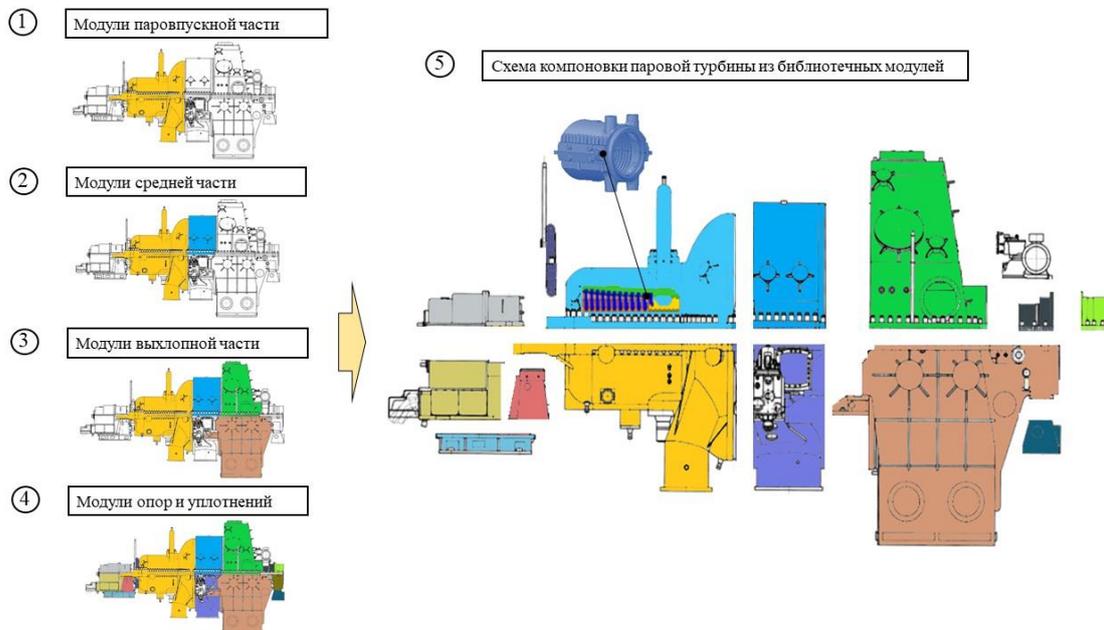


Рисунок 7.2 – Выделение модулей в конструктивных частях паровой турбины типа Т-63/76-8,8 УТЗ

таких положений, позволяющих добиться для разработки нового оборудования трудовых, временных и финансовых ресурсов, соизмеримых с затратами на сопровождение серийной продукции.

По общепромышленным правилам: модуль – это самостоятельное изделие, имеющее автономную документацию на изготовление, полностью собранное, прошедшее испытания и готовое к сборке оборудование. В турбиностроении такое понимание модуля и входящих в него подмодулей/блоков/элементов неосуществимо применительно ко всем модулям конструкции, так как турбина является динамическим оборудованием и состоит из статорной и роторной частей. Поэтому к такому общепромышленному пониманию модульной конструкции можно отнести только часть статорной конструкции, собранной из готовых библиотечных стандартных модулей, в которые не входит облопачивание статора. Облопачивание статора вместе с облопачиванием ротора, а точнее, «ротором в сборе» целесообразно разрабатывать от расчета до конструирования совместно единым «условным параметрическим модулем», который является параметрической проточной частью конкретного цилиндра паровой турбины. При этом условность такого модуля заключается в отсутствии необходимости или даже целесообразности по нему формировать конструкторскую структуру, то есть спецификацию, а сразу разбить на следующий низлежащий

уровень – блоки/подмодули: облопачивание статора группы ступеней (отсека/обоймы или цилиндра), диафрагмы и ротор в сборе, каждый из блоков может включать блоки нижнего уровня (входящие сборочные единицы) или элементы (детали).

Основной тезис модульной концепции формирования ряда паровых турбин на предприятии звучит так – **при разработке и производстве должен быть обеспечен единый системный подход**. Основная цель модульной концепции состоит в сокращении сроков выполнения КТПП, обеспечении материалами и компонентами, а также собственно производства оборудования с безусловным улучшением его эксплуатационных свойств, позволяющих получить положительный экономический эффект при эксплуатации и сервисном обслуживании. Соответственно, концепция должна обеспечивать ограничение библиотеки стандартных модулей при полноценном формировании номенклатурного ряда паротурбинного оборудования для удовлетворения всей потребности заказчиков в выпускаемом предприятием оборудовании.

При решении задачи разделения паровой турбины на части фактически решается задача образования структурной схемы изделия, которая используется при построении базовой структуры. При этом необходим системный подход к такому действию по созданию паровой турбины. Необходимо проанализировать все внешние связи изделия, то есть формализацию всех граничных условий в виде описания функциональных и геометрических параметров и показателей как оборудования в целом, так и отдельных ее потенциальных составляющих, модулей, подмодулей и других стандартных библиотечных элементов. Затем уточняются функции и геометрия составных частей с возможной переразбивкой, учитывая их взаимодействия внутри конструкции турбины.

Первым подготовительным этапом для внедрения модульной конструкции в паротурбостроении следует выполнить разделение конструктивных схем паровых турбин на конструктивные части. Конструктивные части выделяются одновременно во всей номенклатуре паровых турбин турбинного предприятия.

На рисунке 7.3 представлен алгоритм модульного подхода создания паровой турбины и совершенствования ее конструкции при управлении ЖЦ.



Рисунок 7.3 – Алгоритм модульного подхода создания паровой турбины и совершенствования ее конструкции при управлении жизненным циклом

Шаги (1)-(3) алгоритма по выделению конструктивных частей на конструктивных схемах, а затем в турбинах всего номенклатурного ряда предприятия позволяют прийти к единообразию укрупненного разделения турбин совершенно различных конструкций, типов, схем ПТУ и мощностей на части крупнее модулей, что позволяет упростить разделение наукоемкого изделия на модули и их составные части с унификацией их по общим признакам, преимущественно избежав итерационного уточнения их разделения на всех уровнях и описания составных частей на всех уровнях.

В соответствии с шагом (2) алгоритма на рисунке 7.4 показано выделение конструктивных частей в номенклатуре паровых турбин АО «УТЗ».

На шаге (3) выполняется исследование конструктивных частей, что позволяет установить между ними общие признаки и оценить возможность унификации по геометрическим (размерам и соединению) и функциональным (назначению) параметрам. На рисунок 7.5 показан пример с выхлопными патрубками.

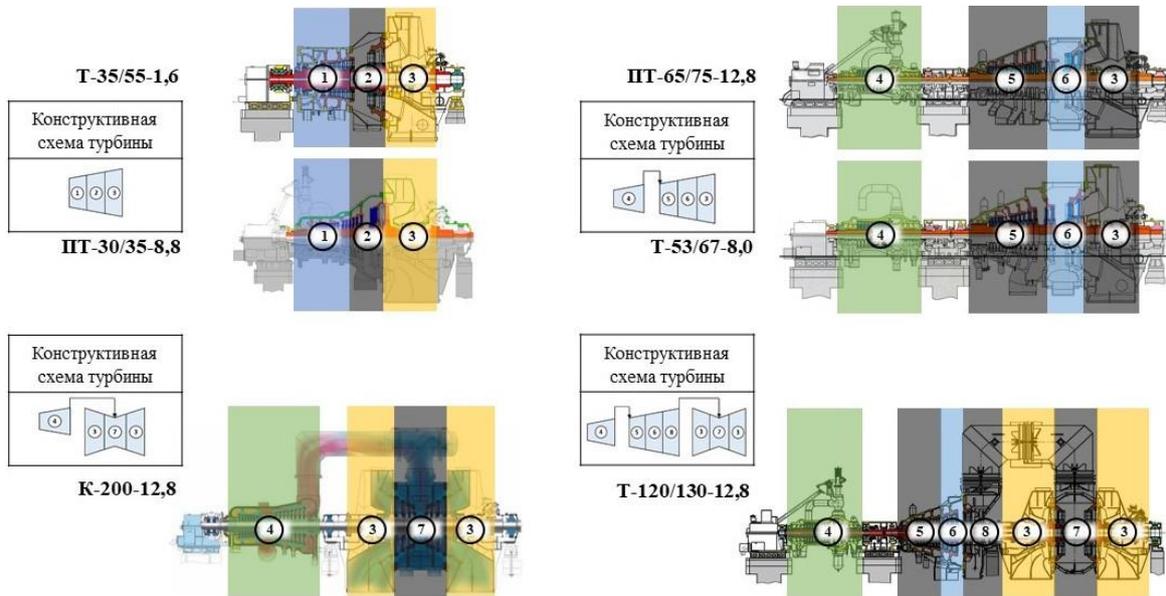


Рисунок 7.4 – Выделение конструктивных частей в номенклатуре паровых турбин УТЗ: нумерация представлена в тексте к рисунку 7.1

Как показано на рисунке 7.6, унификация сократила ряд конструктивных частей паровых турбин АО «УТЗ». Из нового меньшего ряда конструктивных частей разработан больший номенклатурный ряд турбин.

При этом некоторые типы двухцилиндровых турбин, разработанные традиционными методами КТПП (см. рисунок 7.6) в модульной конструкции, выполнены в одноцилиндровом исполнении.

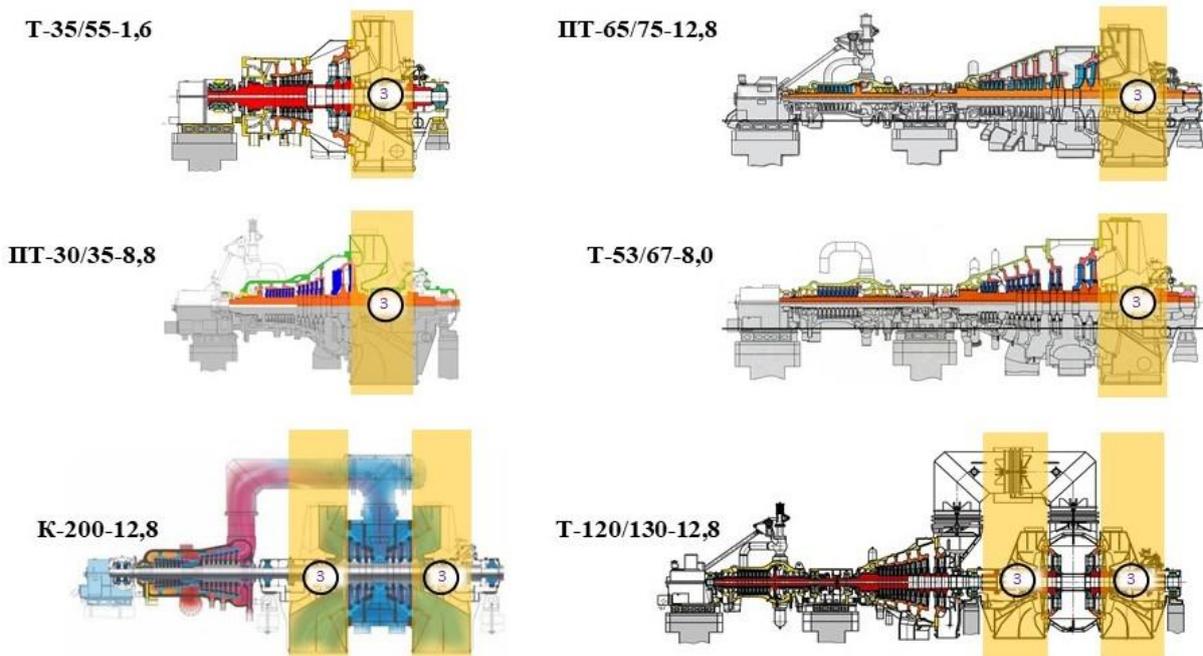


Рисунок 7.5 – Выделение конструктивных частей в номенклатуре паровых турбин УТЗ: выхлопные патрубки

На шагах (4)-(7) выполняется работа с модулями: выделение модулей в конструктивных частях, унификация модулей с объединением их по общим признакам, оптимизация облика и характеристик модулей с совершенствованием их конструкции и расширением назначения, что позволяет сократить их количество в библиотеке.

На основании опыта создания паровых турбин сформулированы основные и дополнительные принципы выделения и разработки модулей.

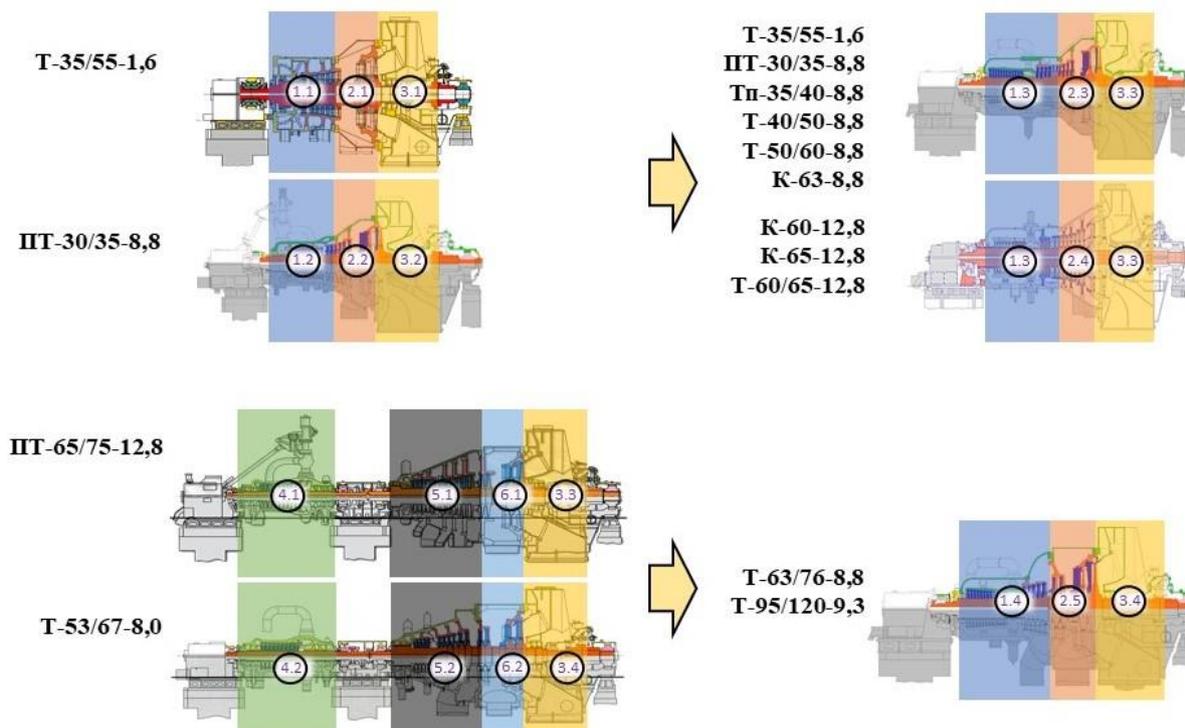


Рисунок 7.6 – Выявление общих признаков и унификация конструктивных частей в номенклатуре паровых турбин УТЗ: нумерация конструктивных частей в формате X.Y, где X – номер конструктивной части; Y – номер исполнения конструктивной части в ряду

Модуль должен обеспечивать следующие основные принципы (требования по конструкции и технологичности):

- расширенный диапазон параметров, охватывающий всю или большую часть линейки ПТУ;
- унификация длинноцикловых заготовок;
- совместимость присоединения и унификация соединительных элементов;
- функциональность (максимальный набор возможностей по назначению);

- гибкая система однотипных библиотечных ДСЕ модуля;
- взаимозаменяемость, технологичность конструкции и сборки.

Дополнительные принципы разработки модулей (влияние условий проекта и производства):

- сокращенный срок постановки и собственно производства;
- альтернативность выбора станочного парка и технологических возможностей;
- автономность разработки одним конструкторским подразделением;
- гибкость использования типовой оснастки, приспособлений, приборов и инструмента.

Такие принципы, по которым заданы значения или диапазоны значений, позволяют ограничить библиотеку модулей с возможностью применения одних и тех же модулей в максимальном количестве паровых турбин различного типа, назначения, принципиальных схем, а также задействовать для разработки конкретного модуля ограниченное количество конструкторов одного подразделения, которое имеет возможность автономной разработки модулей, при этом при изготовлении иметь максимальную альтернативу выбора станочного оборудования, что позволяет широко использовать внутривозовскую, внутригрупповую и внешнюю кооперацию.

Последние шаги (8) и (9) алгоритма модульного подхода создания паровой турбины и совершенствования ее конструкции при управлении ЖЦ связаны с компоновкой турбин из библиотечных модулей, наполнением и адаптацией параметрических элементов, что будет описано далее, и сопровождением ЖЦ оборудования с обеспечением «обратной связи» с каждого его этапа с целью формирования системной работы по циклу оптимизации модулей и конструкций оборудования (см. рисунок 7.3).

На рисунке 7.7 представлен алгоритм работы с модулем.

На содержание алгоритма работы с модулем, профиль модулей и конструкцию паровых турбин влияет следующий ключевой этап внедрения модульного принципа создания паровых турбин – выбор и принятие типа модульного конструирования.



Рисунок 7.7 – Алгоритм работы с модулем

Факторами выбора, как ранее уже обозначено, являются 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.

Также независимо от выбранного типа модульного проектирования отмечено важное положение об одновременности формирования профиля каждого семейства/серии/класса с использованием или без использования единой базовой платформы такой конструктивной группы, то есть формирование перечня библиотечных стандартных модулей/подмодулей и разработка таких составляющих, которые бы взаимозаменяемо заполняли облики паровых турбин такой группы. При этом следует обозначить, что следующим этапом эволюции внедрения на предприятии с соответствующей школой и историей турбиностроения модульной концепции должно быть, как это осуществлено на УТЗ, переосмысление разделения номенклатурного ряда на группы (семейства/серии/класса) с учетом новых подходов не только к

КТПП продукции предприятия, но и к сопровождению всего ЖЦ всей выпускаемой продукции предприятия с дальнейшим формированием профиля следующей и следующей такой группы и перевыпуском оборудования с учетом внедряемой концепции, оптимизации конструкции и технологии производства модулей и инструментов сопровождения ЖЦ.

Источник Р 50-54-103-88 [109] указывает на то, что «В зависимости от характера задач, решаемых при модульном конструировании, различают:

- модульное конструирование при создании новой техники при отсутствии базового изделия (прототипа, аналога);
- модульное конструирование при создании новой техники на основе базового изделия (прототипа, аналога)».

Такое различие практически полностью соответствует разнице подходов модульного проектирования паровых турбин:

- «базовая платформа»;
- модульный принцип (без базового изделия или платформы);
- индивидуальное проектирование.

Выводы сравнительного анализа таких подходов приведены в книге и представлены на рисунке 18.5. Показано, что каждый подход имеет свои преимущества и недостатки с возможностью достижения максимальных показателей паровых турбин, но при различных затратах на создание образца турбины, модельного ряда, номенклатурного ряда предприятия и на сопровождение ЖЦ такого оборудования, опять же различные для отдельного образца и средневзвешенно для конкретного ряда.

Основной вывод следующий: модульный принцип проектирования, а точнее, использование модульной концепции создания и совершенствования номенклатурного ряда паровых турбин, в которую заложен «принцип LEGO» и единая библиотека стандартных модулей/подмодулей, позволяет добиться **большой эффективности ЖЦ всего оборудования турбинного предприятия и более высоких средневзвешенных показателей оборудования**, чем использование подхода «базовой платформы», который использует компания Siemens, то есть преимущественно отдельных

библиотек для каждой из платформ, создаваемых для серии, семейства с большей оптимизацией составных частей для данного ограниченного модельного ряда. Такой вывод объясняется фактами, указывающими на создание оптимизированной «скорлупы» с ограниченными возможностями опционной замены частей и систем, что вполне доказывается ограниченностью затрат ресурсов на развитие опций и самой платформы, которые, как правило, развиваются дискретно по отдельному проекту, что является несколько схожим определением с индивидуальным проектированием за одним лишь исключением: проектируется «базовая платформа», то есть «серия», а не индивидуальный проект. Такая «серия» со своими функциональными ограничениями библиотеки «базовой платформы» предлагается и продается Заказчику, который вынужден адаптировать проект к турбине.

Такой вывод дополнительно обосновывается анализом критериев выбора базового изделия. В соответствии с Рекомендациями Р 50-54-103-88 [109] «Критерием выбора базового изделия по всей номенклатуре и значениям его главных и основных параметров является их максимальное соответствие установленным для изделий данного вида базовым показателям качества». Выбрать базовое изделие на всю номенклатуру предприятия невозможно, и это представляется возможным только на отдельный модельный ряд, однако разделение паровых турбин УТЗ или ЛМЗ на зоны показало общие признаки описания совершенно различных образцов/типоразмеров номенклатурного ряда паровых турбин одного предприятия, а это значит, что возможно использование одних и тех же модулей или даже группы смежных модулей в кардинально различных конструкциях паровых турбин различной мощности и типа.

Также в соответствии с [109] «Критерием по доминирующим признакам является количественная оценка установленных для изделий данного вида признаков общности (наличие металлоемких, дорогостоящих, быстро или малоизнашивающихся деталей и т.д.)», что указывает на практическую невозможность подобрать базовое изделие для всего номенклатурного ряда, и

тогда базовое изделие будет ограничиваться также модельным рядом, для каждого из которых потребуется разрабатывать свое базовое изделие, что также указывает на модульный принцип без базового изделия или платформы.

В соответствии с тем же [109] признаки общности при определении базового изделия устанавливаются в отраслевых стандартах или другой нормативно-технической документации, что также затрудняет использование базового изделия или платформы и усложняет нормализацию библиотечных стандартных элементов предприятия, увеличивая ряды и усложняя унификацию с возможностью достижения заданного уровня унификации (если не считать унификацию в пределах модельного ряда, то есть по конкретному классу, семейству или серии).

Исходя из представленных выше аргументов, на турбинном предприятии **в паротурбостроении целесообразно внедрять модульный принцип без базового изделия номенклатурного ряда и даже модельного ряда, то есть как ранее он был обозначен – «принцип LEGO».** Именно такой принцип начал внедряться на АО «УТЗ» и использоваться для разработки оборудования сначала с паровых турбин для ряда ПГУ, а в дальнейшем для ПСУ [23, 98-106]. При этом, несмотря на разделение номенклатурного ряда на классы внутри класса, как модельного ряда, не используется «базовая платформа» в качестве единой «скорлупы», которая наполняется проточной частью параметрической методикой для каждого типа турбины класса.

Разработка концепции модульного создания паротурбинного оборудования, которая должна лечь в основу комплекса внутренних временных регламентирующих документов предприятия по реализации проектов трансформации, реализации пилотных проектов и опытно-промышленной эксплуатации, в рамках которых разрабатываются и пересматриваются постоянные НТД турбинного предприятия, заключается в формулировании ее основных положений и описании их реализации.

Основные положения Концепции сформулированы ниже.

1. Независимо от выбранного подхода к модульному конструированию паротурбинного оборудования, одновременно рассматривать создание нового или расширение существующего номенклатурного ряда продукции турбинного предприятия, в рамках чего проводя комплексный анализ конструкции и ЖЦ оборудования ряда: функциональное и геометрическое описание с анализом доминирующих и второстепенных, общих и различающихся признаков, расчетно-аналитические и при необходимости экспериментальные работы по потенциалу совершенствования, нормализации и стандартизации конструкции оборудования и отдельных его составляющих.

2. Модельный ряд (класс, семейство или серия) внутри номенклатурного ряда создается одновременно с созданием профиля базового для него типа.

3. Основные принципы концепции модульного создания паротурбинного оборудования должны учитывать глубокую конструктивную и технологическую нормализацию, стандартизацию, конструктивную и технологическую преемственность.

4. Основные принципы концепции модульного создания паротурбинного оборудования должны учитывать автономность использования стандартных библиотечных модульных элементов в максимальном количестве типов оборудования.

5. Основные принципы концепции модульного создания паротурбинного оборудования должны учитывать возможность использования стандартных библиотечных модульных элементов без изменений на всех этапах ЖЦ оборудования.

6. Основные принципы концепции модульного создания паротурбинного оборудования должны учитывать автономность и гибкость совершенствования и оптимизации стандартных библиотечных модульных элементов всех уровней деления.

7. Обеспечить использование стандартных унифицированных соединений стандартных библиотечных модульных элементов всех уровней деления.

8. Обеспечить ведение параллельной работы всех участников сопровождения ЖЦ оборудования на этапах КПП, ТПП и при необходимости на других этапах ЖЦ оборудования на едином информационном поле.

9. Обеспечить возможность выстраивания различных производственных и кооперационных цепочек при подготовке производства и производстве паротурбинного оборудования.

10. При разработке модульных конструкций оборудования безусловно использовать принципы беспрепятственного малозатратного использования замены параметрических стандартных библиотечных элементов всех уровней деления.

11. Обеспечить нормализацию и стандартизацию ряда оборудования и модулей без ухудшения параметров и показателей качества, эксплуатационных показателей надежности с одновременной возможностью перекомпоновки стандартных библиотечных элементов с целью получения рационального варианта компоновочной схемы модульного изделия.

12. Обеспечить научно обоснованный выбор параметров геометрического и функционального описания и оптимизацию стандартных библиотечных элементов.

13. Обеспечить выбор рабочих диапазонов параметров геометрического и функционального описания в соответствии с запросами к конструктивным, технологическим, функциональным и технико-экономическим требованиям проектов.

14. Использовать конструктивный синтез, включающий конструктивный, технологический и функциональный синтез – возможность присоединения к одной других, не важно «новых» или «старых».

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

16. Конструкция стандартных библиотечных элементов должна обладать наибольшим числом геометрических и функциональных признаков без ущерба надежности, качеству и себестоимости.

17. При реализации концепции в обязательном порядке использовать цифровые принципы, подходы, методики, средства и инструменты управления ЖЦ оборудования: от КТПП до сервиса.

18. Концепция модульного создания паротурбинного оборудования предполагают несколько уровней разделения конструкции оборудования: зоны, модули, подмодули и элементы, разрабатываемые с использованием параметрических АРМов.

19. Концепция модульного создания паротурбинного оборудования допускает различные технические методики по построению конструкций оборудования:

- комплектование из стандартных библиотечных элементов разного уровня деления;
- комбинирование стандартных библиотечных элементов со специальными составными частями;
- последовательное наращивание и перекомпоновка стандартных библиотечных элементов разного уровня деления для модифицирования оборудования.

20. Концепция модульного создания паротурбинного оборудования удовлетворяют всем российским, отраслевым НТД и адаптированным регламентам турбинного предприятия.

21. В соответствии с концепцией модульного создания паротурбинного оборудования библиотека стандартных модульных элементов является обязательной для использования при разработке нового оборудования и выполнении глубокой модернизации существующего.

22. Компоновочная схема должна охватывать все стандартные библиотечные элементы разрабатываемого оборудования.

23. Компоновочная схема должна предусматривать возможность перекомпоновки стандартных библиотечных элементов в соответствии с требованиями технического задания проекта.

24. Компоновочная схема должна предусматривать возможность модернизации оборудования в соответствии с требованиями технического задания проекта.

25. Компоновочная схема должна предусматривать возможность проведения работ по оптимизации технико-экономических и эксплуатационных показателей.

26. Компоновочная схема должна предусматривать возможность проведения работ по рациональной унификации присоединительных размеров и главных параметров стандартных библиотечных элементов в соответствии с требованиями технического задания проекта.

27. При разделении оборудования на разные уровни деления и разработке стандартных библиотечных элементов первоочередно предлагается проверить ряд предпочтительных чисел по ГОСТу.

ГЛАВА 8. МОДУЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБОРУДОВАНИИ

В этой главе представлены подходы к сокращению номенклатурного ряда производимых на предприятии паровых турбин. Подходы основаны на выявлении общих признаков конструктивных частей различных турбин номенклатуры, на подборе основных габаритных и соединительных параметров модулей, позволяющих их менять в зависимости от схем и типов ПТУ. При этом подбор геометрических параметров и критериев модулей должен позволять их взаимозаменять, обеспечивать технологичность и добиваться их максимальной оптимизации для обеспечения высоких технико-экономических показателей и функциональных параметров оборудования при сохранении высоких показателей качества и надежности.

Достижение, в свою очередь, максимальной функциональности модулей позволяет обеспечивать формирование номенклатурного ряда минимальным количеством библиотечных модулей, то есть окончательно разработанных и «сданных» модулей, готовых к применению в конструкции турбины без единого изменения (!) конструкторской и технологической документации, включая модели и управляющие программы для обрабатывающих центров с ЧПУ. Любое минимальное изменение модуля по причине разунификации, адаптации, перестройки технологии при «старых» принципах КТПП без ассоциативных связей и единого информационного пространства приводит к значительным дополнительным трудовым (не менее 1000 н/ч), временным и, как следствие, финансовым затратам.

Укрупненно сокращение номенклатурного ряда паровых турбин предприятия обеспечивается решениями нескольких междисциплинарных расчетно-аналитических задач, которые позволяют:

- в одноцилиндровом исполнении добиться 120 МВт любого типа (К, КТ, Кп, Т, ТР, ТК, Тп, ПТ, ПР, Р) паровых турбин для работы в составе парогазовых и паросиловых установок с необходимым количеством подводов и отборов пара;

- в двухцилиндровом исполнении обеспечить до 250 МВт любого типа (в том числе теплофикационных с многоступенчатым подогревом сетевой

воды и разветвленной регенерацией, что не достигается зарубежными производителями) паровых турбин для работы в составе парогазовых и паросиловых установок с необходимым количеством подводов и отборов пара;

- в трехцилиндровом исполнении обеспечить до 400 МВт любого типа (в том числе любых теплофикационных, что не достигается зарубежными производителями) паровых турбин для работы в составе парогазовых и паросиловых установок с необходимым количеством подводов и отборов пара.

Описание и анализ важности формирования оптимального номенклатурного ряда несерийной или мелкосерийной продукции энергомашиностроительных предприятий, которой является практически все основное и вспомогательное оборудование ТЭС и АЭС, начнем с обозначения резюмирующих утверждений, раскрывающих цель поднятия вопроса, материалы по которому представлялись в прошлой главе и будут дополнительно проанализированы. Все это оборудование, безусловно, является наукоемким, причем не только на стадии разработки, но и на всех этапах его ЖЦ. Итак, обозначим следующие утверждения:

- правильное формирование профиля базовых образцов оборудования модельных рядов, складывающихся в номенклатурный ряд, предопределяет сокращение количества как базовых образцов, так и в целом типоразмеров оборудования, составляющего номенклатурный ряд энергомашиностроительного оборудования, что объясняется максимально эффективным использованием конструктивной преемственности оборудования предприятия;

- верно и обратное утверждение – достижение максимального уровня эффективности использования конструктивной преемственности оборудования энергомашиностроительного предприятия возможно только при правильном, оптимальном формировании номенклатурного ряда при выполнении требований заказчиков при прочих равных условиях проектов. То есть фактические и потенциальное закладывание в номенклатуру предприятия возможностей обеспечения выпускаемым оборудованием

необходимого назначения, функционала, параметров и эксплуатационных показателей с учетом производственно-технологического профиля предприятия;

- утверждение-следствие – обеспечение оптимального номенклатурного ряда оборудования и конструктивной преемственности деталей, узлов, составных частей позволяет добиться не только ограничения типоразмеров оборудования, но и сокращения конструктивно-нормализованных рядов составных частей, то есть объема библиотеки;

- ограничение объемов библиотеки составных частей можно добиться за счет системной нормализации и унификации конструкций оборудования и увеличить серийность их производства, что, в свою очередь, увеличивает их оборачиваемость в производстве и, как следствие, расширяет возможности их оптимизации при ограниченных трудовых, временных, финансовых ресурсах предприятия;

- максимальной конструктивной преемственности возможно добиться только при использовании модульной концепции проектирования оборудования.

Использование данных утверждений в качестве правил при формировании и модифицировании номенклатурных рядов оборудования и профилей базовых образцов оборудования позволит добиться оптимальности номенклатуры продукции предприятия, конструктивно-технологических профиля и облика оборудования, а значит, как следствие, достичь максимальной средневзвешенной эффективности ЖЦ выпускаемого энергомашиностроительным предприятием оборудования.

При определении или выборе того или иного показателя номенклатурного ряда оборудования и тем более конструктивно-нормализованных рядов составных частей необходимо исходить из увеличения их серийности, что и позволяет максимально влиять на конструктивно-технологическое совершенство конструкции оборудования и повышение эффективности ЖЦ такого оборудования от его разработки до сервисного обслуживания и утилизации.

Теперь что касается подходов, принципов и правил, которые позволяют ограничить номенклатурные ряды оборудования и увеличить серийность составных частей.

Необходимо отметить, что более полувека назад в отечественном и мировом анализе теории механизмов, машин и оборудования машиностроения выявлены возможности обобщения частных конструктивных решений, которые ранее казались совершенно различными со всех точек зрения, но могли функционально совпадать, а значит, могли объединяться не только по назначению, но и по конструктивному облику. Правильный системный анализ, использование его результатов, которыми являются верные выявления одинаковой функциональности составных частей оборудования, должен приводить (!) к единообразию конструкции таких составных частей.

Сначала в отечественной «Теории машин и механизмов», а затем и в конструировании машиностроения, в том числе энергомашиностроения, нужно до конца идти по пути преобразования существующих конструкций, которые ранее проходили весь путь разработки от выполнения расчетно-аналитических задач до конструирования и различных этапов испытания и опытной эксплуатации. И только потом идти на индивидуальное специальное конструирование, когда отсутствуют или исчерпаны все возможности модифицирования и совершенствования с расширением функциональности. При этом, как было неоднократно подчеркнуто в настоящей работе, важно и максимально эффективно формировать профиль номенклатурного ряда и конструктивные облики оборудования этого ряда одновременно или, точнее, единовременно (!). Но так как на предприятии с историей и школой это невозможно, да и на предприятии без значительной истории, но разрабатывающим, производящим и сопровождающим наукоемкое оборудование, которым является энергомашиностроительное оборудование, единовременно, а значит за короткий срок заложить все основы и функционал будущего номенклатурного ряда оборудования также невозможно, поэтому нужно прибегать к системному анализу и выявлению одинаковой функциональности составных частей нового и ранее разработанного (пусть даже сравнительно недавно) оборудования и модифицировать составные

части, обеспечивая по возможности без дальнейшего изменения расширение их функциональности с конструктивным единообразием конструкции таких составных частей для действующего и нового оборудования или с минимальным опционным изменением.

Разработка и научное обоснование необходимости внедрения методологии модифицирования деталей, сборочных единиц, которыми могут быть модули/подмодули и системы, должны быть обязательными действиями при развитии подходов конструирования машиностроительного, в том числе энергомашиностроительного, предприятия, то есть и при собственно создании и сопровождении ЖЦ оборудования такого предприятия.

Ключевой момент в методологии модифицирования конструкций деталей и стандартных библиотечных модулей заключается в том, что модифицирование необходимо осуществлять одновременно с нормализацией и стандартизацией соединений модулей и подмодулей, причем осуществлять такие задачи силами конструкторских подразделений под контролем подразделений по стандартизации, а не наоборот, так как такие комплексные задачи приобретают практическую значимость с научными подходами. Такой проект возможно осуществить в едином информационном поле, на котором есть возможность работать всем участникам проекта, а это значит, что есть необходимость обеспечения высокого уровня цифровой зрелости предприятия путем выполнения цифровой трансформации в рамках реализации современной концепции эффективного развития турбинного предприятия, представленной на рисунке 4.2. Значит, как показано ранее в рамках описания развития предприятия, методология должна учитывать одновременное внедрение модульной концепции разработки продукции с цифровой трансформацией предприятия, так как разрабатывать модульные конструкции оборудования и оптимизировать модули и входящие в них элементы, а главное полноценно использовать в новых разрабатываемых конструкциях оборудования и 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 номенклатурного ряда.

Современный научный подход к формированию номенклатурного ряда, по мнению авторов, может основываться на решении вопросов теоретических основ разработки конструктивно-нормализованных рядов с учетом использования современных цифровых средств и инструментов, которые позволяют пересмотреть или усовершенствовать принципы и подходы создания номенклатурного ряда и образцов оборудования в него входящего. Такие вопросы ранее были сформулированы в «Теории машин и механизмов», в том числе в источнике [126]:

1. «Научно-исследовательских и экспериментальных работ по изучению конструкций деталей и узлов с функциональной точки зрения с целью выбора тех из них, которые при минимальном числе конструктивных решений могут обеспечить осуществление максимального числа эксплуатационных задач;

2. Сравнительного нормализованного и технико-экономического анализа деталей и узлов машин для отбора из их числа таких, которые при прочих равных условиях могли бы быть изготовлены наиболее рациональными техническими методами при исключении неоправданного многообразия».

Важно отметить, что тогда, в 50-е, 60-е, 70-е годы, да и часто в настоящее время для повышения эффективности конструкции и ЖЦ оборудования приходят к усложнению и индивидуальным техническим решениям при создании деталей, сборочных единиц, систем и оборудования в целом, что является критической или в некоторых случаях даже фатальной ошибкой разработчиков. Анализ же причин, в том числе неоднократно проводимых авторами, показал и подтвердил гипотезу, связанную с недостаточным качеством знаний функционала уже имеющегося и потенциального разрабатываемого оборудования. Исследование, опыт эксплуатации, обычное изучение процессов всегда приводили к необоснованности усложнения конструкции и, как следствие, индивидуальности разработки, многообразию образцов номенклатурного ряда, что указывает на возможность оптимизации и ряда, и составных частей, то есть модулей и подмодулей.

В практике машиностроения, в том числе энергомашиностроения, есть случаи кардинального изменения конструкций составляющих частей, оборудования, номенклатурных рядов, специализаций заводов, что связано с выполнением трансформаций по результатам научно-исследовательских работ, позволивших выполнить конструктивную нормализацию независимо от функционального назначения выпускаемых предприятиями конструкций.

Если обратиться к стратегической идеологии создания паровых турбин, блок-схема которой представлена на рисунке 3.1, то закладывать конструктивную нормализацию необходимо на всех стадиях, начиная с «Утверждения рядов типоразмеров ПГУ/ПСУ», то есть уже с формирования типов профилей энергоблоков или даже целых ТЭС, что позволит на следующей стадии качественно сформировать профили отдельных энергоблоков, построенных на конкретных профилях основного и вспомогательного тепломеханического оборудования энергоблоков, в том числе паротурбинного, из которого сформируется далее нормализованный ряд ПТУ. На стадии «Формирование модулей паровых турбин» следует разделить на:

- общемашиностроительную нормализацию;
- собственно, конструктивную нормализацию.

Общемашиностроительная нормализация – конструкторская нормализация, которая охватывает ДСЕ (детали и сборочные единицы), используемые в конструкции оборудования независимо от его назначения и особенностей конструкции. ДСЕ таких нормализованных рядов выполняют функцию соединения составных частей (модулей), вспомогательного характера для монтажа, пуско-наладки или эксплуатационного этапа ЖЦ оборудования. «Перезакладывание» запасов в таких конструкциях, как правило, не критично, и есть возможность унифицировать такие ДСЕ для оборудования разного назначения, рабочих процессов и режимов, а также различных массогабаритных показателей.

В современных условиях общемашиностроительная нормализация в паротурбостроении касается создания библиотек нормативно-справочной информации (НСИ), в которые добавляются специальные соединительные

изделия, материалы, приспособления и оснастка по отраслевым или внутризаводским СТО.

Конструктивная нормализация – нормализация, которая охватывает ДСЕ, являющиеся специфическими, индивидуальными для конструкции оборудования и определяющими его назначение и особенности конструкции, которые как раз могут быть модулями/подмодулями, формирующими библиотеку таких стандартных специализированных составных частей оборудования.

Конструктивную нормализацию осуществляют по двум направлениям в соответствии со специальными или адаптированными под конкретное оборудование методиками.

Первое направление «выборочное», или «сравнительное», построенное на выборе или сравнении ДСЕ для подбора их под конкретное назначение с конкретным функционалом. Результатом использования методики должен быть подбор и замена составной части или частей ДСЕ на другую, как правило, оптимизированную, в том числе с пересмотром разделения на модули/подмодули и изменением их соединений, например, как самих геометрических размеров фланца, так и крепежа.

Второе направление «расчетное», или «конструкторское», построенное на замене ранее используемых неоптимальных ДСЕ с ограниченным функционалом на новые оптимизированные по конструкции и обладающие новым расширенным относительно старых функционалом.

При этом в редких направлениях машиностроения разработка, внедрение и использование методик поставлено на научно-исследовательский уровень, что жизненно важно в современном конкурентном рыночном мире, так как, отмечалось ранее, без использования подробных и качественных знаний по всем этапам ЖЦ оборудования невозможно сформировать оптимальный номенклатурный ряд предприятия и профили базового оборудования такого ряда.

Конструктивная преемственность в таких методиках играет ключевую роль, но должна обеспечивать все возможности технологической преемственности, особенно по самым трудоемким технологическим

операциям, которые составляют значительную долю производственной загрузки предприятия.

В своей практике авторы исследовали практику и подходы формирования модельных рядов, то есть законченных частей номенклатурных рядов паротурбинного оборудования разных мировых производителей: General Electric, с которым прорабатывались вопросы локализации оборудования в РФ; Siemens AG и Alstom, с которыми прорабатывались совместные проекты модернизации паротурбинного оборудования и локализации Alstom; АТ «Турбоатом», на оборудовании которого удалось проходить обучение и выполнять научно-исследовательские работы; АО «Силовые машины» (СКБ «Турбина», Ленинградский металлический завод), ООО «НордЭнергоГрупп» (ПАО «КТЗ»), АО «НЗЛ» и АО «УТЗ», на оборудовании которых выполнялись научно-исследовательские, конструкторские, технологические и проектные работы в ходе обучения, работы с таким оборудованием и его разработки на данных турбинных предприятиях.

Ранее отмечены результаты анализа, указывающие на то, что, несмотря на безусловную многофакторность вопроса формирования конструктивного подхода и облика турбин, номенклатурного ряда продукции компании, основными факторами, влияющими на конструкцию паровых турбин, являются не размеры бюджетов на НИОКР, объемы производства продукции или масштабы присутствия на различных географических рынках, а традиции школы с учетом уровня консерватизма и специализации предприятия на разработке и производстве оборудовании того или иного назначения. При этом особое влияние на традиции конструкторских школ турбостроения, с учетом наукоемкости и междисциплинарности разработок, используемых в продуктах, оказывает доступность и уровень результатов смежных направлений научных технологических исследований: металловедение и металлургия, механическая, электрохимическая и электрофизическая обработка и т.д. Также обозначено, что факторами, влияющими на конструктивные особенности являются: компоновочные и схемные решения, функциональные особенности, возможности эксплуатации и, в том числе

режимы работы, стесненность размещения, сопряжение с основным и вспомогательным оборудованием объекта использования (!). Все эти факторы относятся к различным этапам ЖЦ оборудования и определяют функциональность оборудования, а также влияют на формирование номенклатурного ряда оборудования предприятия, облик которого формируется так или иначе в зависимости от периодов и одновременности разработки тех или иных проектов, базовых платформ, серий или отдельных модельных рядов. Эти факторы также определяют необходимость или обязательную потребность и возможность внедрения и развития новых современных подходов, средств и инструментов КТПП, формирование конструкции оборудования, возможность его сборки из составных наработанных унифицируемых частей, что, соответственно, связано с формированием или модифицированием номенклатурного ряда оборудования предприятия. Аналогичные утверждения верны и для другого основного и части вспомогательного энергетического оборудования, производимого энергомашиностроительными предприятиями.

Переходя к подтверждению важности и актуальности создания номенклатурных рядов паровых турбин, резюмируем отечественный опыт паротурбостроения, который был описан в первой главе и проанализирована его практика с целью оценки положительного эффективного опыта и отрицательного, чтобы учесть при обосновании, разработке и внедрении методик, подходов и принципов создания паровых турбин и турбинного оборудования, позволяющих достигать доли унификации до 60% во всем номенклатурном ряде и 90% внутри группы ряда, которыми являются семейство или серия турбин.

1) В 40-е и 50-е годы XX века отечественное производство паровых и газовых турбин обобщает различные индивидуальные конструкции и технологию производства независимо от разного типа и назначения оборудования, что связано с внедрением теоретических основ деталей и машин и использованием конструкторской нормализации, развитием материаловедения и автоматизации производства.

2) В 60-е годы в отечественном паротурбостроении наблюдается создание первых мелкосерийных образцов паровых турбин отдельными семействами на НЗЛ, ХТГЗ (ХТЗ), ЛМЗ, КТЗ, УТМЗ (УТЗ, ТМЗ), БМЗ. На НЗЛ на базе турбин типа АК-6 и АК-4 был сформирован конструктивно-нормализованный ряд паровых турбин на параметры пара – 35 кгс/см², 435 °С и мощностью 4 и 6 МВт. Тем самым появились номенклатурные ряды паровых турбин типа АП-6, АТ-6, АКв-6 и АК-4, АП-4, АТ-4, АР-4 с высокой долей унификации узлов и деталей, что позволило применять высокопроизводительные технологии и методы, используемые при крупносерийном производстве.

3) В 60-е годы на ЛМЗ создан конструктивно-нормализованный ряд паровых турбин мощностью от 25 до 100 МВт на параметры пара – 90 кгс/см², 480...535 °С: ВК-25, ВТ-25, ВПТ-25, ВК-50 и ВК-100, что было реализовано с унификацией облопачивания, выхлопных патрубков, парораспределения, подшипников, уплотнений и крепежа. При этом добились первых успехов в технологической нормализации, начиная от унификации заготовок до унификации трудоемкой оснастки и приспособлений.

4) Начиная с 50 – 60-х годов анализировались конструкции паровых турбин разных типов К, Т, ПТ и разных мощностей совместно со смежным оборудованием, производимом на тех же предприятиях или в одной и той же отрасли. Анализ выполнялся на стадии проектирования на предмет общих признаков, то есть устанавливалась конструктивная и технологическая преемственность, использование которой позволяло размежевать заводские производственно-технологические цепочки и разделять производство конкретной номенклатуры в отдельных цехах и тем самым формировать в этих цехах или участках производство с применением крупносерийного изготовления деталей и узлов, унифицируемых по своей в сути мелкосерийном производстве турбинного оборудования. Большинство номенклатурных рядов оборудования построены по смешанному принципу: назначение и характеристики (параметры и показатели).

Такая аналитическая задача имела прикладной характер, и результаты ее позволили в 60-е и 70-е годы выстраивать номенклатурные ряды паровых

турбин после разделения отечественных турбинных заводов по преимущественной специализации: теплофикационные турбины, конденсационные средней и большой мощности, приводные малой мощности, транспортные наземные и подводные, паровые турбины для АЭС. В этот период ТМЗ (УТЗ) стал специализироваться на выпуске теплофикационных паровых турбин мощностного ряда от 6 до 100 МВт разных типов, производя несколько групп как единые серии с общими конструктивными решениями и в связи с этим широкой унификацией: 6-25 МВт; 40-100 МВт [21, 22, 28].

Глубоко проанализированы расчетно-аналитические и конструкторские работы, выполненные сотрудниками ТМЗ (УТЗ). В рамках проектов паровых турбин производства УТЗ группы 40-100 МВт типа Р-40-130/31, Т-50-130, Т-50/60-130, Т-60-130-6, ПТ-50/60-130/7, Т-100/120-130, Т-100/120-130-2, Т-110/120-130-3, Т-110/120-130-4 разработки модельных рядов выполнялись одновременно с применением унификации и оптимизации унифицированных узлов. Конструкторские и технологические подходы предприятия внутри ограниченных семейств позволили ограничить выпускаемую номенклатуру паровых турбин и значительно повысить уровень унификации, а значит, выполнить задачи повышения серийности и добиться загрузки отдельных единиц производственного оборудования выполнением однотипных операций, а участки цехов – производством однотипных изделий.

В этот период также стало возможно централизованно сформулировать задачи для каждого отечественного турбинного завода и определить номенклатурные ряды паровых турбин: конденсационные под разные технические задания для ЛМЗ и ХТГЗ с закреплением за ними теплофикационных турбин только комплементарных конденсационным внутри семейства, например, турбины типа Т-180/210-130 ЛМЗ в семействе турбин К-200-130 ЛМЗ; теплофикационные за ТМЗ.

5) В 70-е годы в отечественном паротурбостроении, несмотря на рост единичной мощности агрегатов и расширение номенклатурного ряда турбинных заводов, а также увеличение количества семейств, вновь проектируемые турбины: на ЛМЗ типа К-800-240, на ХТГЗ – типа К-500-240, а ТМЗ турбин типа Р-100-130/15, а затем типов Т-250/300-240,

ПТ-135/165-130/15 выпускались с учетом развития унификации, конструктивной и технологической преемственности.

б) В 80-е годы в отечественном паротурбостроении наступил «кризис разунификации»: номенклатурные ряды паровых турбин предприятий расширяются за счет новых образцов турбин и модификаций ранее выпускаемых турбин, например, на ТМЗ появились турбины типа ПТ-140/165-130/15-2 (3), Т-175/210-130 и Тп-185/220-130, и несмотря на сохранение общих принципов создания паровых турбин средневзвешенный уровень унификации ряда значительно снизился. То есть имеющиеся принципы не позволяли расширять номенклатурные ряды основного и вспомогательного оборудования не только с повышением уровня унификации и серийности производства, но и даже с сохранением. Тем самым можно охарактеризовать попадание вопроса развития номенклатурного ряда УТЗ в «тупик». При этом, учитывая сходность принципов и подходов отечественных турбиностроительных конструкторских школ, в аналогичные «тупик» ЛМЗ и ХТГЗ попало еще раньше, так как достигло аналогичных размеров рядов ранее.

Выйти из «тупика» и продолжить эффективно развивать номенклатурный ряд оборудования с повышением эффективности ЖЦ оборудования возможно закладыванием 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 предприятия. Одновременно необходимо повышать технико-экономические и функциональные показатели оборудования с выполнением расчетно-аналитических и оптимизационных задач по разделению его на составные части, их компоновке, модификации и совершенствованию соединений с разработкой и внедрением новых принципов и подходов к созданию модульных конструкций с использованием современных инструментов и методологий цифрового макета изделия и цифровой концепции обеспечения ЖЦИ.

По опыту реализации проекта создания на УТЗ модельных рядов паровых турбин для ПГУ, турбин «мятого» пара, а также модифицирование модельных рядов паровых турбин для ПСУ получен важный опыт и практика важности одновременного формирования профиля каждого семейства/серии/класса или, как это сделано в одноцилиндровых турбинах Класса А.3 с использованием единой базовой платформы такой конструктивной группы. Важно отметить, что понятие «класс» УТЗ ввел в 2018 году, обеспечив перераспределение номенклатурного ряда паровых турбин компании, который включал старые референты, зарекомендовавшие себя долгими годами надежной эксплуатации на объектах энергетики и совершенно новые образцы турбин разной мощности и назначения. Тем самым в один и тот же класс «попали» турбины из разных семейств, разных типов и назначений. Так в Класс А.3 вошли турбины типа Т-63/76-8,8, КТ-63-7,7; К-60-12,8; К-65-12,8; К-85-8,0; Т-40/50-8,8 [88-96], что стало возможным в связи с запуском явно выраженных модульных подходов, основанных на базовых принципах конструктивной и технологической нормализации и преемственности. При этом каждый класс четко и однозначно описывается профилем конструкции с обозначенными возможностями, принципиальными схемами с опциональными возможностями и техническими показателями с конкретными значениями или ограниченными диапазонами. Выше описан Класс А.3, объединяющий одноцилиндровые турбины с петлевой схемой движения пара, с внутренним цилиндром и межкорпусным пространством.

Также необходимо отметить наглядный пример реорганизации семейства турбин типа Т-50/60-8,8 производства УТЗ в Класса А.2 с дальнейшим его модифицированием из немодульных конструкций турбин, разработанных предприятием в 2006 году, когда рабочая группа [104] только задумывалась о модульном проектировании, и наполнении такого класса новыми образцами.

Класс А.2 согласно источнику [96] описывается так: «одноцилиндровые турбины с прямоточной схемой пара на давление от 4,9 до 8,8 МПа (50-90 кгс/см²), лопатка последней ступени может быть применена длиной от

430 до 660 мм, мощность от 40 до 80 МВт. Регулирование дроссельное с выносным блоком клапанов или несколькими блоками, также может быть сопловое парораспределение с организацией установки регулирующих клапанов на цилиндре.

Турбина предполагается с радиальным выхлопом на один водяной конденсатор, также возможен вариант с осевым выхлопом на воздушную конденсационную установку (как это реализовано в Классе А.3 на практическом референтном примере с турбиной Кп-77-6,8, разработанной для мусороперерабатывающего завода).

Корпус цилиндра выполняется комбинированным, паровпускная часть выполняется литой, средняя часть – сварно-кованой, выхлопная часть выполняется сварной. В передней части цилиндр опирается на выносной блок переднего подшипника, в задней части цилиндр опирается на поперечную заднюю раму и боковые рамы в районе выхлопной части. В турбине предусмотрена возможность организации одноступенчатого регулируемого теплофикационного отбора мощностью от 50 до 140 Гкал/ч, производственного отбора мощностью от 50 до 150 т/ч».

В таблице 8.1 представлены основные параметры и показатели паровых турбин Класса А.2 производства УТЗ.

На рисунке 8.1 представлен продольный разрез паровой одноцилиндровой турбины типа Т-60/65-8,8 производства УТЗ.

Турбина типа Т-60/65-8,8 является явным примером качественного оптимального разделения на модули с возможностью комбинирования модулей в разные турбины с конструктивной и технологической преемственностью, то есть с формированием библиотеки стандартных модулей/подмодулей и разработка таких составляющих, которые бы взаимозаменяемо заполняли облики паровых турбин класса, что возможно с использованием общемашиностроительной и конструктивной нормализацией. При этом следует обозначить, что использование таких средств позволяет обеспечивать автономную оптимизацию конструкции и технологии производства модулей и использование современных инструментов сопровождения ЖЦ оборудования.

Таблица 8.1 – Основные параметры и показатели Класса А.2
производства УТЗ

Наименование показателя	Значение
Основной тип турбины	Теплофикационная/конденсационная
Основной конструктивный признак	Одноцилиндровая с прямоточной схемой движения пара
Тип парораспределения	Дроссельный/сопловой
Диапазон электрической мощности, МВт	40-80
Диапазон параметров свежего пара:	
- давление, МПа	4,9-8,8
- температура, °С	400-555
Возможность организации теплофикационного отбора пара:	
- схема	Регулируемый отбор; Одноступенчатый/двухступенчатый подогрев сетевой воды
- максимальная тепловая нагрузка, Гкал/ч	50-140
- расход пара в отбор, т/ч	100-280
Возможность организации производственного отбора пара:	
- расход, т/ч	50-150 т/ч
- схема	Нерегулируемый/регулируемый отбор
- обеспечиваемое давление, МПа	0,8-2,0
Характеристики основного применяемого в турбоустановке конденсатора:	
- расход охлаждающей воды, м ³ /ч	5000-8000
- площадь поверхности теплообмена, м ²	1700-3100
Реализованные проекты турбин класса	ПТ-30/40-8,8/1,3, Т-50/60-8,8, Т-60/65-8,8, К-63-8,8

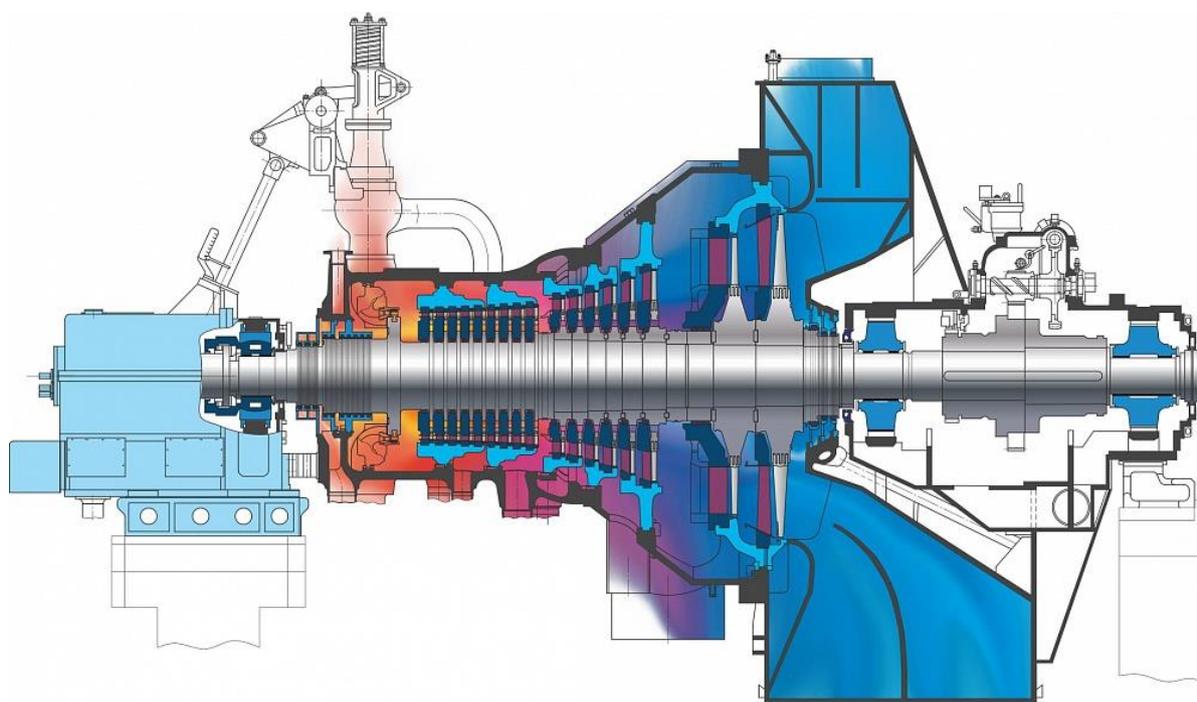


Рисунок 8.1 – Продольный разрез паровой турбины типа Т-60/65-8,8
производства УТЗ

ГЛАВА 9. МОДУЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПРИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В соответствии с [11]: «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 и разрабатывают и реализуют также программы цифровизации [127, 128]: в Германии – проект «Индустрия-4.0», в Японии – концепции «Connected Factories», в США – проекты по направлению «интернет вещей», роста сырьевого сектора в будущем не ожидается, в России

была утверждена программа «Цифровая экономика» [12].

Цифровая трансформация является фактором конкуренции: государства и предприятия, которые смогут опередить других на этом пути и воспользоваться возможностями цифровизации в полной мере, становятся лидерами [129].

Источник [129] ссылается на рейтинг [130] 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 9.1.

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 [129]. 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» [131]: «Выдвижение НПТ (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,

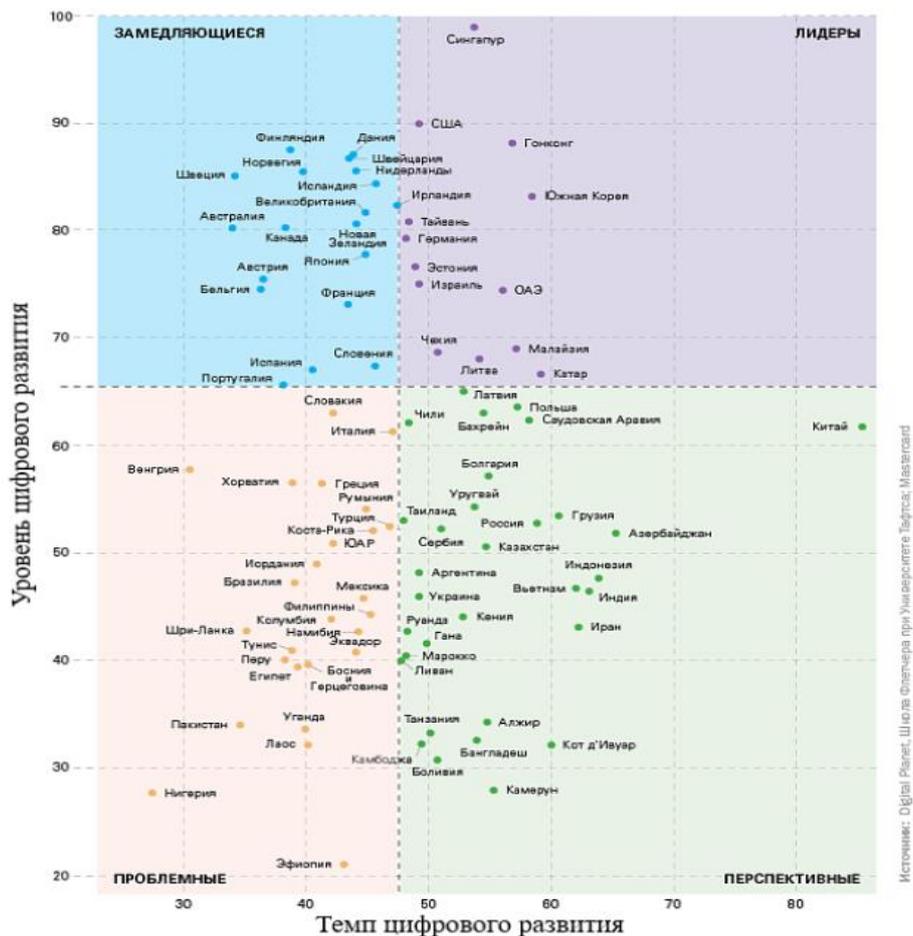


Рисунок 9.1 – Цифровое развитие стран

содержание и перспективы развития новых технологий. Тем не менее, до настоящего времени не выработано общепринятого определения НПТ. Наиболее 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 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 [132], однако считаю, что наиболее четкая, точно подчеркивающая основную мысль и подходящая к турбиностроительному предприятию является формулировка Caglayan Arkan [133]: «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 таких 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. Конечно, 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 9.1.

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 в АО «УТЗ», ПАО «Силовые машины», АО «НЗЛ» (входит в АО «РЭПХ») и проектами по разработке новых образов конкурентного паротурбинного оборудования в АО «УТЗ» и использовались как бенчмаркинг, от результатов которого отталкивались при принятии как концептуальных стратегических решений, так и тактических конструкторских решений.

Очередной раз следует указать на важность развития предприятия с одновременным внедрением модульной концепции разработки продукции и цифровой трансформацией предприятия. Разрабатывать модульные конструкции оборудования и оптимизировать модули и входящие в них элементы, а главное полноценно использовать в новых разрабатываемых конструкциях оборудования и 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.

Таблица 9.1 – 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	НЗЛ
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

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 [20]. 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 внегласно 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 [134-141] шкала оценки уровня цифровой зрелости энергомашиностроительного предприятия сведена в таблицу 9.2.

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 [135], который после проведенного глубоко 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 %.

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

Таблица 9.2 – 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.

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.

С точки зрения анализа идеологических основ и систематизация 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-моделей 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 [12]:

- 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 собственно производства в РСФСР и России паровых турбин, которые авторы представили на рисунке 4.1, 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 4.2.

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);

- СРМ-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);

- САРЕ-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 обеспечить 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 9.2 представлены примеры основных связей, которыми управляет PLM-система: в рамках проекта цифровой трансформации настраиваются все связи в едином информационном поле.

С учетом большого объема данных и необходимости настроить связи между различной информацией, часто ассоциативные, следует обеспечить структурирование данных в соответствии с методиками и подходами,

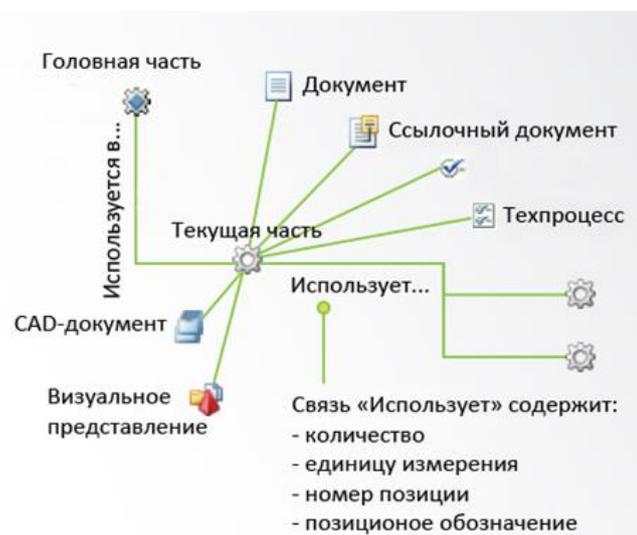


Рисунок 9.2 – Примеры основных типов связей в PLM-системе

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 9.3 представлена предлагаемая укрупненная структура контекстов архива, реализованного на УТЗ.

В каждом контексте организовывается своя структура папок и связей данных.

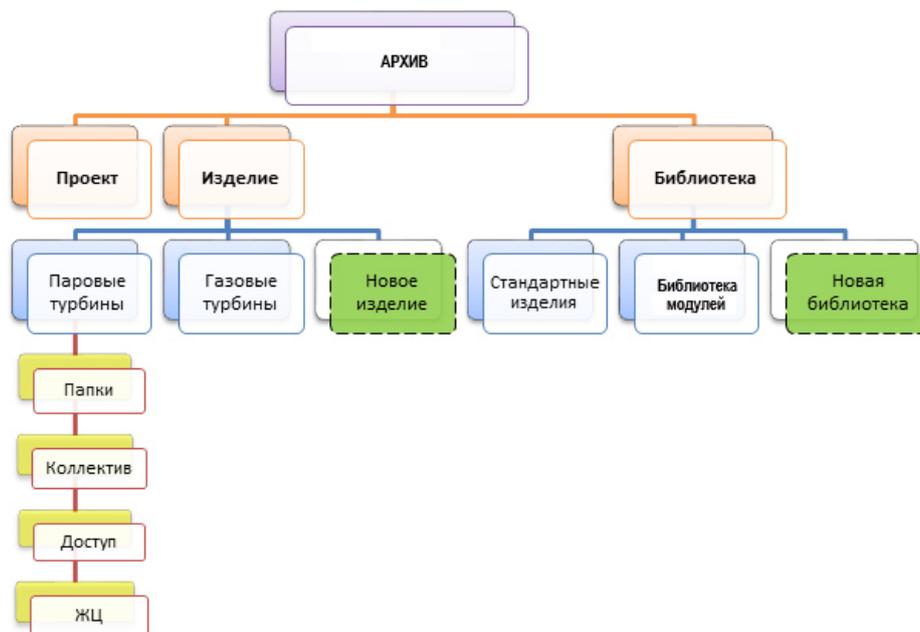


Рисунок 9.3 – Укрупненная структура контекстов в архиве PLM/PDM-системы

На рисунке 9.4 представлена структура для типового проекта. Доступ к отдельной информации настроен и ограничен.

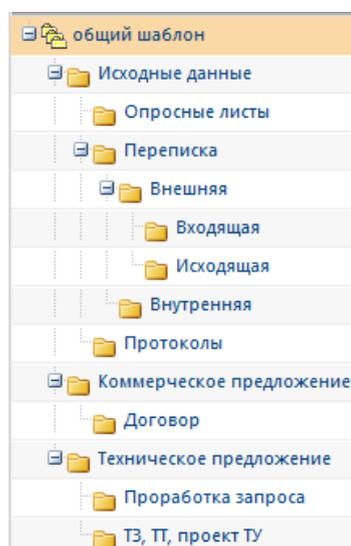


Рисунок 9.4 – Верхнеуровневая структура папок типового проекта

На рисунке 9.5 представлена структура библиотеки «Стандартные изделия». Доступ к отдельной информации настроен и ограничен с учетом условий по ограничению НСИ.

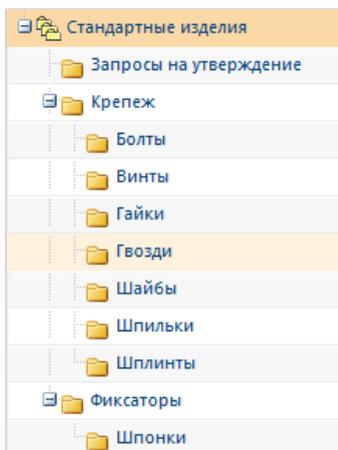


Рисунок 9.5 – Верхнеуровневая структура папок библиотеки «Стандартные изделия»

На рисунке 9.6 представлена структура библиотеки по изделию «Паровые турбины».

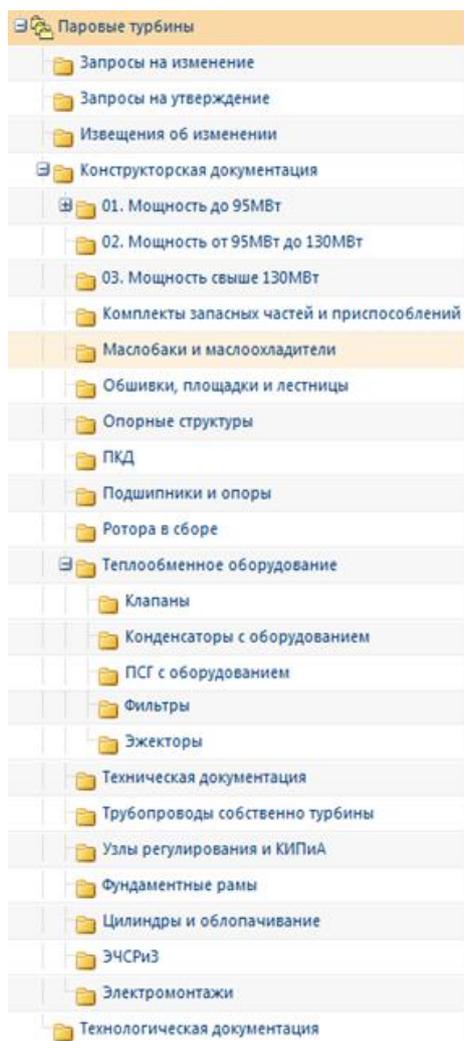


Рисунок 9.6 – Верхнеуровневая структура папок библиотеки «Паровые турбины»

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

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

1. Задать ключевое слово Сохранить этот поиск

Ключевое слово:

Тип: Добавить

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 ▾

Номер

Создал

3. Определить, где искать

4. Определить, дополнительные критерии, например, создателя объектов

Найти: Со всеми этими критериями ▾

5. Задать строгость поиска

Сохранить этот поиск

Рисунок 9.7 – 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 9.8 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-ХII с оборудованием	0.1	0.1	0.1
2	 БТ-268710	Конденсатор К-6000-ХII	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	Х
2	 БТ-248200-01	Фильтр сетчатый ФС-80-40-1	Х	Х	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 9.8 – 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, неостребованной, 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 «Силовые 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 9.9 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 выполнить 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, в следующих пропорциях 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 9.10 представлено сравнение «старого» традиционного и «нового» подходов к управлению ЖЦИ на стадии производства.

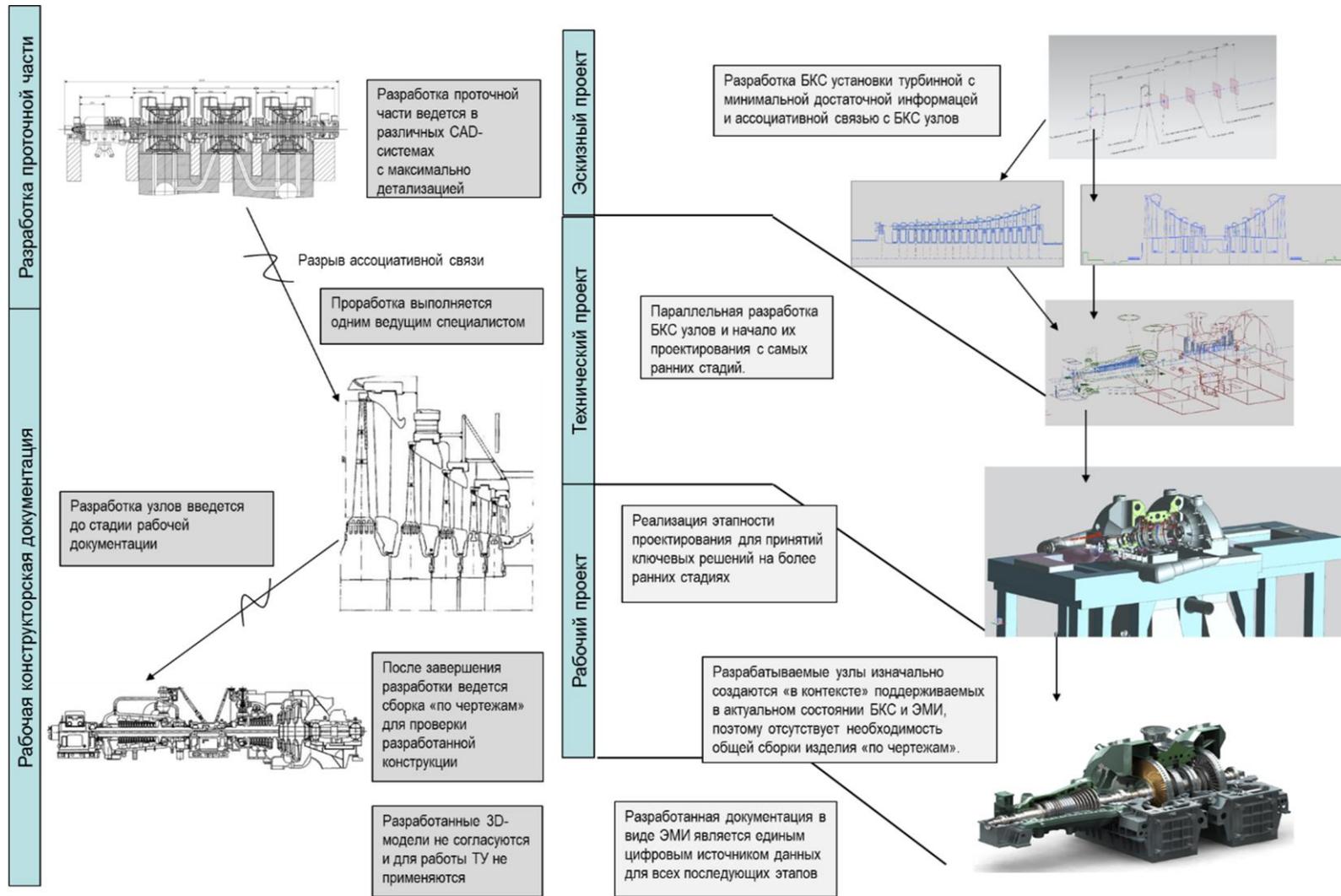


Рисунок 9.9 – Сравнение «старого» традиционного и «нового» подходов к проектированию турбины

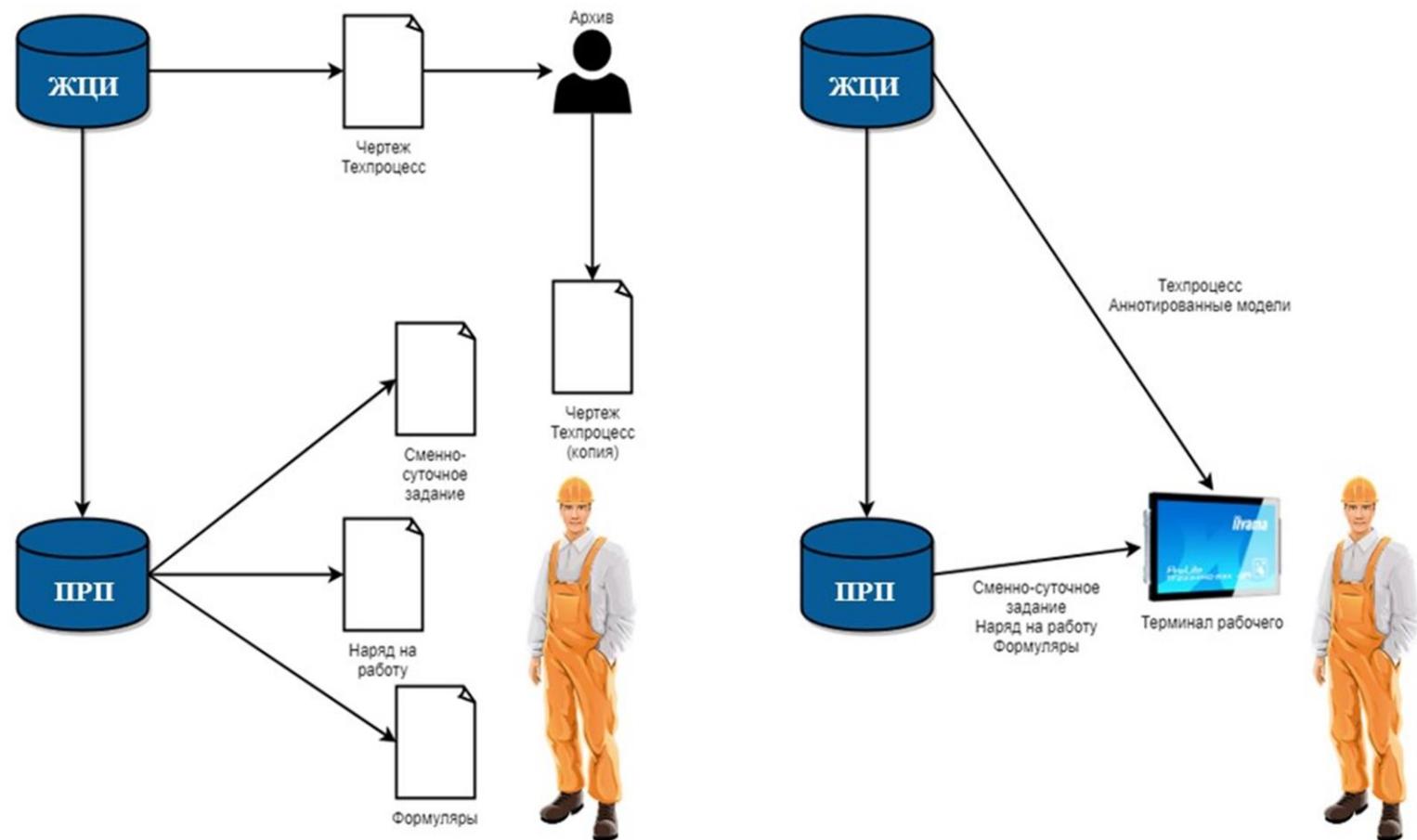


Рисунок 9.10 – Сравнение «старого» традиционного и «нового» подходов к управлению жизненным циклом изделия на стадии производства: ПРП – планирование ресурсов предприятия

ГЛАВА 10. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящем параграфе 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 собственно 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 [142] 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 10.1.

Согласно ГОСТ Р [143] 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 10.1 – 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 10.2 [144].



Рисунок 10.2 – 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 10.3 представлено разделение ЖЦ на группы.

Как показано в работе, что 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



Рисунок 10.3 – Разделение жизненного цикла изделия на группы приложения решений

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.

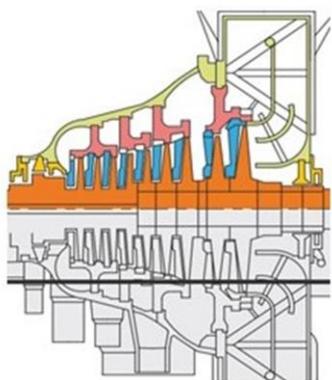
На рисунке 10.4 представлена эволюция конструкции ЦСД базовой турбины типа Т-185/220-12,8.

На эволюцию конструкции ЦСД, представленную на рисунке 10.4, влияло в разное время несколько факторов. На рисунке 10.4, 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.

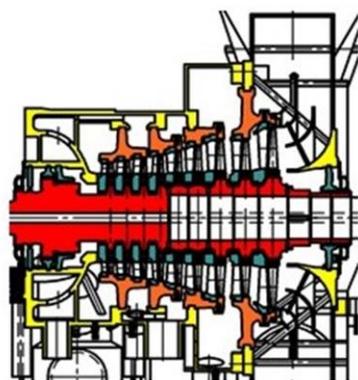
При осуществлении КТПП использовались общепринятые в машиностроительной практике подходы к унификации и не использовались модульные принципы. При этом детали и сборочные единицы ЦВД и ЦНД широко применялись с других турбин номенклатурного ряда УТЗ: Р-100/105-130/15, Р-102/107-130/15-2, ПТ-135/165-130/15,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

На рисунке 10.4, 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.

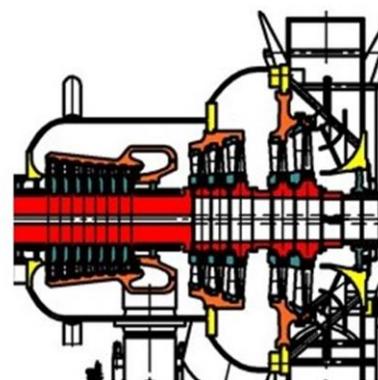
Паровая турбина типа К-110-1,6 представляет собой двухцилиндровый агрегат [87, 145, 146], проточные части которого разработаны на базе проточных частей ЦСД и ЦНД турбины Т-185/220-130-4.



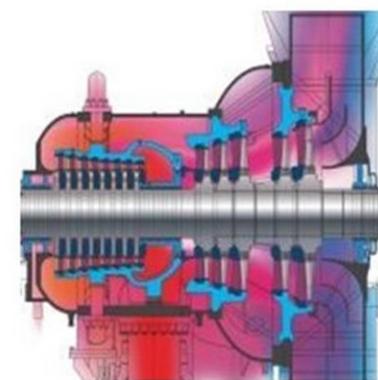
а)



б)



в)



г)

Рисунок 10.4 – 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 в 2022 году 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 10.4, в представлен ЦСД турбины типа Т-113/145-12,4 [57, 58, 60, 87]. 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 10.4, 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, собственно 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 10.1.

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

Таблица 10.1 – 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 таблице 6.3.

«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 собственно 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 10.4. 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 [31, 32] 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 [33] в еще большую конструктивную и технологическую преемственность ДСЕ, практически подводящую конструкцию турбины к модульной.

На рисунке 10.5 представлена 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.

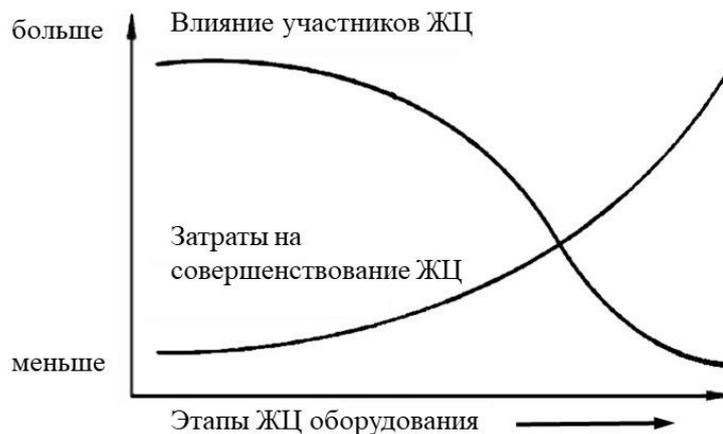


Рисунок 10.5 – Зависимость влияния участников ЖЦ оборудования на повышение его эффективности сопровождения ЖЦ и затраты на такое совершенствование от начальных до конечных этапов ЖЦ

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, собственно 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 максимум 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 10.6.

Итак, в главе представлены технические решения, внедренные автором, под его руководством или с участием, относящиеся к каждой из обозначенных групп. Причем автор хотел бы поделиться своими наблюдениями, которые раскрывают 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 10.6. 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 10.6 – Диаграмма технико-экономического эффекта от внедрения модульной концепции создания турбинного оборудования: деление на группы

ГЛАВА 11. ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для обеспечения условий по созданию библиотеки стандартных модулей разработана укрупненная конструкторско-технологическая (иерархическая) структура паровой турбины, позволяющая добиться единого системного подхода к разработке и производству оборудования на турбинном предприятии. Укрупненная конструкторско-технологическая структура паровой турбины представлена на рисунке 11.1.

Для достижения максимального эффекта от использования модульной концепции в паротурбинной тематике разработаны методологические критерии заполнения такой структуры с разделением конструкции оборудования по модулям.

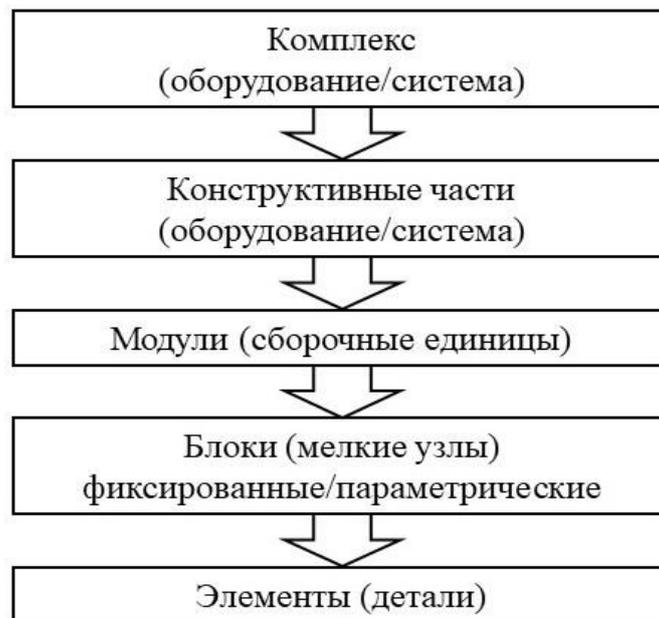


Рисунок 11.1 – Укрупненная конструкторско-технологическая структура паровой турбины

Разработанные и описанные в предыдущем параграфе основные и дополнительные принципы, 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 паровых 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 [147].

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 11.2.

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 11.3.

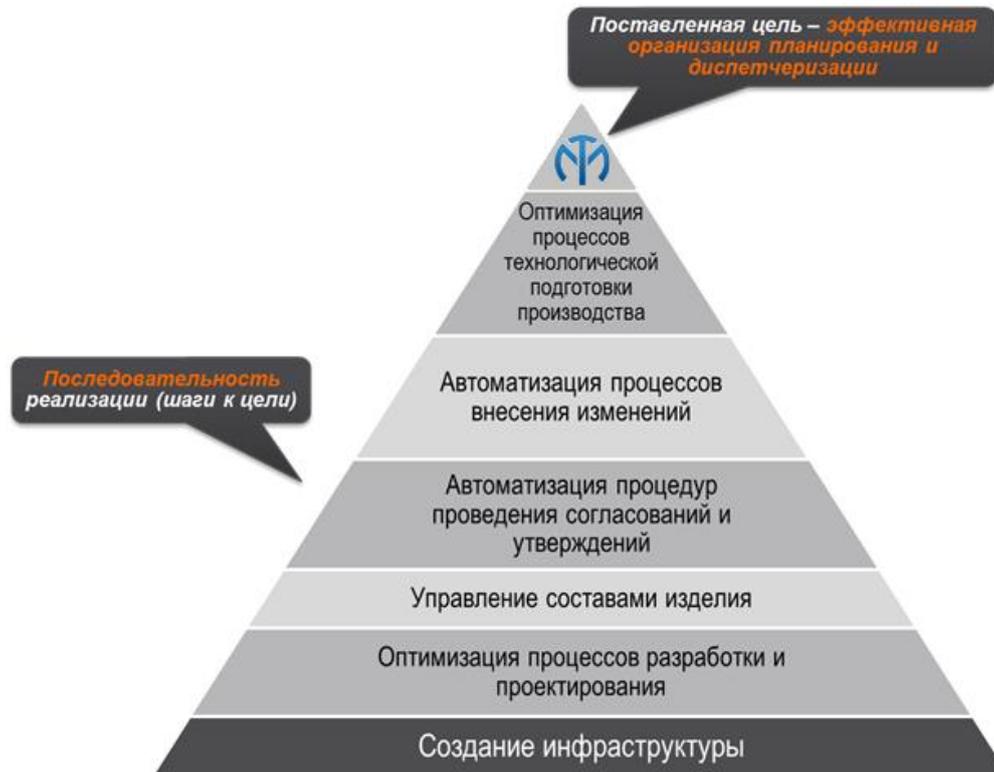


Рисунок 11.2 – Цели и задачи проекта «Внедрение системы управления инженерными данными», реализованного на УТЗ

⚙️	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 11.3 – 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 11.4;

- 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 11.5;

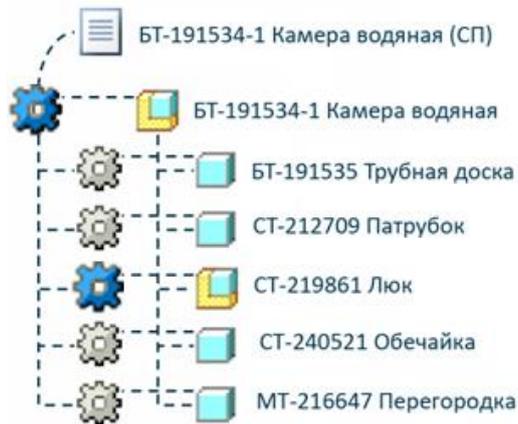


Рисунок 11.4 – Пример конструкторской структуры «Камеры водяной» со связанными САД-документами

- 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 11.6.

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:

- перечень составов, разрабатываемых в ходе создания изделия

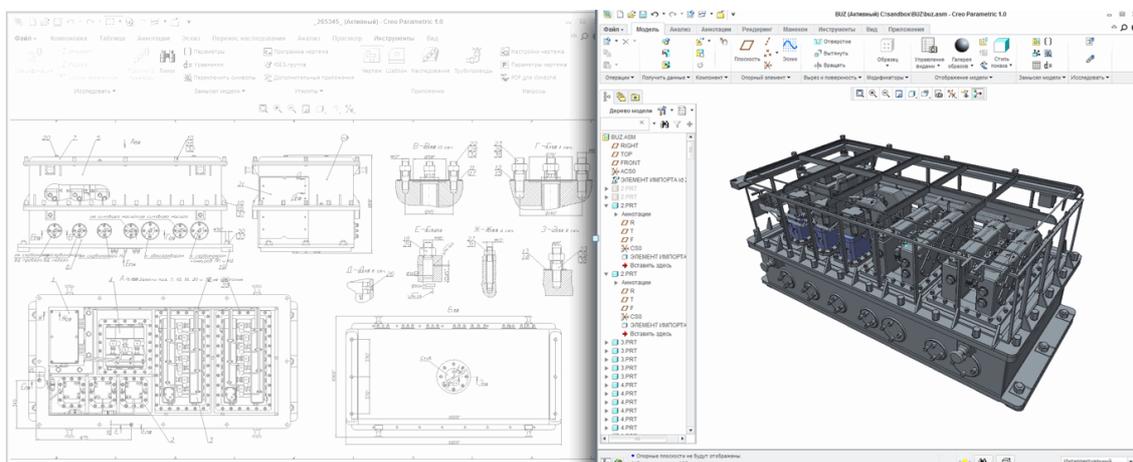


Рисунок 11.5 – Примеры ассоциативного чертежа и 3Д-модели «Блока управления и защиты»

(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.

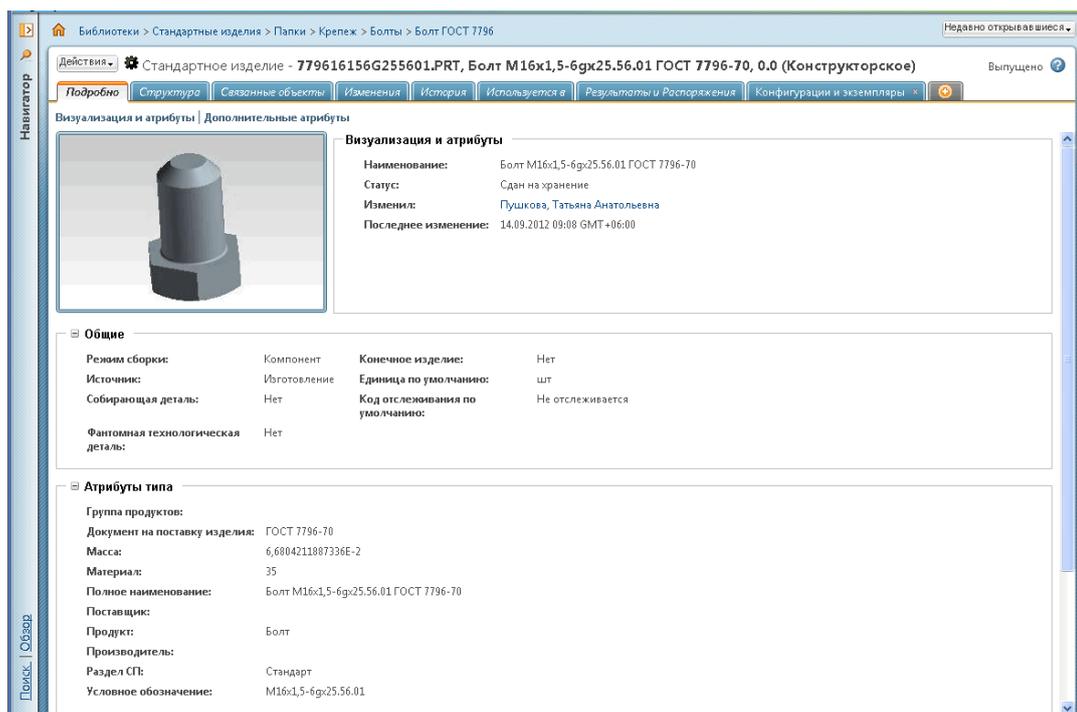


Рисунок 11.6 – Пример стандартного библиотечного элемента, выгруженного в PLM-систему

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 также 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 11.7 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 КТПП и собственно производства, необходимо разработать и внедрить:

- правила иерархии структур изделий;
- выполнение конструкторами при КПП требований технологов к 3Д-моделям;

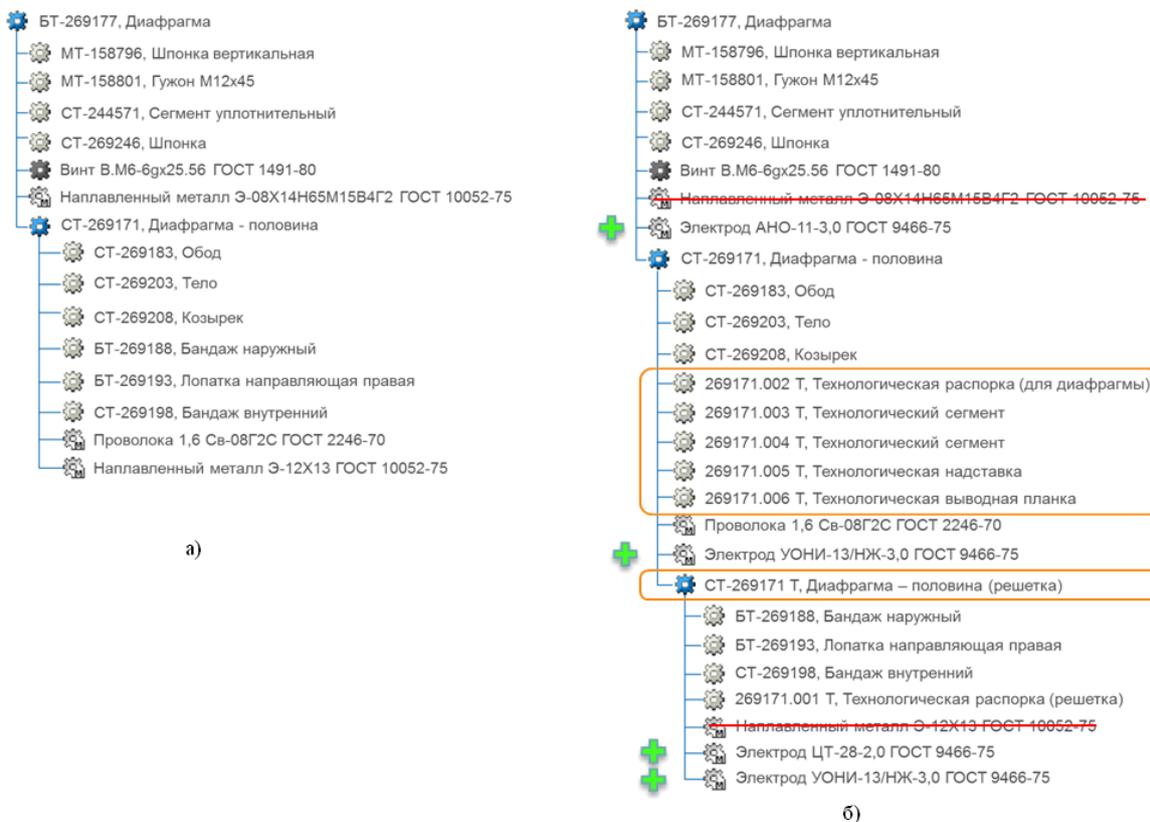


Рисунок 11.7 – Различие структур изделий в конструкторском и технологическом представлении на примере диафрагмы 17-й ступени турбины типа Т-63/76-8,8: а) конструкторское представление; б) технологическое представление

- 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 [19, 20, 25, 26] 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 автором на основании известных шкал и представленной в таблице 9.2.

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, проведенного 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 котором 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 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 11.8 представлена оценка уровня методологической зрелости НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам КПП.



Рисунок 11.8 – Оценка уровня методологической зрелости НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам КПП

На рисунке 11.9 представлена оценка уровня инструментов НЗЛ/РЭПХ, используемых для решения ключевых задач КПП.



Рисунок 11.9 – Оценка уровня инструментов, используемых на НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам КПП

На рисунке 11.10 представлена оценка уровня процессов КПП на НЗЛ/РЭПХ.

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: 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



Рисунок 11.10 – Оценка уровня процессов КПП на НЗЛ/РЭПХ

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, 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), которой является сборка 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 11.11 представлен показательный пример БС паровой турбины типа К-100-8,8 ЛМЗ, выполняемой пилотно по проекту цифровой трансформации.

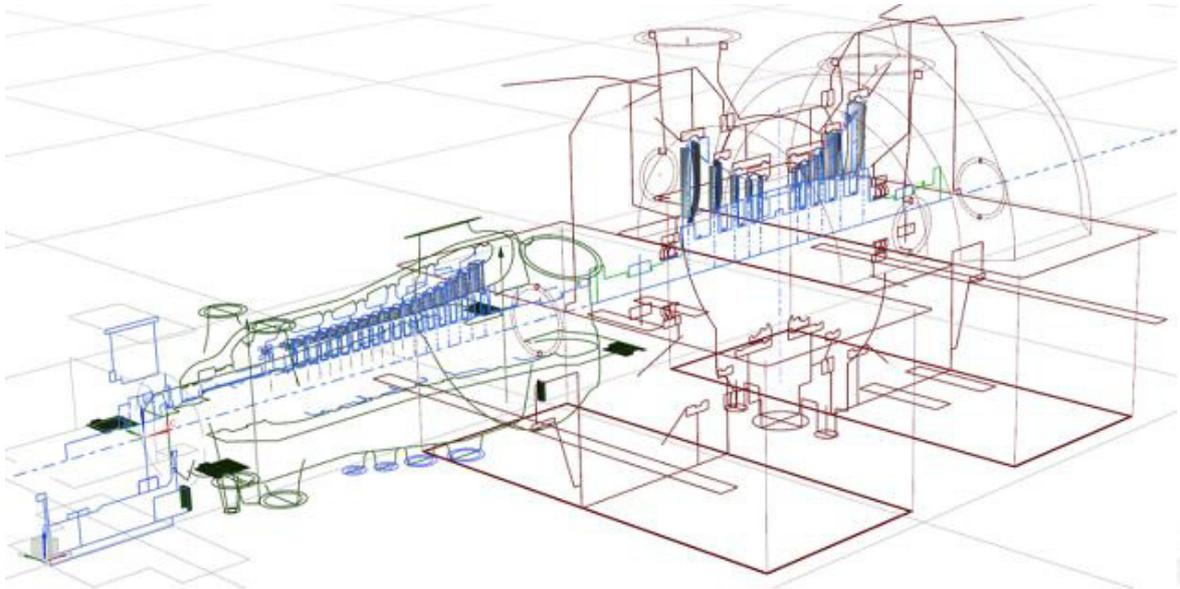


Рисунок 11.11 – Базовая структура паровой турбины типа К-100-8,8 ЛМЗ

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 отработки 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.

Для решения задач повышения технико-экономических показателей, показателей надежности, качества и оптимизации параметров отдельных стандартных библиотечных модулей и модульного паротурбинного оборудования в целом надо эффективно использовать описанные выше цифровые типовые и специализированные средства и инструменты, при этом, безусловно, необходимо их адаптировать и настроить под конкретные задачи и целевые результаты.

Инструменты параметрического моделирования. При разработке паровых турбин, тем более с учетом внедрения конструкторской базовой структуры и ассоциативными связями с 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 автора необходимо отметить следующие источники [19, 20, 25, 26, 148, 149].

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 автора в рамках проекта создания паровой турбины типа Т-295/335-23,5 при совершенствовании проточной части [21, 65, 93].

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 11.1 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.

Таблица 11.1 – 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		+	+

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.

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 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.

ГЛАВА 12. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

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

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 12.1 представлена оценка уровня методологической зрелости НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам ТПП.



Рисунок 12.1 – Оценка уровня методологической зрелости НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам ТПП

На рисунке 12.2 представлена оценка уровня инструментов НЗЛ/РЭПХ, используемых для решения ключевых задач ТПП.

На рисунке 12.3 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;



Рисунок 12.2 – Оценка уровня инструментов, используемых на НЗЛ/РЭПХ по ключевым задачам ТПП



Рисунок 12.3 – Оценка уровня процессов ТПП на НЗЛ/РЭПХ

- 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 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 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, 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.

На рисунке 12.4 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.

Важно отметить, что необходимо выстроить систему выявления замечаний к конструкции оборудования при осуществлении проверки и анализа конструкции конструкторской документации на технологичность, результаты которой фиксируются, анализируются, разрабатываются корректирующие мероприятия, которые разбираются на предмет

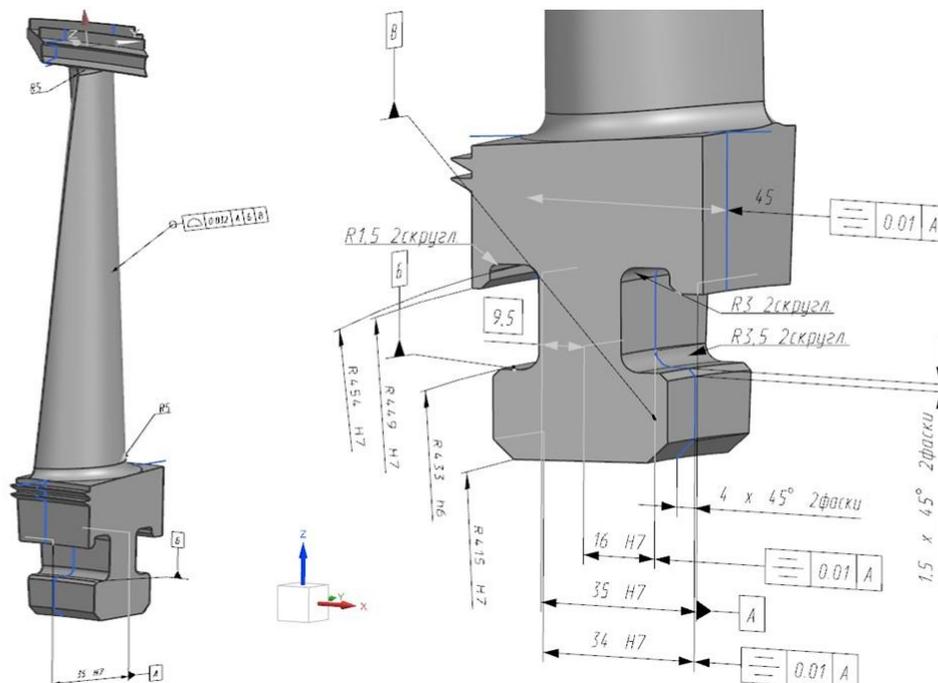


Рисунок 12.4 – Аннотированная 3Д-модель рабочей лопатки паровой турбины ЛМЗ

предотвращения повторения допущенных ошибок или нетехнологичных конструкторских решений.

На рисунке 12.5 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 составов изделий на примере общих представлений с обозначением сравнений, взаимосвязи и задач каждого представления, а также на примере турбинных изделий.

Расцеховка (маршрут изготовления) на ДСЕ назначается в PLM-системе. PLM-система обеспечивает возможность назначения нескольких вариантов маршрута изготовления ДСЕ. Для распараллеливания работ технологов в

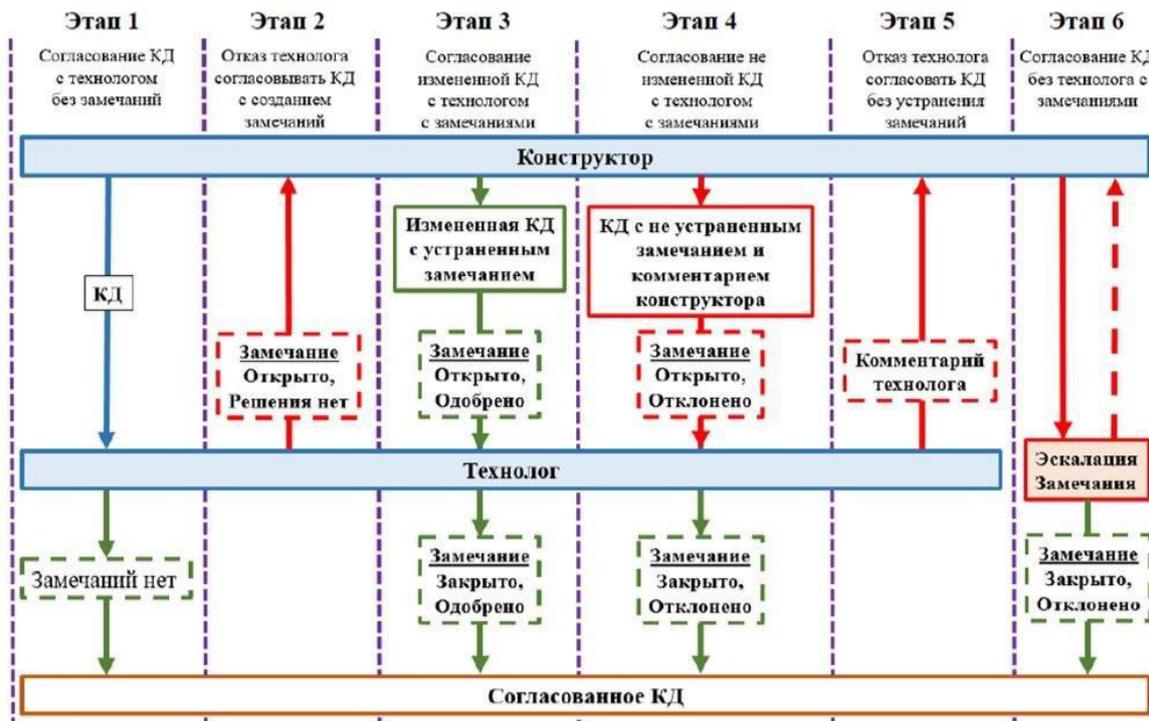


Рисунок 12.5 – Маршруты системы согласования конструкторской документации на технологичность

рамках одной «сквозного» технологического процесса используются рабочие процессы PLM-системы для распределения видов работ.

На рисунке 12.6 представлена схема автоматического процесса распределения заданий на разработку технологических процессов в зависимости от вида работ и цеха-исполнителя.

Проработка заготовки осуществляется на основании габаритов конструкторской детали и назначенных материалов из конструкторской спецификации.

Расчет нормы расхода материала заготовок выполняется в PLM-системе. PLM-система позволяет рассчитать норму расхода материала по различным методикам, которые можно в нее заложить. При выборе материала заготовки 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.

Расчет плановой трудоемкости изготовления изделий выполняется в



Рисунок 12.6 – Схема автоматического процесса распределения заданий на разработку в зависимости от вида работ и цеха-исполнителя

В PLM-системе создается шаблон рабочего процесса расчета плановой трудоемкости, в котором предусмотрена возможность создания замечаний и прохождения их по рабочему процессу и организовать настройку 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 увязываются 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 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.);

- технологические состояния этапов сборки визуализируются 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 осуществление ассоциативных связей между конструкторской документацией, моделями промежуточных состояний и геометрической моделью заготовки, а также устанавливание 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 12.7 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



Рисунок 12.7 – 3Д-модели промежуточных состояний производства рабочей лопатки паровой турбины: настроены ассоциативные связи между основной моделью и вспомогательными моделями оснастки и приспособлений

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 их внедрить удастся при обеспечении конструкторской преемственности и нормализации, 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.

На рисунке 12.8 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



Рисунок 12.8 – Блок-схема ТПП энергомашиностроительного оборудования при создании модульных конструкций

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.

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.

Формирование 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 технологическому реализуется за счет рабочих процессов PLM-системы.

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

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 сокращения перечня, производимого самостоятельно и приобретаемого инструмента.

Такое развитие позволяет повысить качество выпускаемой продукции в связи с тем, что [98]:

- 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 [98]:

- 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 безобойменной конструкцией ЦВД позволяет эффективно изготовить степени 2-7 «венцовой» конструкции, а 8-9 – сварной.

Авторы считают важным отметить несколько ключевых тезисов, касающихся решений технологически-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;

- достигать 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.

ГЛАВА 13. ВОПРОСЫ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПТУ С МОДУЛЬНОЙ КОНЦЕПЦИЕЙ: ТИПИЗАЦИЯ ПОДХОДОВ, СЕРВИСНЫЙ СКЛАД, ДЛИТЕЛЬНОСТЬ

Решение задач по сервисному обслуживанию и ремонту основного и вспомогательного паротурбинного оборудования является неотъемлемым важным направлением развития ЖЦ турбинного оборудования.

Ключевым политическим решением, которое, по мнению авторов, позволяет перейти на новый технический и экономический уровни сервисного обслуживания, является переход от форм сервисного обслуживания по регламенту или по состоянию оборудования, выполняемого по стандартам предприятий, разработанным на основании НТД, устанавливающим технические нормы и требования к ремонтам паровых турбин, направленным на обеспечение промышленной безопасности ТЭС, экологической безопасности, повышение надежности эксплуатации и качества ремонта и регламентируемые технические требования, объем и методы дефектации, способы ремонта, методы контроля и испытаний к составным частям и турбине в целом в процессе ремонта и после ремонта, к долгосрочному сервисному обслуживанию (ДСО) как новой форме взаимовыгодного сотрудничества исполнителя и заказчика ДСО.

ДСО позволит спланировать сопровождение эксплуатации и сервиса на весь период ЖЦ оборудования, охватить весь контур энергоблока, то есть синхронизировать и спланировать все инспекции и ремонты, при этом сформировать сервис-склад, присутствие инженера-резидента, техническую поддержку в формате 24/7 с дополнительными опциями по обеспечению системы удаленного мониторинга и многое другое. Заказчик получает гарантии на работы и запчасти, понимание сроков исполнения работ при минимальной стоимости на общий их комплекс, а подрядчик контролирует состояние оборудования, необходимые запасы запчастей и конкурентные цены. Концепцию такой формы ДСО турбинного оборудования авторы разработали по итогам анализа и попытки устранения существующих проблем сервиса действующего газотурбинного и паротурбинного оборудования.

Все особенности формирования номенклатуры паротурбинного оборудования предприятия, процессы и результаты разработки, собственно производства и сервиса такого оборудования, безусловно, связаны между собой.

Унификация и внедрение модульной концепции позволяет разработать типовые базовые и сопровождающие сервис оборудования документы: регламенты, положения, план-графики, инструкции и т.д. Учитывая, что все такие документы описывают и работают с типовыми процессами, что позволяет ограничить ресурсы на их описание и, значит, получить возможность их отрабатывать и совершенствовать с дальнейшим масштабным использованием цифровых современных интерактивных инструментов, что, в свою очередь, позволяет:

- повысить качество работ и, как следствие, надежность оборудования в течение ЖЦ;

- обеспечить заблаговременную оперативную подготовку материалов для выполнения сервисного обслуживания;

- обеспечить формирование и поддержание сервисного склада в соответствии с эксплуатационными показателями ПТУ и статистическими показателями оборачиваемости запасных частей, используемых при обслуживании в соответствии с графиком и частотой возникающих внеплановых ситуаций;

- повысить уровень доступности материалов и знаний для обучения эксплуатационного и сервисного персонала с потенциалом повышения его квалификации;

- сформировать единое информационное пространство для всех участников ЖЦ оборудования от конструктора до сервисного персонала, что позволяет организовать прямую и обратную связь между ними, то есть сформировать предпосылки к оперативному реагированию на запрос к модернизации оборудования;

- сократить продолжительность выполнения инспекций и ремонтов.

Все вышеописанное, в том числе позволяющее совершенствовать бизнес-процессы ЖЦ ПТУ приводит к целевому повышению

соответствующих показателей эффективности, характеризующих этапы сервисного обслуживания ПТУ.

На стыке этапов эксплуатации и сервиса в ЖЦ ПТУ разработан и используется на УТЗ для паровых турбин коэффициент технического использования $t_{\text{сум}}$: $K_{\text{т.и}} = t_{\text{сум}} / (t_{\text{сум}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{обсл}})$, где $t_{\text{рем}}$ – суммарное время всех ремонтов; $t_{\text{обсл}}$ – суммарное время обслуживания. Поскольку время обслуживания, кроме времени ремонтов, у паровых турбин очень мало, можно считать $t_{\text{обсл}} = 0$, тогда $K_{\text{т.и}} = t_{\text{сум}} / (t_{\text{сум}} + t_{\text{рем}})$.

В первом приближении коэффициент технического использования позволяет судить о степени совершенства машины: коэффициент тем больше, чем меньше времени машине требуется на ремонт. Однако реально время ремонта существенно зависит от его организации: во сколько смен ведутся работы, количество и квалификация ремонтного персонала, наличие требуемых запасных частей, оснащенность инструментами и приспособлениями и пр.

Турбины производства УТЗ на параметры пара на критические и сверхкритические параметры, по которым предприятие ведет статистику эксплуатационных показателей, имеют коэффициент технического использования $t_{\text{сум}}$ выше нормативного, причем независимо от периодов между разными видами ремонтов турбин.

Авторы считают важным обозначить значительную практическую значимость от внедрения модульной концепции в котлостроении, что позволяет получить особенно высокий эффект на этапах модернизации и обслуживания оборудования энергоблока в целом.

Дополнительный эффект от внедрения модульной конструкции в котельном агрегате достигается за счет того, что котельное оборудование в отличие от турбинного имеет большее количество конструктивных групп с разными назначенными ресурсами, которые можно оптимально заменять или модернизировать отдельно с временными сдвигами от высокотемпературных поверхностей нагрева до низкотемпературных элементов. Это позволяет «зациклить» сервисное обслуживание, например, общим циклом

длительностью 15 лет, добиться сокращения интервалов и трудоемкости инспекций и технического обслуживания за счет, в том числе в турбинной тематике, возможной свободной замены одного модуля без необходимости демонтажа других взаимозаменяемых и ремонтпригодных модулей, а также с использованием типовых решений, по возможности быстросъемных, по теплоакустической изоляции. Такой предлагаемый подход, названный автором «заиклненным сервисом», всегда получал поддержку со стороны заказчиков, генерирующих компаний.

В случае использования модульной конструкции котла, что позволяет обеспечивать сокращение длительности инспекций и частичной замены, синхронизации его обслуживания и ремонта с графиками сервиса другого основного оборудования рассматриваемого энергоблока, то принимаемые подходы к сопровождению и управлению ЖЦ энергоблока позволят получить синергетический эффект в вопросах сокращения временных, трудовых и финансовых затрат на этапах эксплуатации и сервиса, при этом увеличить срок службы основного оборудования и отдалить этап его утилизации.

Обозначая масштабность задачи внедрения модульных подходов на всем основном оборудовании ТЭС, авторы не могут не сказать о выявленной ими «геометрической прогрессии» роста эффекта от одновременного внедрения модульной концепции на всем основном оборудовании энергоблока тепловой электрической станции. Такой эффект укрупненно достигается за счет трех основных факторов:

- значительное сокращение продолжительности и затрат планового технического обслуживания энергоблока в связи с тем, что сокращается длительность «критического» пути в связи со снижением трудоемкости самого объемного ремонта или обслуживания;

- значительное снижение длительности и затрат внепланового ремонта в связи с сокращением длительности и снижением сложности его выполнения, а также сокращением финансовых и временных затрат на срочный заказ, обеспечением и восполнением необходимых компонентов оборудования. Данный фактор дополнительно усиливает эффект в случае, если при внеплановом ремонте одного оборудования, например, турбинного, удастся

выполнить техническое обслуживание другого оборудования, например, котельного, что в дальнейшем позволит исключить внеплановые остановки или сократить длительность следующего планового обслуживания. Причем необходимо отметить, что повышается мобильность обеспечения запасными частями в случае использования модульной конструкции наукоемкого оборудования в связи с тем, что оригинальные производители могут заблаговременно разделить библиотеку модулей на две части: первую, обладающие «ноу-хау», изготовление которых преимущественно остается у оригинальных производителей, и оно ими оптимизируется и обеспечивается достаточными страховыми запасами на сервис-складах, и вторую, не обладающие «ноу-хау», размещаемую по внешней кооперации на различных производствах партнеров, которые, как правило, не специализируются на данном оборудовании, но имеют производственные мощности, комплементарные изготовлению данных модулей, поэтому по рамочному соглашению или гарантийной заявке позволяют оперативно произвести компоненты модуля;

- увеличение возможностей и гибкость инструментов синхронизации графиков технического обслуживания основного оборудования, например, газовой турбины, паровой турбины, генераторов, котлов-утилизаторов парогазовой установки.

ГЛАВА 14. МОНТАЖ И ПУСКОНАЛАДКА МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Весь комплекс вопросов сборки оборудования, монтажа и пусконаладки на объекте, безусловно, упрощается при развитии сопровождения ЖЦ, внедрении модульной конструкции и оптимизации конструкции и функциональности стандартных библиотечных модулей с учетом культуры постоянного стремления повышать показатели конструктивности, технологичности и других, а главное – концепция позволяет разрабатывать, использовать и совершенствовать типовые инструкции по монтажу и пусконаладке. Однако авторы выявили, что существует важное направление качественного развития эксплуатации турбинного оборудования, которое нешироко изучено, внедряется и используется в паротурбинном оборудовании (в основном все работы направлены на мониторинг, прогностику и диагностику с целью повышения надежности эксплуатации), поэтому именно в этой области имеет значительный потенциал совершенствования и получения большого абсолютного экономического эффекта – расчетное и экспериментальное определение максимальных технико-экономических показателей основного и вспомогательного оборудования при возможной совместной и автономной работе на переменных режимах с разработкой алгоритмов работы с автоматическим или полуавтоматическим поддержанием показателей на установленном оптимальном уровне. Приведу несколько таких примеров, реализованных авторами в документации и в работе оборудования.

Необходимо отметить, что решение задач автоматической режимной оптимизации работы оборудования может решаться на различных уровнях и с различной долей автономности:

- узла, например, контроль и ведение работы подшипника;
- системы, например, контроль и ведение работы системы маслоснабжения смазки, системы парораспределения или тепловых расширений турбины;
- оборудования, например, работы конденсатора;
- комплекса, например, конденсаторной группы, бойлерной или регенеративной группы;

- турбоустановки, когда она рассматривается как система с возможностью работы на оптимальных режимах, в том числе влиянием на параметры и режимы работы смежного оборудования, например, параметры работы котельного, генераторного или других комплексов оборудования.

Разработка таких решений выполняется на этапе КПП, внедрение – на этапе монтажа и пусконаладки, уточнение по итогам опытно-промышленной эксплуатации, то есть «обратной связи».

Первый пример касается реализации повышения экономичности работы паровой турбины и ПТУ в целом на режимах с давлением пара в конденсаторе ниже предельной величины. Такое решение запатентовано [140] и внедрено в оборудовании УТЗ.

Схемно-компоновочные решения ПТУ и уровень развития инструмента и средств их разработки определяют:

1) Эффективность этапов ЖЦ паротурбинного оборудования: проектирование ПТУ, строительно-монтажные, пусконаладочные работы, эксплуатация, сервис и утилизация;

2) Техничко-экономические показатели или эффективность ЖЦ энергетического объекта в целом (!). Поэтому авторы посчитали важным отметить далее некоторые особенности ЖЦ смежного оборудования энергетических объектов и показать важность синхронизации развития их ЖЦ с ЖЦ оборудования ПТУ в связи с их взаимовлиянием на всех этапах ЖЦ энергетического объекта, на котором они являются неотъемлемой частью.

Положительным моментом в реализации вопроса разработки схемно-компоновочных решений в России является тот факт, что при использовании отечественного паротурбинного оборудования в соответствии со сложившейся практикой разработкой занимается один исполнитель – отечественный турбинный завод, который комплексно с учетом опыта и наработок занимается разработкой компоновки всей ячейки ПТУ, разрабатывая взаимное расположение входящего в ПТУ и непосредственно с ней связанного оборудования и размещение этого оборудования относительно строительных конструкций машинного зала генерирующего объекта. Дополнительно в объем разрабатываемой отечественным турбинным заводом

проектно-конструкторской документации традиционно входят: задания на разработку чертежей фундамента турбоагрегата, полов машинного зала, площадок обслуживания; монтажные чертежи трубопроводов; перечни электрифицированного оборудования и арматуры и т.д. Поэтому ответственность за надежность и экономичность принципиальных компоновочно-строительных решений по ПТУ в целом несет турбинный завод, что принципиально является положительным моментом для вопросов оптимальности, качества, надежности и эффективности ЖЦ паровой турбины, ПТУ и энергетического объекта.

На рисунке 14.1 показана компоновка ячейки ПТУ с турбиной типа К-65-12,8 [104] производства УТЗ.

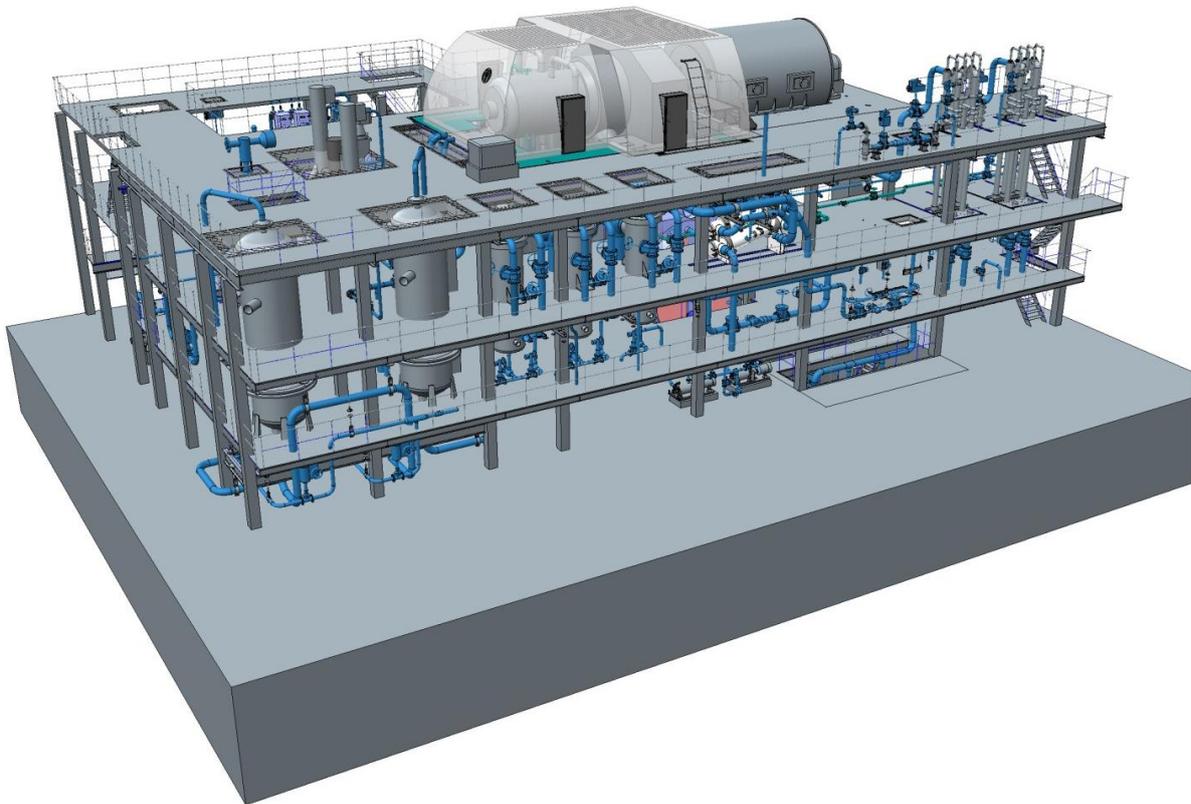


Рисунок 14.1 – Компоновка ячейки ПТУ с турбиной типа К-65-12,8
производства УТЗ

Основные требования к оптимальной компоновке ПТУ очень просто формулируются – обеспечение компактности при обеспечении высокого уровня технико-экономических, эксплуатационных показателей каждой единицы оборудования, входящего в ПТУ, и ПТУ в целом, что включает в себя эффективность сопровождения ЖЦ ПТУ на этапе сервиса. Следует учесть комфорт доступа и удобство проведения обслуживания и всех видов ремонтов

оборудования, что достигается с учетом накапливаемого опыта и наработок, которые эффективней всего получить в типовой компоновке ПТУ и генеральным проектировщиком с учетом особенностей объекта.

По опыту реализации различных компоновок УТЗ разрабатывает компоновки ПТУ, по высоте разделенные на ряд уровней, на которых, как правило, типовым образом располагается определенное основное и вспомогательное оборудование ПТУ, и где организуются площадки обслуживания оборудования.

Типовые компоновки максимально учитывают эффективность управления ЖЦ всей ПТУ на этапах монтажа, пусконаладки, эксплуатации и сервиса оборудования, установленного в машинном зале. Поэтому закладываемые в компоновку решения, а значит, и размещение оборудования, учитывают перемещения самых габаритных и тяжелых элементов с использованием сложных такелажных методов и специальных инструментов и приспособлений, что возможно смоделировать при разработке 3Д-модели компоновки ячейки, которая встраивается и привязывается к 3Д-модели машинного зала с возможностью определения необходимой высоты подъема главного и вспомогательного крюков крана над уровнем отметки пола обслуживания.

Итак, схемно-компоновочные решения, заложенные турбинным заводом в ПТУ, прямым или косвенным образом влияют на доходы и расходы ПТУ на этапе эксплуатации, и они фактически прямо пропорциональны ее электрической и тепловой мощности, периоду полезной эксплуатации, ценовым показателям на рынке электрической и тепловой энергии. От решений, принятых при разработке ПТУ, зависят размеры капитальных затрат, например, на приобретение основного и вспомогательного оборудования, материалов, полуфабрикатов, трубопроводов, а также на реализацию услуг СМР и ПНР и операционных текущих затрат в период эксплуатации ПТУ.

Выполняемая турбинным предприятием оптимизация количества, номенклатуры и технических решений по использованию приобретаемых оборудования, ресурсов и услуг позволяет минимизировать затраты заказчика.

Показательными примерами являются:

- решения, закладываемые в задание на фундамент турбоагрегата, которое разрабатывается на основании требований НТД, опыта при разработке проектно-конструкторской документации. От качества такого задания зависит объем бетона, количество строительной арматуры и других материалов, необходимых при возведении фундамента турбоагрегата;

- решения, закладываемые в задания на полы и на площадки обслуживания, от качества которых зависят расходы на приобретение плит перекрытий для полов, сортового проката для площадок обслуживания в ячейке;

- решения по трассировке трубопроводов, от которых будет зависеть качество рабочих чертежей трубопроводов, включающих опоры, трубопроводную арматуру, объем, и решения, которые влияют на затраты их приобретения, СМР, ПНР и обслуживание, в том числе смежные вопросы, например, теплоизоляция.

Более половины капитальных затрат проекта ТЭС приходится на оборудование и строительную часть главного корпуса, существенную часть которого занимает турбинное отделение машинного зала, что указывает на значительную зависимость затрат объекта в целом от решений по ПТУ.

Необходимо заметить, что максимально компоновочные решения ПТУ влияют на тепловые электрические станции с ПСУ и несколько в меньшей степени с ПГУ, где доля основного оборудования ПСУ ниже, так как значительную долю занимает ГТУ.

Ключевым технико-экономическим показателем эффективности компоновочно-схемных решений ПТУ является эффективность использования пространства главного корпуса ТЭС, который по ПТУ производства УТЗ представлен в [21]: «эффективность использования пространства является критерием, определяющим качество проектирования компоновки ПТУ как совокупности технических решений по размещению оборудования, трубопроводов и строительных конструкций, выполняющих комплекс определенных функций. При этом, безусловно, компоновка должна удовлетворять требованиям надежности, безопасности, ремонтпригодности,

удобства в обслуживании. Тем не менее, эффективность использования пространства является наиболее важным интегральным критерием эффективности компоновки в целом.

В качестве оценочных критериев эффективности использования пространства (эффективности компоновки ПТУ) используются такие показатели, как удельная площадь и удельный объем машинного зала: отношение, соответственно, площади и объема машинного зала к электрической (S/N и V/N) и к тепловой мощности (S/Q и V/Q) ПТУ, установленных в машинном зале. Чем меньше значения этих показателей, тем выше эффективность компоновки машинного зала в целом и компоновки ПТУ в частности».

В таблице 14.1 приводятся сравнительные данные для некоторых базовых ПТУ производства УТЗ. Показатели эффективности, рассчитывались исходя из габаритов компоновки ПТУ. При этом размеры машинного зала, очевидно, превышают размеры ячейки ПТУ, поэтому численные значения показателей по машинному залу будут больше, а эффективность компоновки машинного зала будет ниже эффективности компоновки ПТУ.

Согласно источнику [21]: «анализ приведенных в таблице данных показывает, что наиболее эффективной по уровню использования пространства является ПТУ с турбиной Т-120/130-130-8МО. И это притом, что такая ПТУ имеет полноценную систему регенерации, включающую в себя, кроме эжекторов, четыре ПНД и три ПВД. Однако этот факт лишь подтверждает закономерность: ПТУ большей единичной мощности, как правило, более эффективны по уровню использования пространства (имеют меньшие значения удельных площадей и объемов), чем ПТУ с меньшей единичной мощностью. Это подтверждается и данными по самой крупной в этой таблице ПТУ с турбиной Т-113/145-12,4, работающей в составе ПГУ-410. Впрочем, турбины мощностью около 50 МВт также имеют высокие показатели эффективности использования пространства. Несколько хуже выглядят такие показатели у ПТУ с турбиной Тп-35/40-8,8. Это связано с тем, что эта ПТУ спроектирована под существующую ячейку установленной ранее классической турбины для паросилового цикла большей мощности.

Таблица 14.1 – Сравнение компоновок различных паротурбинных установок производства УТЗ

Турбоагрегат (турбина + генератор)	Электрическа я мощность, N, МВт	Тепловая мощность, Q, Гкал/ч	Габариты ячейки ПТУ, м			Показатели эффективности			
			Длина*	Ширина**	Высота***	S/N, м ² /кВт	V/N, м ³ /кВт	S/Q, м ² /(Гкал/ч)	V/Q, м ³ /(Гкал/ч)
Т-120/130-130-8МО + ТФ-125-2У3 (ТВФ-125-2У3)	130	188	39	24	12	0,0072	0,086	4,97	59,0
Тп-100/110-8,8 + ТФ-110-2У3	110	160	36	23	12	0,0075	0,090	5,18	62,1
Т-50/60-8,8 + ТФ-63-2У3	60	120	29	19,2	11	0,0093	0,102	4,64	51,04
К-63-90 + ТВ-60	63	-	32	16,5	10,7	0,0083	0,090	-	-
Тп-35/40-8,8 + ТФ-45-2У3	40	75	28	19	11	0,0133	0,146	10,64	117,0
Т-40/50-8,8 + ТФ-50-2У3	50	120	29	21	12	0,0091	0,146	5,07	60,9
Т-53/67-8,0 + ТФ-80-2У-3	67	120	30,5	20	10,9	0,0080	0,099	5,08	55,42
Т-63/76-8,8 + ТФ-80-2У3	76	120	29,5	21	12	0,0082	0,098	5,16	62,0
Т-113/145-12,4 + ТФ-160П-2У3	145	188	48	23	12	0,0076	0,091	5,87	70,4

* С учетом выемки ротора генератора.

** Без учета выемки трубок конденсатора.

*** С учетом прямков, без учета высоты турбины и генератора над отметкой пола машинного помещения.

Очевидно, что показатели эффективности использования пространства имеют характер некоторой дискретности. К примеру, если значение удельной площади одной ПТУ по отношению к другой больше на 50%, то есть эффективность первой ПТУ ниже, чем второй, это не означает, что на площади второй можно разместить ПТУ мощностью, в полтора раза превосходящей мощность менее эффективной установки.

Дискретность показателей эффективности использования пространства объясняется тем, что длина, ширина, высота ячейки ПТУ, а значит, и размеры машинного зала главного корпуса станции зависят от конкретного оборудования. В ПТУ разработки УТЗ длина ячейки зависит от суммарной длины турбоагрегата, ширина – от длины конденсатора и сетевых подогревателей, высота – от высоты конденсатора и величины требуемого подпора для конденсатных насосов конденсатора. Таким образом, невозможно использовать в каждой ПТУ, под каждую конкретную мощность индивидуально разработанные, например, конденсатор и сетевой подогреватель. Отсюда, отчасти, следуют низкие показатели эффективности ПТУ с турбиной Т-40/50-8,8 (высокие значения S/N и V/N), в которой используются те же конденсатор и подогреватель сетевой воды, что и для ПТУ с турбиной Т-63/76-8,5, имеющей электрическую мощность в полтора раза выше».

УТЗ проводил работы по анализу специфических показателей эффективности использования пространства компоновок теплофикационных ПТУ собственного производства. Такими показателями были приняты удельные площади и объемы ячейки, отнесенные к тепловой, в данном случае – к отопительной нагрузке ПТУ (S/Q и V/Q). Конечно, при анализе обозначено, что на показатели влияют конкретные условия размещения их в существующих машинных залах главных корпусов ТЭС и с учетом того, что большая часть проектов использовала существующие реконструируемые станции, то показатели эффективности использования пространства являются следствием поставленных ограничений, нежели целью.

Если разбирать ЖЦ ПТУ на этапе СМР, то к компоновке выставляются требования по минимизации специальных дорогостоящих работ, которые

связаны со сложными действиями по монтажу крупногабаритного оборудования, с работами в стесненных условиях, требующих серьезных подготовительных работ и специальных такелажных методов, а также с минимизацией земляных работ, также проводимых в стесненных условиях. Компоновка должна обеспечивать беспрепятственный монтаж турбины, конденсатора, сетевых подогревателей.

Компоновка ПТУ влияет на размеры и особенности машинного зала главного корпуса станции. Таким образом, компактная компоновка ПТУ должна приводить при новом строительстве генерирующего объекта к уменьшению размеров главного корпуса, то есть к снижению капитальных затрат и затрат на обслуживание и ремонт зданий и сооружений в целом.

Документация и 3Д-модель компоновки ПТУ должны давать четкие представления о взаимном расположении оборудования, основных привязках, площадках обслуживания. Одним из главных требований к компоновке является требование об отсутствии коллизий оборудования, трубопроводов и строительных конструкций. Компоновка должна давать однозначные привязки оборудования к осям ПТУ. Внедрение новых цифровых инструментов позволило свести к минимуму количество коллизий и ошибок за счет типизации компоновок и их оптимизации, а также наполнения базы элементов наработок по ПТУ.

Развитие на УТЗ инструментов и средств САПР для разработки позволило в сотни раз сократить количество коллизий, связанных с проектированием ячейки и ее привязки к объекту: разного рода коллизий компоновки и схем ПТУ достигало в сложных больших компоновках до 10000 случаев, и все они были сведены к минимуму.

Учитывая важность развития инструментов и средств разработки компоновок ПТУ, УТЗ – одно из немногих в мире турбинных предприятий использует САПР трехмерного твердотельного проектирования, разработанную и внедренную УТЗ совместно с кафедрой «Турбины и двигатели» УрФУ на основе использования современных информационных технологий [21, 118, 147], что позволяет обеспечивать повышение качества разработок, реализуемых на следующих этапах на объектах, сокращение

сроков и трудоемкости проектно-конструкторских работ. Разработка, внедрение и использование такой специализированной САПР шло в период первого начального этапа цифровой трансформации и внедрения модульных принципов проектирования, что, в том числе, обеспечило высокую результативность реализации основного этапа трансформации процессов этапа КТПП предприятия и в очередной раз подтвердило важность одновременного и равномерного развития предприятия во всех производственных цепочках, включая повышение всех показателей проектно-конструкторских работ и выдачу исходных данных по паротурбинной установке генеральному проектировщику и заказчику, обеспечивающих реализацию последующих этапов ЖЦ такого оборудования, смежного основного и вспомогательного оборудования и объекта в целом.

Если разбирать ЖЦ ПТУ на этапах эксплуатации и сервиса, то, естественно, компоновка должна обеспечивать наименьшие затраты сопровождения и управления ЖЦ, к которым относятся затраты на обслуживание, ремонт и замену оборудования, а также затраты, связанные с приведением оборудования ПТУ в соответствие с действующими нормами и правилами, поэтому следует указать, что строительные конструкции, используемые в ПТУ, должны:

- обеспечивать надежное крепление оборудования;
- выдерживать нагрузки от оборудования и трубопроводов;
- быть максимально унифицированы (!) с предшествующей оптимизацией;
- обеспечивать беспрепятственный монтаж оборудования и трубопроводов;
- удовлетворять строительным нормам и правилам.

ГЛАВА 15. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для рассмотрения вопроса влияния внедрения модульной концепции с одновременной цифровой трансформацией участников сопровождения ЖЦ оборудования ПТУ следует обозначить основные показатели эффективности ПТУ и паровой турбины, в частности. В силу особенностей эксплуатации на разных режимах и вариативности тепловых принципиальных схем и требований к оборудованию оптимально обозначить эксплуатационные показатели работы теплофикационных турбин, которые охватывают такие показатели конденсационных турбин.

Итак, именно эксплуатационные показатели работы паровых турбин и турбинного оборудования, как и другой продукции, характеризуют их качество и удовлетворенность заказчика, эксплуатирующего такое оборудование, на что также указывают, как представлялось выше, международные стандарты ИСО 9001:2015.

Разработчикам теплофикационных турбин, которым является в первую очередь УТЗ, специализирующийся на разработке и выпуске таких типов турбин в России, являющийся мировым лидером по системному внедрению и эксплуатации централизованной теплофикации. Поэтому УТЗ сложнее всего удовлетворить потребности всех своих заказчиков, что становится возможным при предложении и внедрении на различные проекты большого ряда паровых турбин различных типов и моделей, а также их различных модификаций. Каждая модификация имеет особенности, которые могут выполняться в различных вариантах. Учитывая необходимость, обозначенную выше, по сокращению номенклатурного ряда турбин и возможному сокращению модификаций ДСЕ, единственным способом такого обеспечения качества оборудования и удовлетворения потребностей заказчика является использование научного подхода к созданию оборудования такого номенклатурного ряда с использованием модульной концепции, позволяющей оптимальное разделение конструкции на модули и подмодули с дальнейшей малозатратной модификацией таких стандартных библиотечных элементов.

Технико-экономические показатели паровых турбин, как и все другие регламентируемые их показатели качества, согласовываются с заказчиком и генеральным проектировщиком на этапе формирования первого конструкторского документа, являющегося приложением к договору поставки – Технические условия. УТЗ ввел в практику гарантирования усредненного показателя тепловой экономичности $\varepsilon_{\text{уср}} \leq (100^{+1})\%$, который должен быть равен или меньше гарантируемой тепловой экономичности с допуском 1%. Такой показатель в зависимости от типа теплофикационной турбины определяется по нескольким наиболее характерным режимам: для турбины типа Т, как правило, по двум, а турбины типа ПТ по трем режимам – по формуле $\varepsilon_{\text{уср}} = A(d_n/d_r)_1 + B(d_n/d_r)_2 + B(q_n/q_r)_3$, где d_n , d_r – удельные расходы пара на теплофикационном режиме работы турбины, соответственно, по данным тепловых испытаний и гарантий; q_n , q_r – удельные расходы теплоты на конденсационном режиме работы турбины, соответственно, по данным тепловых испытаний и гарантий; «1», «2», «3» – номера режимов; «А», «Б», «В» – доли в процентах продолжительности работы турбины на конкретном режиме. В турбине типа ПТ режим «1» – номинальный режим с отборами пара на производство и для нужд отопления; режим «2» – отопительный отбор отключен, производственный имеется; режим «3» – конденсационный. В турбине типа Т два режима: теплофикационный с отопительными отборами и конденсационный.

Следующим эксплуатационным показателем паровой турбины является назначенный срок службы. При этом ресурс деталей и элементов турбин, работающих при температуре свыше 450 °С, равен 220 тыс. часов, а ресурс трубопроводов – 200 тыс. часов, безусловно, указывает на вопрос актуальности малозатратной частичной замены отдельных деталей и элементов с их модификацией или реновацией при физическом и моральном износе оборудования.

Также важным показателем является разрешенное количество пусков турбины за весь срок их службы, что определяется по верхней границе из условий осуществления пусковых операций и конструкции, определяющей

маневренность и мобильность оборудования, поэтому важно малозатратным способом добиваться повышения таких показателей с возможным продлением ресурса в разумных пределах без снижения надежности турбин.

Важным эксплуатационным показателем паровой турбины является показатель надежности работы, которым является средняя наработка на отказ T_0 , определяемая по формуле: $T_0 = t_{\text{сум}}/n_{\text{от}}$, где $t_{\text{сум}}$ – суммарная наработка за период; $n_{\text{от}}$ – число отказов за этот период. При этом стоит отметить, что следует при расчете выделять только случаи, относящиеся к данному турбинному оборудованию, а не к смежному.

Другим показателем надежности паровой турбины является коэффициент готовности, который определяется по формуле: $K_r = T_0/(T_0 + T_v)$ или $K_r = t_{\text{сум}}/(t_{\text{сум}} + t_{\text{рем}})$, где T_0 и $t_{\text{сум}}$ указаны ранее; T_v – среднее время восстановления после отказа; $t_{\text{рем}}$ – время простоя в период внеплановых ремонтов.

Еще одним эксплуатационным показателем надежности паровой турбины является межремонтный период, который зависит от условий эксплуатации турбины и сложности конструкции турбины, поэтому явным образом на этот показатель влияют:

- возможность качественного выполнения требований эксплуатации;
- возможность гибкой модернизации и оптимизации конструкции под требования сервисного обслуживания, позволяющие сократить затраты на такое обслуживание при увеличении качества и межремонтного периода.

Помимо представленных выше показателей, для паровых турбин используются дополнительные эксплуатационные показатели, позволяющие оценить интенсивность работы оборудования: средний коэффициент рабочего времени $K_p = t_{\text{сум}}/(T_k \cdot m)$, где T_k – сумма продолжительности нахождения турбин в работе и резерве; m – число турбин, по которому определяется коэффициент, показывающий количество часов работы в году.

Для теплофикационных турбин УТЗ также используются коэффициенты использования установленной мощности:

- электрической – $K_{y.м} = W_T / (m \cdot T_k \cdot N_{Tном})$,

- отопительных отборов – $K_{y.мо} = W_o / (m \cdot T_{т.р.т} \cdot N_{Tном})$,

- производственного отбора – $K_{y.мп} = W_{п} / (m \cdot T_k \cdot N_{Tном})$, где W , W_T , $W_{п}$

– суммарная выработка электрической энергии, тепловой энергии отопительными и производственным отборами соответственно всеми турбинами; $N_{ном}$, $N_{Tном}$, $N_{пном}$ – номинальная электрическая мощность и номинальные тепловые нагрузки отопительных и производственного отборов; $T_{т.р.т}$ – теоретическое время работы отопительных отборов с номинальной нагрузкой, принимаемое на УТЗ равным 5500 ч.

Задача завода-изготовителя при вводе в эксплуатацию головных образцов основного турбинного оборудования «не провалить» обозначенные эксплуатационные показатели в первые годы отработки конструкций, схем, операций и режимов эксплуатации, что эффективно возможно при гибкой современной технической политике на базе модульной концепции с учетом цифровой трансформации, позволяющей эффективно возвращаться из этапов СМР, ПНР, эксплуатации и сервиса на этап КТПП с дальнейшим внедрением принципа «домино».

На повышение эксплуатационных показателей, а значит, на качество этапа эксплуатации ПТУ влияет заложенные или, как обозначено выше, перезакладываемые в конструкцию основного оборудования, схему и компоновку возможности по совершенствованию, оптимизации и отработке конструкторско-технологических решений, получение опыта, который позволяет также масштабировать их на другом оборудовании предприятия поставщика или оборудовании объекта.

УТЗ при разработке новых современных модульных конструкций паровых турбин, что в том числе позволило сократить номенклатурный ряд паровых турбин предприятия, проводил ряд междисциплинарных расчетно-аналитических задач, решение которых сопрягалось со смежными задачами разработки энергоблока в целом, включая котельное, генераторное и вспомогательное оборудование, обеспечил максимальную функциональность

оборудования при значительном повышении предельных установленных мощностей турбин с различным количеством цилиндров:

- в одноцилиндровом исполнении добиться 120 МВт любого типа (К, КТ, Кп, Т, ТР, ТК, Тп, ПТ, ПР, Р) паровых турбин для работы в составе парогазовых и паросиловых установок с необходимым количеством подводов и отборов пара;

- в двухцилиндровом исполнении обеспечить до 250 МВт любого типа (в том числе теплофикационных с многоступенчатым подогревом сетевой воды и разветвленной регенерацией, что не достигается зарубежными производителями) паровых турбин для работы в составе парогазовых и паросиловых установок с необходимым количеством подводов и отборов пара;

- в трехцилиндровом исполнении обеспечить до 400 МВт любого типа (в том числе любых теплофикационных, что не достигается зарубежными производителями) паровых турбин для работы в составе парогазовых и паросиловых установок с необходимым количеством подводов и отборов пара.

Такие схемно-конструктивные решения для паровых турбин в составе ПГУ были достигнуты, в том числе за счет положительно защищенных подходов к выбору давлений и расходов контуров среднего (для трехконтурной) и низкого (для трех- и двухконтурной) давления [34, 57, 68, 102-104].

Авторы, проводя многочисленные тепловые расчеты связки «ГТУ-КУ-ПТУ», пришли к выводу, что для конкретной газовой турбины в составе ПГУ в отведенные сроки проекта оптимизационным итерационным методом возможно рассчитать, разработать и изготовить оптимальный котел-утилизатор и соответствующую ему конденсационную или теплофикационную паровую турбину с требуемым функционалом и высокими технико-экономическими показателями. При этом при закладывании не индивидуальной конструкции, а модульной или блочно-модульной возможно в сокращенные сроки обеспечить разработку и изготовление, что позволит выделить временные и трудовые ресурсы на оптимизацию и

совершенствование конструкций модулей и оборудования, повышая его надежность, готовность и экологичность.

Важный момент, который до настоящего момента никем не был выявлен, раскрыт, а значит, исследован должным образом, касается влияния на конструкцию паровой теплофикационной турбины, особенностей ее эксплуатации и связанных с этим дополнительными требованиями по сравнению с конденсационными турбинами, что значительно повышает эффект от внедрения модульной концепции создания именно теплофикационных турбин. Помимо естественной необходимости обеспечения предприятием, специализирующемся на создании теплофикационных турбин различных типов с многовариантными индивидуальными проектными требованиями к схемно-компоновочным решениям, которые в значительной степени влияют на большую вариативность конструкций собственно турбины, существует особенность теплофикационных турбин, при работе которых с регулируемыми отборами пара в отличие от конденсационных турбин электрическая мощность не имеет прямой пропорциональности расходу свежего пара и будет варьироваться в зависимости от величины отбора пара при одном и том же расходе свежего пара. Мощность же теплофикационной турбины значительным образом зависит от давлений пара в регулируемых отборах. Все эти особенности указывают на необходимость подбора или разработки модуля, который к тому же должен позволять установить соответствующий параметрам пара и режимам работы отсек проточной части.

Достаточно большое количество задач по совершенствованию конструкции оборудования, схем, компоновок и ЖЦ такого оборудования решается на этапе эксплуатации, особенно это касается новых образцов, требующих различных доработок, уточнений и отработки вопросов эксплуатации во всем диапазоне работы энергоблока или электростанции в целом. Можно отметить следующие работы, касающиеся диагностики, исследований, оценки влияния различных факторов и предложения решений устранения проблем или отработки условий и режимов эксплуатации оборудования [152-162].

ГЛАВА 16. МОДЕРНИЗАЦИЯ МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Решение задач по модернизации и реновации основного паротурбинного оборудования является важным направлением деятельности турбинного предприятия в пользу эксплуатирующей такое оборудование организации.

В качестве примера в таблице 16.1 приведена динамика изменения технико-экономических и эксплуатационных показателей паровых турбин УТЗ.

Безусловные преимущества модернизации паротурбинного оборудования с использованием модульных подходов и тем более модернизация и реновация оборудования, уже имеющего модульную конструкцию с учетом взаимозаменяемости, применимости, ремонтпригодности, сборности, унификации и технологичности были описаны выше. Авторы считают необходимым предложить и разобрать технические решения, позволяющие внедрять модульные подходы при реконструкции, модернизации и реновации действующего паротурбинного оборудования.

По теме у авторов в соавторстве опубликованы многочисленные работы [32, 55, 63, 66, 68, 69, 73, 85, 90, 91, 96-104]. Опишем самый показательный в части внедрения модульных подходов при модернизации является вопрос использования вала-проставки с учетом его совершенствования и адаптации к теплофикационным турбинам.

Предложено решение по уменьшению затрат на применение дорогостоящего вала-проставки ЦНД при переводе теплофикационной турбины на эксплуатацию с таким валом при работе по тепловому графику.

Известен запатентованный SU № 1121468 способ работы теплофикационной турбины по тепловому графику путем перехода от режима с пропуском пара из ЦВД/ЦСД через ресивер в ЦНД на режим противодавления ЦВД установкой заглушек на входе в ЦНД и замены ротора последнего на вал с дисками, имеющими те же габаритные размеры, что и диски без рабочей части лопаток, а также с удаленным ресивером и установкой дополнительных заглушек на выходе из ЦВД.

Таблица 16.1 – Динамика изменения технико-экономических и эксплуатационных показателей паровых турбин УТЗ

Турбина: год	Экономичность		Надежность (коэффициент готовности из 1,0 возможных)	Ремонтопригодность (баллы из 100 возможных)	Металлоемкость (баллы из 100 оптимально возможных)
	Средний КПД проточной части	Удельный расход пара, (т/ч)/МВт			
ПТ-30/35-90-5М:					
- 2011	0,84	3,98	0,97	96	85
- 2015	0,87	3,96	0,98	98	90
- 2019	0,88	3,95	0,98	98	92
Т-120/130-12,8:					
- 2011	0,85	3,62	0,98	96	87
- 2015	0,88	3,56	0,99	98	90
- 2019	0,89	3,54	0,995	98	91
Т-250/305-240:					
- 2011	0,85	3,21	0,97	96	85
- 2015	0,87	3,19	0,98	98	90
- 2019	0,89	3,17	0,98	98	91

В новом решении предлагается в качестве вала-проставки применять штатный ротор низкого давления, в котором разлопачивают диски установленных ступеней, а вместо удаленных рабочих лопаток в пазах дисков устанавливают хвостовики рабочих лопаток. При этом предлагается диафрагмы из ЦНД не удалять, что облегчает переход от режима работы по тепловому графику на конденсационный режим. Для исключения возможного попадания воздуха в конденсатор через неплотности, связанные с деформацией ресивера, последний снимают и устанавливают дополнительные заглушки на выходе из ЦВД/ЦСД.

Для предотвращения срабатывания автомата безопасности его перенастраивают на другую частоту вращения. При этом из-за незначительного уменьшения массового момента инерции ротора, связанного с разлопачиванием дисков, увеличение напряжений в случае отказа автомата безопасности будет также несущественным.

При необходимости перехода на конденсационный режим удаляют хвостовики рабочих лопаток, облопачивают диски ступеней ЦНД, удаляют заглушки на выходе из ЦВД/ЦСД и заглушки на входе в ЦНД и устанавливают удаленный ресивер.

Предложенный способ работы теплофикационной турбины при работе по тепловому графику обладает эффективностью предыдущего решения по повышению тепловой нагрузки из-за предотвращения пропуска пара из ЦВД/ЦСД в ЦНД и повышению электрической мощности турбины в связи со снижением потерь мощности на трение и вентиляцию из-за отсутствия рабочей части лопаток в ступенях ЦНД.

При этом предложенный способ позволяет значительно уменьшить затраты на перевод теплофикационной турбины на эксплуатацию с валом-проставкой ЦНД, так как в качестве вала-проставки применяют штатный ротор, в котором разлопачивают диски с установкой в пазах дисков хвостовиков рабочих лопаток. Стоимость хвостовиков рабочих лопаток несоизмеримо меньше стоимости вала-проставки, применяемого в предыдущем решении, что позволяет получить в предложенном варианте

значительный экономический эффект.

Учитывая, что такой перевод турбины для работы по тепловому графику осуществляется, как правило, на ТЭЦ с несколькими однотипными турбинами типа «Т», например, на Ново-Свердловской ТЭЦ одна из пяти турбин типа Т-110/120-12,8 переведена в турбину типа «ТР», то предлагаемое решение с возможностью использования штатного или резервного ротора и возможностью обратного перевода без затрат на вал-проставку является актуальным и экономически обоснованным.

ГЛАВА 17. ЭКОНОМИКА И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В каждом проекте совершенствования конструкции оборудования, а также оптимизации его ЖЦ следует выполнять расчет суммы экономии всех участников ЖЦ на всех этапах. Однако следует разделять экономический эффект, рассчитываемый «до и после» для отдельных предприятий-участников, что позволит турбинному предприятию-разработчику и производителю учитывать экономию других предприятий, осуществляющих обслуживание и эксплуатацию, как повышение конкурентоспособности выпускаемой номенклатуры оборудования, как с точки зрения поставки нового оборудования, так и с точки зрения поставки комплектующих и услуг для сопровождения этапов обслуживания и эксплуатации оборудования, в том числе смежного.

При расчете экономических показателей необходимо учитывать важные положения и определения, которые достаточно точно сформулированы в [120]:

«1.4.1. При оценке уровня качества продукции необходимо учитывать экономические показатели. Экономические показатели представляют собой особую группу показателей, характеризующих затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию или потребление продукции.

1.4.2. Экономические показатели учитываются в интегральном показателе качества продукции при расчете суммарных затрат на создание и эксплуатацию или потребление продукции...

1.4.3. Примерами экономических показателей могут служить: затраты на разработку, изготовление и испытания опытных образцов; себестоимость изготовления продукции; затраты на расходные материалы при эксплуатации технических объектов.

1.4.4. Всесторонний учет экономических показателей при изготовлении, эксплуатации или потреблении продукции проводится с целью оценки экономической эффективности улучшения качества продукции...

1.4.6. Народнохозяйственный эффект от улучшения качества продукции определяется путем суммирования:

а) общей (за весь срок службы) экономии, которую дает в народном хозяйстве использование /продукции улучшенного качества;

б) экономии в ее производстве.

1.4.7. Определение экономического эффекта осуществляется комплексно.

1.4.8. Для расчета экономии как в эксплуатации или потреблении, так и в производстве, необходимо сравнить эксплуатационные и производственные затраты для улучшенного изделия и его аналога.

1.4.9. Для расчета общей (за весь срок службы) экономии, которую дает в народном хозяйстве применение улучшенной продукции, вначале рассчитывается экономия, получаемая в каждой отдельной i -й сфере применения улучшенной продукции в течение периода между расчетным годом и годом прекращения ее эксплуатации, после чего эта экономия суммируется по всем сферам применения. В других более частных случаях, когда применение продукции не зависит от особенностей отдельных сфер, экономия определяется по всей массе продукции в расчете на средние условия ее применения.

1.4.10. При определении затрат на изготовление продукции необходимо учитывать фактор времени, то есть разновременность осуществления этих затрат. Для этой цели следует привести себестоимость и капитальные вложения к одному и тому же начальному моменту времени – к расчетному году.

1.4.11. Если продукция отличается от аналога величиной годового полезного эффекта и сроком службы, то полные затраты на производство аналога умножаются на коэффициенты эквивалентной замены по полезному эффекту и по срокам службы.

1.4.12. Под полезным эффектом от эксплуатации или потребления продукции понимается выполняемая ею работа или отдача. Для машин такой работой или отдачей является выработка или производительность за весь срок службы, за год, месяц и т.д.; для режущего инструмента – суммарная стойкость до полного износа и т.д.

1.4.13. Затраты потребителей оцениваемой продукции складываются из эксплуатационных издержек и капитальных вложений. Эксплуатационные издержки включают издержки на капитальные и средние ремонты, запасные части, смазочные и другие эксплуатационные материалы и т. д. Капитальные вложения потребителей расходуются на приобретение продукции, ее доставку, монтаж и наладку. В ряде случаев капитальные затраты потребителей расходуются также на различные сооружения, необходимость в которых обусловлена требованиями эксплуатации или потребления продукции.

1.4.14. Полные затраты потребителей рассчитываются с помощью формулы приведенных затрат. Для этого эксплуатационные издержки суммируются с капитальными вложениями, сначала в масштабе года, а затем всего срока службы в годах (с учетом фактора времени).

1.4.15. Экономия на полных затратах потребителей продукции определяется посредством вычитания полных затрат по ее использованию из скорректированных полных затрат для аналога.

1.4.16. Затраты изготовителей на производство продукции состоят из текущих издержек, образующих ее себестоимость, и капитальных вложений.

1.4.17. При сравнительных расчетах себестоимости продукции необходимо принимать во внимание только те статьи издержек, которые изменяются в связи с улучшением ее качества.

1.4.18. В состав капитальных вложений на производство продукции улучшенного качества входят:

- затраты на научно-исследовательские, опытно-конструкторские и проектные работы;
- стоимость покупного оборудования вместе с затратами на его доставку, монтаж и наладку;
- стоимость нестандартного оборудования, изготовляемого силами предприятия;
- стоимость реконструкции или расширения зданий и сооружений только в том масштабе, в каком это необходимо для изготовления оцениваемой продукции;

- прирост оборотных средств, необходимый для выпускаемой продукции, и другое...».

В соответствии [120] при технико-экономическом анализе свойств конструкторско-технологических решений предлагается использовать один из методов интегральной оценки конструктивности и технологичности в ЖЦ оборудования. Такой метод оценки объединяет различные коэффициенты технологичности, которые учитывают уровень влияния на трудоемкость производства, сервиса и других этапов ЖЦ.

Для расчета экономического эффекта от внедрения концепции модульного создания паротурбинного оборудования следует описать и проанализировать финансовые потоки ЖЦ оборудования с дальнейшей оценкой «прямых» и «косвенных» финансово-экономических эффектов от снижения затрат на сопровождение этапов ЖЦ.

«Прямой» годовой экономический эффект от перехода к целевой модели ЖЦ оборудования определяется сокращением трудоемкости на КТПШ и предлагается вычислять по формуле:

$$E = T_2 \cdot C \cdot K_{\text{сокр}} \cdot N_{\text{ч}},$$

где E – годовая экономия средств на выполнение подготовки производства;

T_2 – количество нормо-часов в году = (247 рабочих дней) · 8 = 1976;

C – ставка, нормо-час;

$K_{\text{сокр}}$ – коэффициент сокращения трудоемкости;

$N_{\text{ч}}$ – количество сотрудников конструкторского бюро и отдела главного технолога, задействованных в подготовке производства.

Ключевыми показателями технологичности являются: трудоемкость, материалоемкость и себестоимость.

Общая трудоемкость T продукции определяется количеством времени, затрачиваемым исполнителями на производство единицы продукции, выражается в нормо-часах и рассчитывается по формуле [120]:

$$T = t_i + \dots + t_k = \sum_{i=1}^k t_i,$$

где t_i – трудоемкость по отдельным цехам, участкам или видам работ, входящим в технологический процесс изготовления данной продукции; k – количество цехов, участков или видов работ.

Коэффициент сокращения трудоемкости $K_{\text{сокр}}$ определяется как соотношение трудоемкости оцениваемой улучшенной продукции к базовой до улучшения.

Также необходимо учитывать, что, кроме представленного выше расчета «прямого» экономического эффекта, достигается «косвенный» экономический эффект, который может состоять из сокращения затрат вследствие производства брака, испорченного оборудования, всевозможных штрафных санкций за невыполнение сроков контракта и т.д. Потенциально «косвенный» экономический эффект может на порядки превышать «прямой» экономический эффект.

Отдельными методиками следует выполнять расчет экономического эффекта от внедрения новой концепции на последующих стадиях ЖЦ: производство, монтаж, пусконаладка, эксплуатация, модернизация, сервисное обслуживание.

Таким образом, опыт разработки и внедрения концепции модульного создания паротурбинного оборудования и анализ экономической эффективности по мероприятиям таких проектов трансформации КТПП и цифровых инструментов и средств сопровождения ЖЦ, развития обеспечения ЖЦ оборудования показали, что все это позволяет повысить технико-экономические и эксплуатационные показатели, а также повысить эффективность ЖЦ оборудования и продлить его срок эксплуатации.

Предлагается при формировании мероприятий по совершенствованию оборудования и его ЖЦ проводить сравнение затрат временных, трудовых и финансовых ресурсов до и после проведения таких мероприятий. При проведении сравнения учитывать все прямые и косвенные показатели вплоть до анализа и оценки изменения продолжительности внеплановых простоев турбин в составе энергоблока в связи со снижением количества инцидентов при повышении качества и надежности оборудования и длительности их устранения по изменениям возможности конструкции, что приводит к снижению потерь от недовыработки тепловой и электроэнергии.

ГЛАВА 18. МОДУЛЬНЫЕ ТУРБИНЫ И ТУРБОУСТАНОВКИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Компания General Electric разрабатывает и производит паровые турбины модульной конструкции. В портфолио есть несколько номенклатурных рядов паровых турбин для ПСУ и ПГУ ТЭС, геотермальных и атомных электростанций, станций, использующих несколько различных «модульных платформ» паровых турбин. Каждая модульная платформа позволяет учитывать широкие диапазоны условий эксплуатации и назначений, то есть разработку и эксплуатацию турбин и турбоустановок данной платформы при разных параметрах пара на входе, отборах и принципиальных тепловых схемах.

В соответствии с официальным сайтом компании [150]:

«Паровые турбины General Electric спроектированы для обеспечения максимальной эффективности и маневренности. Их модульная конструкция позволяет учитывать все требования заказчика и предлагать индивидуальные решения. Турбины оптимизированы для быстрого монтажа и проведения пусконаладочных работ, а также для сокращения операционных расходов (большой межремонтный интервал, короткий срок ремонта), повышая эффективность эксплуатирующих компаний.

Индустриальные паровые турбины для выработки электроэнергии и тепла или применения в качестве механического привода мощностью от 15 до 150 МВт.

Паротурбинные установки с промежуточным перегревом пара для коммунального хозяйства на модульной платформе STF-D обеспечивают выдачу мощности в диапазоне от 100 до 1200 МВт.

Паротурбинные установки типа STF-D250 и STF-A200 мощностью от 50 до 300 МВт без промежуточного перегрева пара предназначены для различного применения, включая работу в составе парогазовых блоков.

Паровые турбины модульных платформ ARABELLE 1700 и 1100 предназначены для функционирования в составе машинных залов АЭС». Номенклатурные ряды паровых турбин компании представлены в таблице 18.1.

Платформа STF может быть адаптирована в соответствии с конкретными требованиями проекта и Заказчика. Модульная платформа STF – это инновационные наборы с предварительно спроектированными модулями, которые позволяют гибко конфигурировать турбину и комбинировать цилиндры.

Паровая турбина типа STF-D250 имеет полностью модульную конструкцию или, как обозначает производитель, архитектуру. 3Д-модель представлена на рисунке 18.1.

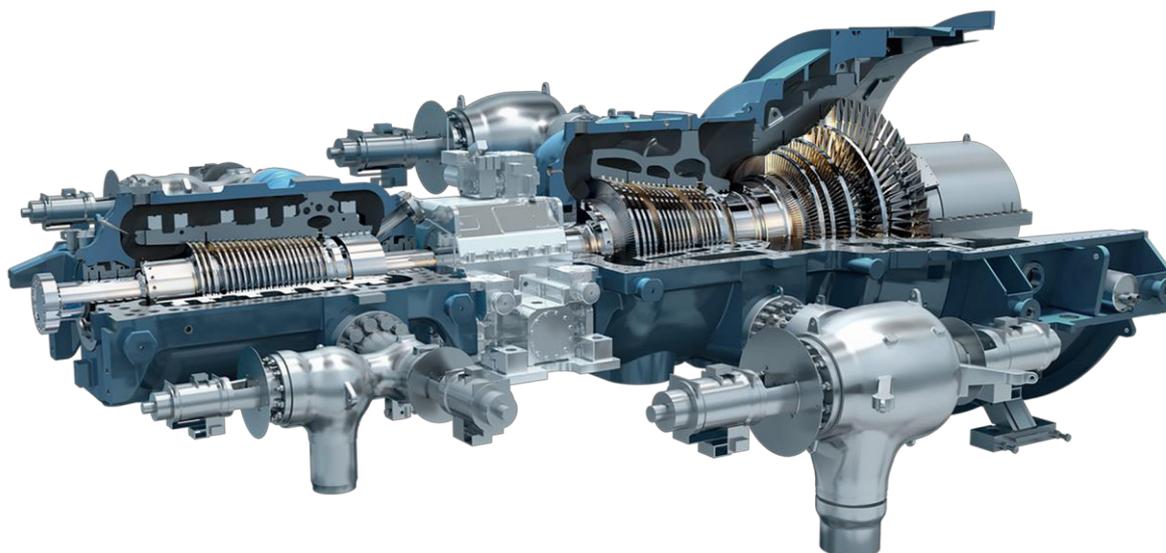
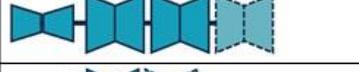
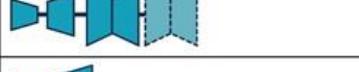


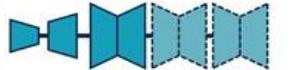
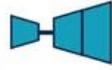
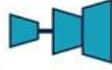
Рисунок 18.1 – 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины компании General Electric типа STF-D250

Модульная конструкция паровых турбин General Electric обеспечивает высокую степень индивидуализации в соответствии с конкретными условиями и принципиальной ПТУ и может обеспечивать регулируемые и нерегулируемые отборы и также подводы пара разных контуров ПГУ. С 2015 года, после объединения General Electric и Alstom, по настоящее время происходит объединение номенклатурных рядов, библиотек модулей, технологических и научно-технических возможностей и подходов различных школ и площадок компании. Модули как взаимозаменяемые статорные конструкции соединяются единообразными фланцевыми соединениями, что позволяет подбирать разные паровпускные части с разным парораспределением, средние части с различными патрубками отборов и подводов, выхлопные части с разными осями выхлопа для конкретных компоновочных решений, а проточная часть адаптируется под конкретные

Таблица 18.1 – Номенклатура паровых турбин производства General Electric

№	Модульная платформа	Тепловая схема	Параметры пара		Диапазон мощности, МВт	Конфигурация цилиндров
			Давление, бар	Температура свежего пара/ пара промперегрева, °С		
1	ARABELLE 1700	атомная электростанция	до 75	до 300 / -	1200 – 1900	
2	ARABELLE 1100				700 – 1200	
3	STF-N700				500 – 800	
4	STF-D650	с промежуточным перегревом, различного назначения	до 190	до 585 / 585	200 – 700	
5	STF-A650 (MT)				100 – 300	
6	STF-D250	без промежуточного перегрева, различного назначения	до 140	до 565 / -	100 – 300	
7	STF-A200 (MT)				50 – 250	
8	STF-A100 (GRT)				20 – 135	
9	STF-G220 (GST)	геотермальная электростанция	до 16	до 360 / -	20 – 50	

Продолжение таблицы 18.1

№	Модульная платформа	Тепловая схема	Параметры пара		Диапазон мощности, МВт	Конфигурация цилиндров
			Давление, бар	Температура свежего пара/ пара промперегрева, °С		
10	STF-D2250	с двойным промежуточным перегревом, ультра супер сверхкритика	до 330	до 620 / 630	600 – 1200	
11	STF-D1250	с промежуточным перегревом, ультра супер сверхкритика		до 650 / 670	400 – 1200	
12	STF-D1050	с промежуточным перегревом, ультра супер сверхкритика	до 300	до 600 / 620	200 – 1200	
13	STF-A1050			до 600 / 600	150 – 300	
14	STF-D850	с промежуточным перегревом, супер сверхкритика	до 245	до 585 / 585	200 – 1000	
15	STF-A850				150 – 300	

условия, чтобы достичь высоких технико-экономических показателей. При этом используется как активное, так и реактивное облопачивание. Уровень модульности находится на высоком инновационном уровне и несколько снизился при объединении, но это компенсировалось увеличением библиотек и расширением производственно-технологических площадок, что тоже временно накладывает ограничения на готовность отдельных производственных площадок оперативно производить ранее не выпускавшиеся элементы и требует время на технологическую подготовку производства и перестройку производственных мощностей. Централизация производственных площадок не доставляет существенных сложностей компании, так как и ранее количество производств у компаний насчитывало десятки, и площадки конкурировали за заказ, представляя свою эффективность производства. Поэтому основными вопросами в ЖЦ оборудования компании General Electric остаются:

- конструкция основного оборудования: разделение на модули, оптимальность модулей;
- модульная концепция с методологией и подходами;
- средства КТПП и в первую очередь цифровые.

Такие блоки вопросов очередной раз указывают на важность развития компании по трем направлениям, связанным с КТПП и обозначенным на рисунке 4.2. Именно развитие в этих трех направлениях дает максимальный прирост повышения эффективности ЖЦ оборудования и, как следствие, продуктов и самого предприятия до современного уровня.

Компания Siemens разрабатывает и производит паровые турбины модульной конструкции, в которую заложена идеология эффективного обеспечения ЖЦ оборудования. В общих и локальных каталогах обозначен номенклатурный ряд паровых турбин для ПСУ и ПГУ ТЭС, промышленных и малых паровых турбин. Полный номенклатурный ряд представлен на рисунке 18.2. Номенклатурный ряд состоит из нескольких модельных рядов: энергетический мощностью до 1900 МВт, промышленные мощностью до 250 МВт и малые мощностью до 25 МВт, разделенные на несколько серий, каждая из которых представляет собой модульную платформу.

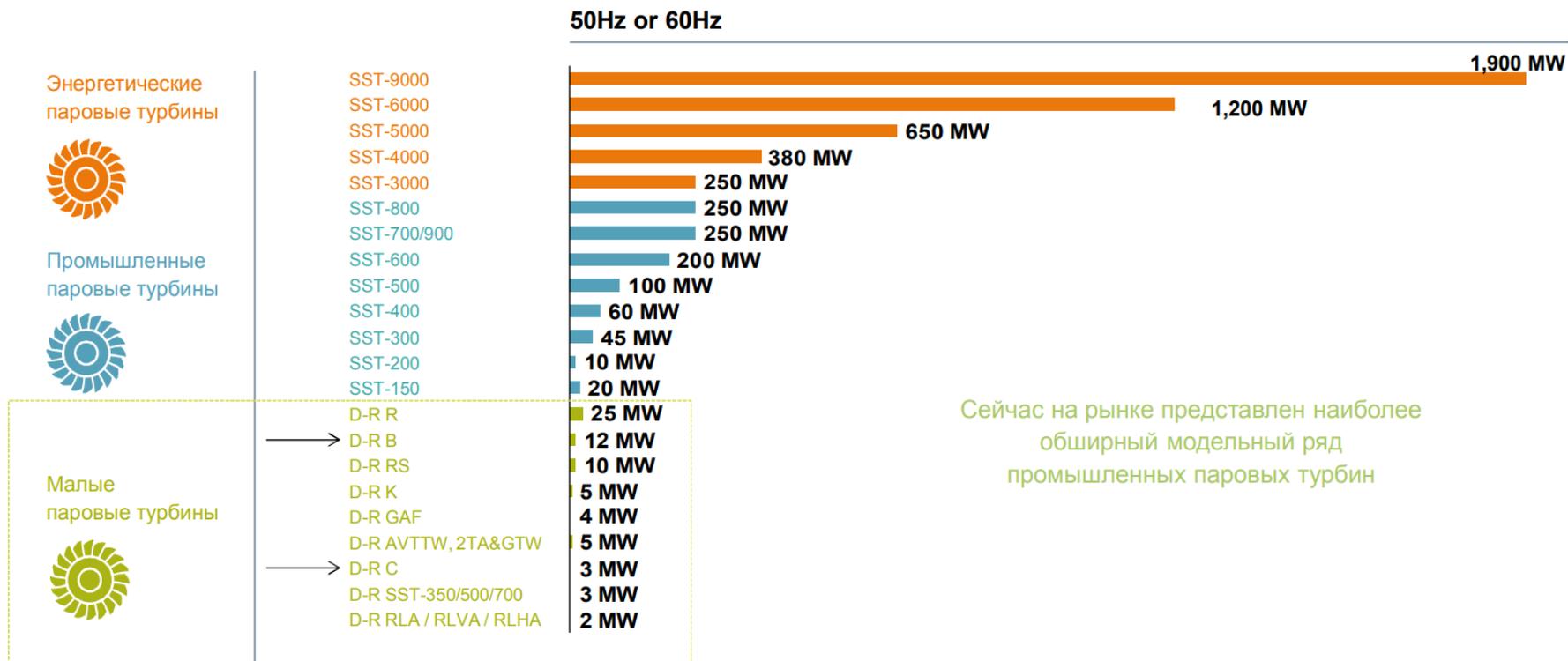


Рисунок 18.2 – Номенклатурный ряд паровых турбин компании Siemens

На такой серии строятся паровые турбины и паротурбинные установки в широком диапазоне параметров пара и мощностей, что позволяет учитывать широкие диапазоны условий эксплуатации и назначений с разными принципиальными тепловыми схемами.

Модельный ряд малых паровых турбин компании Siemens используется для механического привода и привода генератора, следовательно, применяется для различных промышленных и энергетических объектов и при этом достаточно гибко адаптируются под параметры среды, схемы и компоновки проектов (комбинированный цикл, электроэнергия из биомассы, парогазовая электростанция, производство энергии из пальмового масла, солнечная энергия, отходы деревообрабатывающей промышленности, утилизация теплоты уходящих газов). Модельный ряд таких турбин имеет другую школу разработки и производства, но в новейшей истории также разделен на серии в соответствии с общим номенклатурным рядом: SST-040 (75-300 кВт), SST-050 (до 750 кВт), SST-060 (до 6 МВт), SST-110 (до 7 МВт), SST-111 (до 12 МВт).

Профиль турбин имеет модульную конструкцию с размещением основного и вспомогательного оборудования турбоустановки на раме с полной заводской готовностью. Примеры такого оборудования представлены на рисунке 18.3.

Основные параметры и назначение малых паровых турбин серий D-R компании Siemens приведены в таблице 18.2.

В источнике [151] обозначено «турбины одной серии отличаются друг от друга в основном компонентами индивидуального исполнения: рабочие колеса турбин, зубчатые колеса редукторов разрабатываются и изготавливаются для конкретного проекта, под конкретные параметры. Но при этом они имеют и общие конструктивные характеристики, например, одинаковые наружные диаметры рабочих колес или диаметры шеек валов, что позволяет использовать в турбинах одной серии стандартные элементы – корпуса, подшипники, уплотнения и т.д. Таким образом, турбины имеют высокую степень унификации. Кроме того, при использовании стандартных, проверенных длительной эксплуатацией компонентов сокращаются объемы

Таблица 18.2 – Основные параметры и назначение малых паровых турбин серий D-R компании Siemens

№ пп.	Тип	Назначение	Мощность, МВт	Частота вращения, об/мин	Температура пара на входе, °С	Давление пара на входе, МПа	Противодавление, МПа	Давление в конденсаторе, МПа	Отбор регул. / нерегул.
1	D-R RLA	Мех. привод	0,24	≤ 4300...6000	≤ 440	≤ 4,7 (абс.)	≤ 1,2 (абс.)	-	-
2	D-R RLVA		0,24	≤ 4300...6000	≤ 440	≤ 4,7 (абс.)	≤ 1,2 (абс.)	-	-
3	D-R RLH-15		1,865	≤ 6000	≤ 482	≤ 6,3 (абс.)	≤ 2,1 (абс.)	-	-
4	D-R RLH-24		1,865	≤ 6000	≤ 482	≤ 6,3 (абс.)	≤ 2,1 (абс.)	-	-
5	D-R SST 350/500/700		3,50	≤ 12000	≤ 482	≤ 6,3 (абс.)	≤ 20,2 (изб.)	-	-
6	D-R 2TA		3,64	≤ 15000	≤ 530	≤ 10,1 (абс.)	≤ 3,3 (абс.)	-	-
7	D-R AVTTW		4,50	≤ 5000/ ≤ 13000	≤ 550	≤ 12,5 (абс.)	≤ 4,0 (абс.)	-	-
8	D-R GTW		4,50	≤ 14500	≤ 550	≤ 12,5 (абс.)	≤ 3,5 (абс.)	-	-
9	D-R C	Мех./энерг. привод	2,50	≤ 8500	≤ 520	≤ 12,0 (абс.)	≤ 2,1 (абс.)	-	-
10	D-R GAF		3,50	≤ 6000	≤ 440	≤ 4,9 (абс.)	≤ 0,6 (абс.)	≤ 0,005 (абс.)	-
11	D-R U		6,34	≤ 10000	≤ 455	≤ 4,6 (абс.)	≤ 1,5 (абс.)	≤ 0,005 (абс.)	-
12	D-R R		25,0	≤ 15000	≤ 482	≤ 6,3 (изб.)	≤ 2,9 (изб.)	≤ 0,005 (абс.)	1 / несколько
13	D-R RS		25,0	≤ 15000	≤ 482	≤ 6,3 (изб.)	≤ 2,9 (изб.)	≤ 0,005 (абс.)	1 / несколько
14	D-R K	Мех. привод	4,85	≤ 10000	≤ 398	≤ 2,75 (абс.)	≤ 0,5 (абс.)	≤ 0,005 (абс.)	-
15	D-R B	Мех./энерг. привод	11,0	≤ 9500	≤ 500	≤ 6,5 (абс.)	≤ 0,69 (абс.)	-	несколько
16	D-R Tandem	привод	12,50	≤ 8500	≤ 530	≤ 11,1 (абс.)	≤ 1,3 (абс.)	-	1 / несколько

инжиниринговых работ, сроки изготовления паротурбинных установок, а также унифицируются запасные части к ним. Этим обусловлена высокая надежность турбоустановок, их невысокая стоимость и низкие затраты на техническое обслуживание. Турбоустановки имеют модульную компоновку, небольшие габариты и массу».

Такой профиль позволяет говорить фактически о модульной конструкции не паровой турбины, а в целом компоновки ПТУ, а простота конструкции собственно турбины позволяет адаптировать проточную часть под ее требуемые параметры, варьируя в том числе: мощностью, оборотами, параметрами пара на входе/отборах/выходе, количеством ступеней и клапанов парораспределения. В таблице 18.3 представлен пример параметров и показателей турбин серии D-R В.

Таблица 18.3 – Параметры и показатели паровых турбин серии D-R В
компании Siemens

№ пп.	Наименование параметра/показателя	Размерность	Значение
1	Диапазон мощности	МВт	0,5-12,0
2	Число оборотов турбины	об/мин	3000-9500
3	Температура на входе	°С	400-500
4	Давление на входе	бар	45-65
5	Противодавление	бар	6,9-13
6	Давление в конденсаторе	бар	0,05
7	КПД проточной части	%	72-82
8	Количество отборов/регулируемый	шт.	несколько/1
9	Количество клапанов парораспределения	шт.	4
10	Тип облопачивания	-	активные
11	Количество ступеней	шт.	5-8



Рисунок 18.3 – Малые паровые турбины серий DR компании Siemens

На рисунке 18.4 представлена 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины типа D-R В компании Siemens.

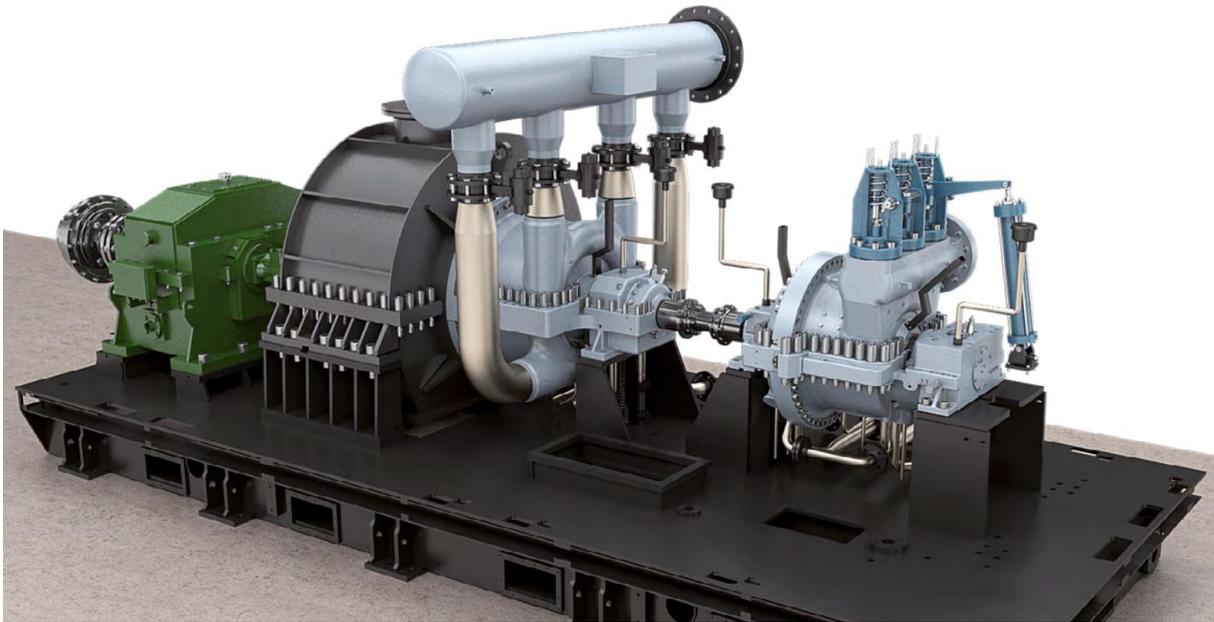


Рисунок 18.4 – 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины типа D-R В компании Siemens

При этом, необходимо отметить, что все-таки, учитывая необходимость ограничить номенклатурный ряд турбин и библиотеку модулей, а также сократить затраты на адаптацию к требованиям проекта и оптимизацию модулей под такие требования, технико-экономические показатели таких паровых турбин Siemens проигрывают аналогам, которые индивидуально разработаны и произведены конкурентами, которые, в свою очередь, по показателям надежности и эксплуатации уступают отработанным и серийно выпускаемым образцам компании Siemens.

Результаты некоторого укрупненного предварительного анализа оптимальности показателей (технико-экономические показатели, массогабаритные характеристики и оптимальность конструкции) одноцилиндровых паровых турбин с разными подходами к проектированию представлены на рисунке 18.5.

В рамках обзора собраны материалы по одноцилиндровым паровым турбинам разных производителей, использующих при разработке в разные периоды времени различные подходы к проектированию: «базовая платформа», модульный принцип и индивидуальное проектирование.

При анализе точечных случаев нельзя делать выводы о преимуществах подходов для конкретных конструкций паровых турбин определенной мощности и о выявленных закономерностях, однако с учетом опыта реализации различных проектов паровых турбин и вспомогательного оборудования турбоустановок авторы сделали следующие выводы:

- при реализации проектов паровых турбин с разработкой индивидуальных конструкций возможно добиться их максимальных технико-экономических показателей, самых высоких параметров и показателей конструкции оборудования, превышающих аналогичные показатели подобных образцов техники, разработанной с использованием унификации, модульных подходов и «базовой платформы» для модельного ряда. Однако достижение таких успехов обеспечивается при одновременном увеличении трудоемкости, длительности и себестоимости на КТПП и собственно производство такого оборудования, и самое важное: (!) снижается эффективность обслуживания ЖЦ, и, как следствие, значительно увеличивается стоимость ЖЦ, так как предприятие-разработчик и производитель не могут себе позволить удельно (!) затрачивать трудовые, материальные, временные и финансовые ресурсы на разработку и сопровождение документации на индивидуальные детали, сборочные

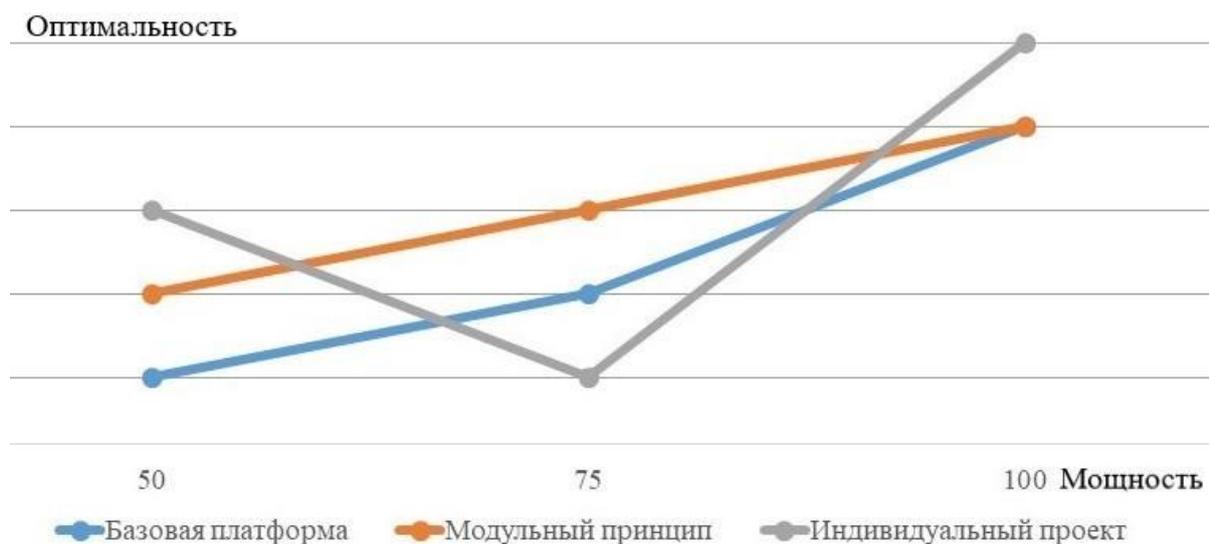


Рисунок 18.5 – Укрупненный анализ оптимальности одноцилиндровых паровых турбин разной мощности при различных подходах к проектированию

единицы, системы и оборудование в целом больше, чем такие ресурсы, выпускаемые серийно для унифицированных и модульных конструкций;

- при формировании отдельных модельных рядов и номенклатурного ряда предприятия в целом из индивидуальных проектов паротурбинного оборудования предприятию и его конструкторскому и технологическим подразделениям не удастся добиваться «самых высоких параметров и показателей конструкции оборудования, превышающих аналогичные показатели подобных образцов техники разработанной с использованием унификации, модульных подходов и «базовой платформы»», так как на индивидуальные проекты будут затрачиваться значительные вышеупомянутые ресурсы, причем не только на разработку и производство индивидуальных специальных проектов, но и на сопровождение ЖЦ на высоком уровне эффективности и оптимальности. Поэтому даже если в отдельных индивидуальных проектах не будет использоваться неоптимальная для проекта унификация и будут достигаться высокие показатели оборудования и его ЖЦ, то в диапазонах различных мощностей, параметров пара и разных назначений между такими проектами будут разработаны проекты их адаптации под другие задачи; при этом при неоптимально выстроенной классификации и построении номенклатурного ряда, то есть неправильно выбранных базовых моделей, «провалы» проектов адаптации будут все более значительны;

- при любом конструкторском подходе можно добиться максимальной эффективности ЖЦ оборудования и высоких средневзвешенных показателей оборудования всего номенклатурного ряда оборудования предприятия, то есть высоких показателей всех образцов возможно только при одновременном (!) «закладывании» всех конструктивных особенностей всех типов и модификаций оборудования исходя из конструктивной преемственности, которая позволяет добиться оптимальности составных частей оборудования;

- в случае если, учитывая выше обозначенные выводы, в одновременно проектируемом ряде будет использовано правильное разделение на составные части, то есть их автономность и преемственность, то, возможно, будет

следующими шагами и в следующих модификациях автономно выполнять задачи оптимизации этих составных частей и автономно заменять их на другие. Таким образом, именно модульный подход и в целом модульная концепция проектирования позволяет добиваться максимальной эффективности ЖЦ оборудования и его высоких показателей с возможностью их малозатратной оптимизации;

- модульный принцип проектирования, а точнее, использование модульной концепции создания и совершенствования номенклатурного ряда паровых турбин, в которую заложен «принцип LEGO» и единая библиотека стандартных модулей/подмодулей, позволяет добиться большей эффективности ЖЦ всего оборудования турбинного предприятия и более высоких средневзвешенных показателей оборудования, чем использование «базовой платформы», то есть преимущественно отдельных библиотек для каждой из платформ, создаваемых для серии, семейства с большей оптимизацией составных частей для данного ограниченного модельного ряда.

Такой вывод объясняется фактами, указывающими на создание оптимизированной «скорлупы» с ограниченными возможностями опционной замены частей и систем, что вполне доказывается ограниченностью затрат ресурсов на развитие опций и самой платформы, которые, как правило, развиваются дискретно по отдельному проекту, что является несколько схожим определением с индивидуальным проектированием за одним лишь исключением: проектируется «базовая платформа», то есть «серия», а не индивидуальный проект.

Такая «серия» со своими функциональными ограничениями библиотеки «базовой платформы» предлагается и продается Заказчику, который вынужден адаптировать проект к турбине, а не наоборот (!), что «позволительно» только Siemens, что до недавнего времени при достаточности размеров мировых рынков сбыта удавалось практиковать компании в модельном ряде промышленных паровых турбин взамен на предложения поставки с короткими сроками поставки и сравнительно высокими показателями при достаточно гибкой ценовой политике, но в ущерб

показателям проекта в целом. Такие проекты адаптации использования паровой турбины, профиль которой подбирается на основании библиотеки и схемы «базовой платформы» также касается блочно-модульных концепций. В таких случаях, например, в турбоустановке вынужденно используется редуктор, так как у поставщика в номенклатурном ряду нет собственного генератора на нужные обороты и характеристики, а на турбину с генератором другого производителя не предоставляются гарантийные обязательства, то есть поставка осуществляется только «пакетом», который не является оптимальным для проекта.

В соответствии с официальным сайтом компании Siemens [152] модельный ряд промышленных паровых турбин компании Siemens лежит в диапазоне мощностей от 0 до 250 МВт и используется в различных отраслях промышленности: химическая промышленность, пищевая промышленность, независимое производство электроэнергии, обрабатывающая промышленность и цементные заводы, нефтяная, газовая и нефтехимическая промышленность, нефтепереработка, шахты и металлургические заводы, сахарная и маслоэкстракционная промышленность, энергоснабжение и теплоснабжение, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность; и различных областях применения: электростанции, работающие на биомассе, промышленные электростанции, когенерация и районные отопительные котельные, расширение природного газа и ГРС, ГРП и геотермальные станции, утилизация тепловой энергии промышленных производств, механический привод, судоходство, мусоросжигающие заводы, солнечные электростанции.

На рисунке 18.6 представлен модельный ряд промышленных паровых турбин компании Siemens, который представлен 10 сериями, каждая из которых имеет собственную платформу и модульную конструкцию, позволяющие обеспечить индивидуальные требования проектов по назначению, принципиальной схеме, параметрам и технико-экономическим показателям.

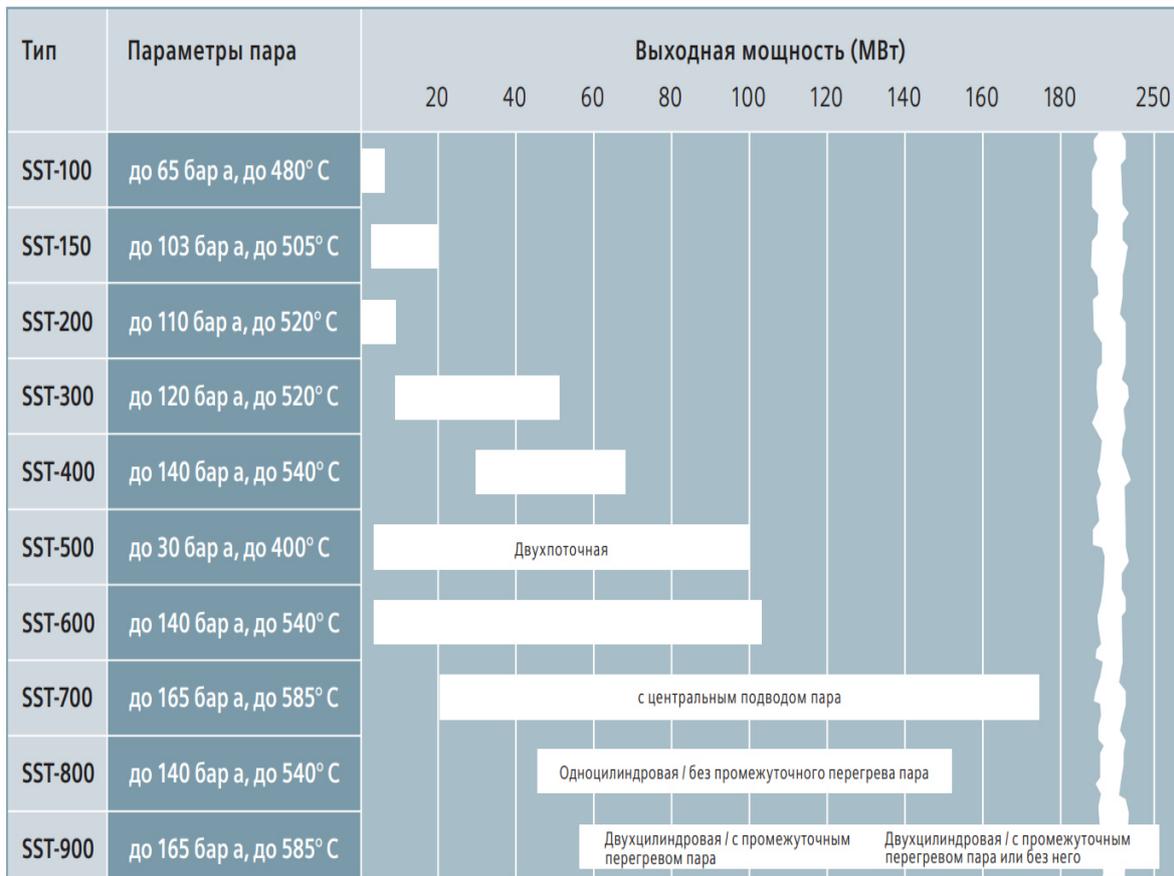


Рисунок 18.6 – Модельный ряд промышленных паровых турбин компании Siemens серий SST

На рисунке 18.7 показаны фотографии примеров промышленных паровых турбин серий SST компании Siemens.

Основные параметры промышленных паровых турбин серий SST компании Siemens приведены в таблице 18.4.

Например, серия SST-900 – серия самых больших паровых турбин данного модельного ряда, при этом обладает гибкостью, аналогичной другим сериям, и может поставляться в исполнении с противодавлением или конденсационная, обеспечивая обозначенные требования проекта в соответствии с назначением оборудования, схемой турбоустановки и параметрами.



SST-100 (до 8,5 МВт)



SST-150 (до 20 МВт)



SST-200 (до 10 МВт)



SST-300 (до 50 МВт)



SST-400 (до 65 МВт)



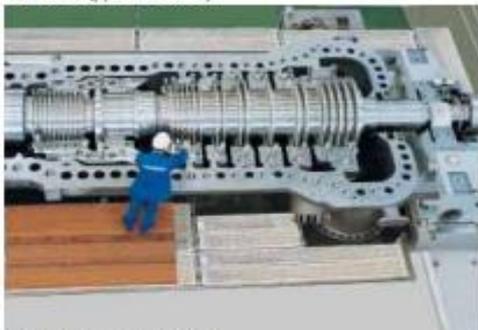
SST-500 (до 100 МВт)



SST-600 (до 100 МВт)



SST-700 (до 175 МВт)



SST-800 (до 150 МВт)



SST-900 (до 250 МВт)

Рисунок 18.7 – Промышленные паровые турбины серий SST компании Siemens

Таблица 18.4 – Основные параметры и назначение малых паровых турбин серии SST компании Siemens

Steam turbine type	SST-700/900	SST-800	SST-600	SST-500	SST-400	SST-300	SST-200
Output SPP MW	≤250	≤200	≤200	≤100	≤60	≤45	≤20
Frequency HZ	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
Inlet pressure bar/psi	180/2,611	165/2,393	165/2,393	30/435	140/2,030	140/2,030	120/1,740
Inlet temperature °C/°F	585/1,085	565/1,050	565/1,050	400/750	540/1,004	540/1,004	540/1,004
Reheat temperature °C/°F	565/1,050	565/1,050					
Rotational Speed rpm	3,000–3,600	3,000–3,600	3,000–18,000	15,000	3,000–8,000	12,000	14,600
Controlled extraction bar/psi	72/1,044	72/1,044	72/1,044 (up to 2)	none	45/653 (up to 4)	25/363 (up to 2)	1
Controlled extraction temperature °C/°F			480/895		450/842	400/752	350/562
Uncontrolled extraction bar/psi	up to 7	up to 7	85/1,233 (up to 6)	up to 2	60/870	60/870	up to 3
Exhaust Pressure (back) bar/psi		72/1,044	80/1,160		25/365	16/232	20/290
Exhaust Pressure (cond.) bar/psi	0.3/4.4	0.3/4.4	1.0/15	0.5/7.25	0.3/4.4	0.3/4.4	≥0.50/7.3
Exhaust Pressure (distr.) bar/psi		3/43	3/43	1.5/21.75		3.0/43.0	

Согласно [153]: «паровая турбина SST-900 является одной из самых компактных в своем сегменте электрической мощности. Для работы в конденсационном режиме она выполняется преимущественно с осевым выхлопом отработавшего пара в конденсатор. Чаще всего турбина SST-900 используется как комбинированный ЦСНД в двухцилиндровой компоновке турбоагрегата, например, для парогазовых установок с промежуточным перегревом пара. На рисунке 18.8, *а* представлен продольный разрез конденсационной турбины SST-900RH (Reheat – промежуточный перегрев) с дроссельным парораспределением, предназначенной для работы в режимах со скользящим начальным давлением пара. В турбине используются дисковая конструкция цельнокованого ротора, выделенный осевой подшипник двухстороннего действия и разгрузочный поршень. Существует исполнение турбин с сопловым парораспределением в регулирующей ступени, при этом корпус паровпускной части (рисунок 18.8, *б*) выполняется без горизонтального фланцевого разъема. За частью среднего давления имеется камера, в которую направляется пар из контура низкого давления котла-утилизатора ПГУ. Компенсацию теплового расширения корпуса обеспечивает гибкая передняя опора».

Турбина изготавливается из библиотечных проверенных стандартных компонентов (модулей), каждый из которых обеспечивает высокую надежность и эксплуатационную готовность. Комбинация стандартных

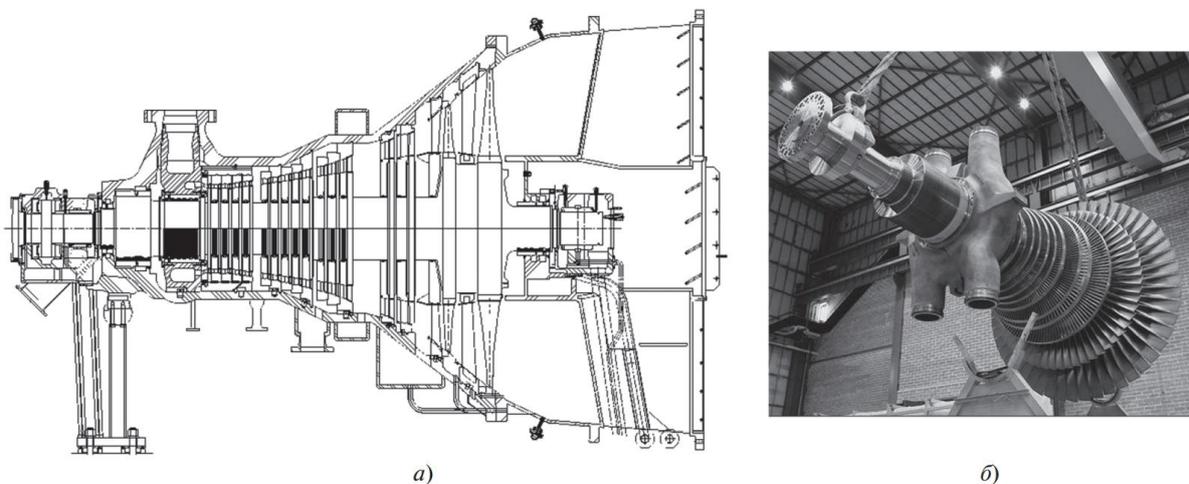


Рисунок 18.8 – Продольный разрез турбины серии SST-900 с дроссельным парораспределением (*а*) и внешний вид ротора для турбины с сопловым парораспределением (*б*)

модулей (рисунок 18.9), таких как паровпуск и выхлоп, позволяет получить очень значительный ряд универсальных турбин, охватывающих широкую область применения и широкий диапазон мощности.

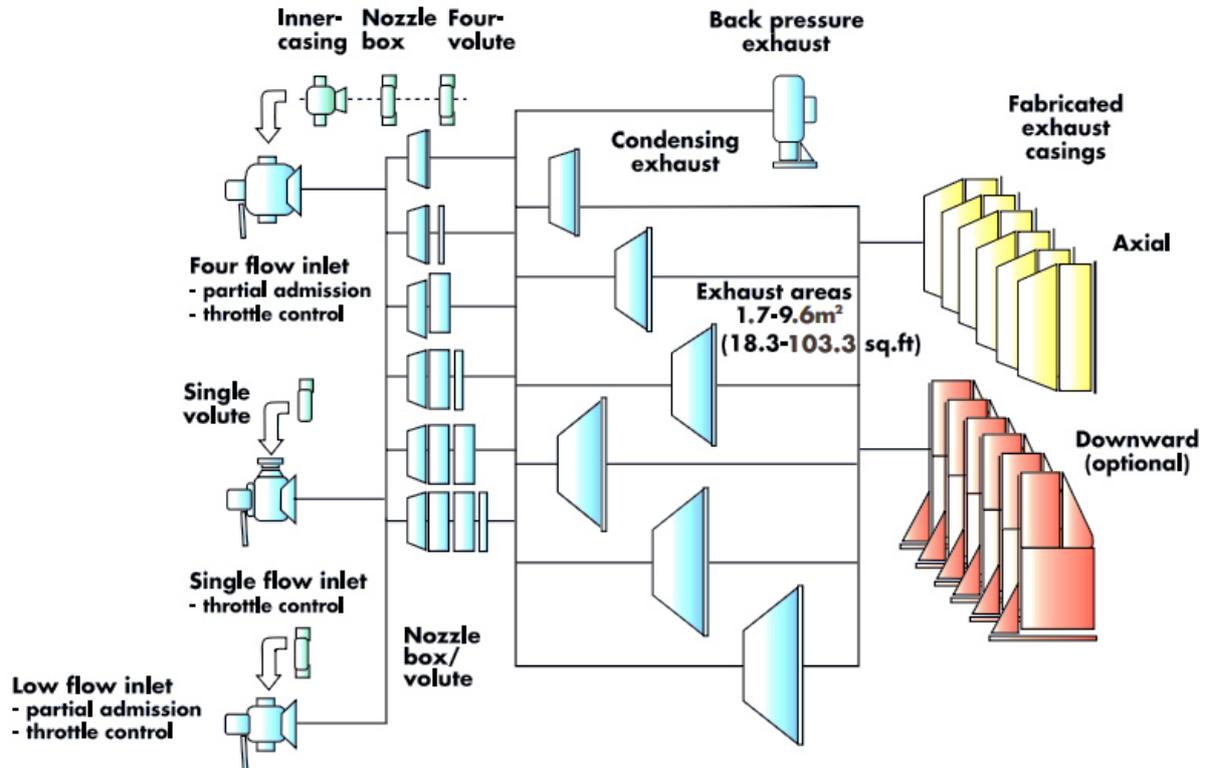


Рисунок 18.9 – Комбинирование стандартных библиотечных модулей при формировании профиля паровых турбин серии SST-900 компании Siemens

С учетом того, что компоненты турбины выбираются из ограниченного библиотечного набора модулей, то компоновка турбин каждой серии имеет типовые размеры, а в соответствии с конкретными требованиями каждого проекта при привязке турбина «подгоняется» строительными блоками, паропроводами паровпуска и отборов и т.д. Компания Siemens называет такую модульную концепцию высокомодульной системой из современных компонентов (модулей) с хорошо зарекомендовавшими себя референтными конструктивными особенностями. Разработка и оптимизация модулей, модульная КТПП основана на накопленном опыте проектирования, производства, эксплуатации и сервиса паровых турбин.

Как обозначено ранее, компания Siemens в том числе использует модульный подход для формирования не только профиля паровой турбины, но и для формирования профиля в целом ПТУ, для чего используется система проектирования и изготовления паровых турбин компании Siemens AG,

называемая «улучшенной платформой» (Enhanced Platform). Такой подход представлен в источнике [153]: «В основу этой системы заложен комплекс организационно-технологических мероприятий, позволяющих создавать из стандартных компонентов паротурбинные агрегаты различных типов электрической мощностью до 250 МВт. Особое внимание в процессе проектирования на основе Enhanced Platform уделяется показателям экономичности, надежности и маневренности турбоагрегатов, а также увеличению межремонтного периода и сокращению производственных затрат. Рассмотрены особенности конструкций паровых турбин SST-700 и SST-900. Турбина SST-700 применяется в ПТУ с противодавлением или как цилиндр высокого давления (ЦВД) при формировании компоновки двухцилиндровой конденсационной турбины с промежуточным перегревом пара. Показана конструкция одноцилиндровой турбины SST-700 с корпусом без горизонтального разъема, позволяющая повысить маневренность турбоагрегата. Турбина SST-900 может быть использована в качестве комбинированного цилиндра среднего и низкого давления (ЦСНД) в паротурбинных и парогазовых энергоблоках с промежуточным перегревом пара».

На рисунке 18.10 приведены варианты компоновки турбоагрегатов для ПСУ и ПГУ на основе комбинации турбин SST-700 и SST-900. Согласно [153]: «на рисунке 18.10, а показана схема компоновки турбоагрегата, ротор электрогенератора которого имеет двухстороннее присоединение к роторам паровых турбин. В этой схеме SST-700 играет роль ЦВД, ее ротор выполняется на повышенную частоту вращения и соединяется с ротором генератора через редуктор. Отработавший в турбине SST-700 пар направляется в котел для промежуточного перегрева, а далее – в турбину SST-900RH, которая в данной компоновке является ЦСНД. Ротор SST-900RH соединяется с ротором электрогенератора напрямую. Обе турбины имеют собственные осевые подшипники, а осевые смещения роторов контролируются датчиками, устанавливаемыми на соединительных муфтах. Валоповоротное устройство совмещено с редуктором и приводится в действие электродвигателем

переменного тока. Подшипники турбоагрегата, в том числе подшипники редуктора, оборудованы средствами мониторинга их теплового состояния.

На рисунке 18.10, б представлена схема компоновки турбоагрегата, в который входят две турбины, работающие совместно с ГТУ в ПГУ энергоблока. Здесь ротор электрогенератора воспринимает крутящие моменты от ГТУ (с одной стороны) и от паровых турбин SST-700 (ЦВД) и SST-900 (ЦСНД) (с другой стороны). Свежий пар в SST-700 направляется из контура высокого давления котла-утилизатора ПГУ, а в камеру смешения SST-900 – из контура низкого давления. Отработавший пар поступает в осевой конденсатор. Особенности практической реализации, представленной на рисунке 18.10, а, компоновки турбоагрегата рассмотрены на примере ПГУ-410, широко используемой в мировой теплоэнергетике. В России одной из таких ПГУ является парогазовый энергоблок Невинномысской ГРЭС, в его состав входят ГТУ SGT5-4000F и ПТУ мощностью 135 МВт с турбинами SST-700 ($n = 118.3 \text{ с}^{-1}$) и SST-900RH ($n = 50 \text{ с}^{-1}$). В данном энергоблоке применяется трехконтурный котел-утилизатор вертикального типа с промежуточным перегревом пара».

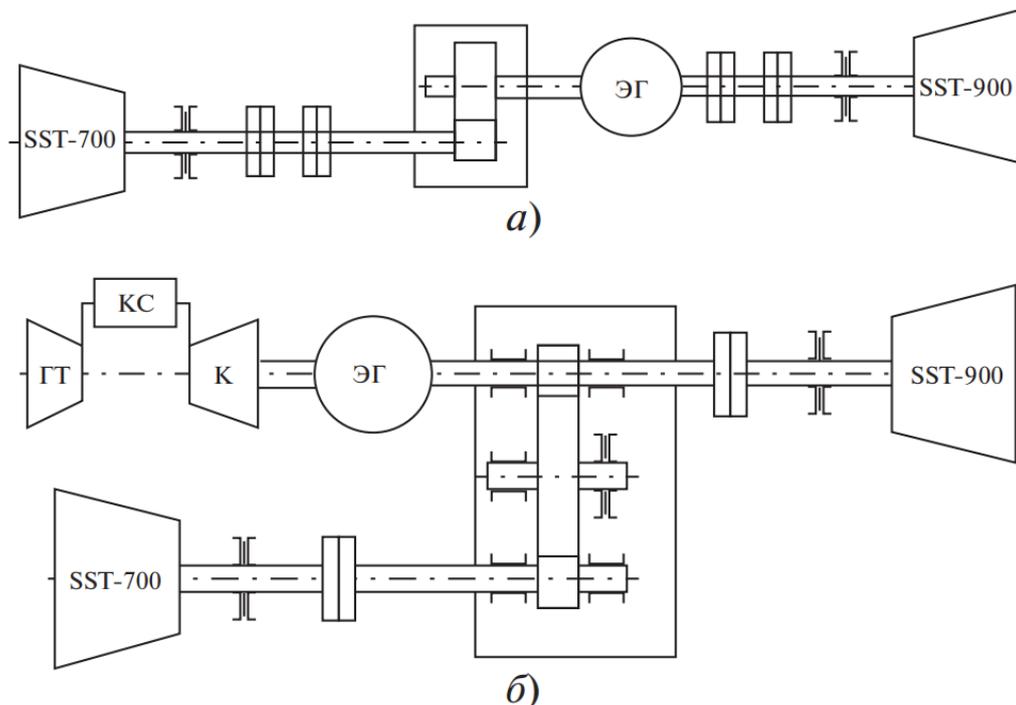


Рисунок 18.10 – Компоновка двухцилиндрового турбоагрегата на базе SST-700 + SST-900 (а) и ГТУ + SST-700 + SST-900 (б). ГТ – газовая турбина; КС – камера сгорания; К – компрессор

На рисунке 18.11 представлена 3Д-модель модульной ПСУ с «улучшенной платформой», используемой две паровые турбины модульной конструкции серий SST-700 и SST-900 компании Siemens.



Рисунок 18.11 – 3Д-модель модульной ПСУ с «улучшенной платформой»: используется две паровые турбины модульной конструкции серий SST-700 и SST-900 компании Siemens

Применительно опыта компании Siemens в России, то самый богатый опыт использования и эксплуатации турбин данного модельного ряда получен по самой распространенной в РФ паровой турбине серии SST-600 [154].

Турбина SST-600 (рисунок 18.12) – это согласно [154] «одноцилиндровая турбина мощностью до 100 МВт состоит из трех основных модулей – паровпускного (секции стопорного и регулирующих клапанов, сопловой камеры), промежуточного (наружный корпус с обоями, отсеки ЧВД с камерами отборов пара) и выхлопного (последний отсек турбинных ступеней с выхлопным патрубком). В зависимости от реализуемой мощности турбина выполняется с разными секциями выходного модуля, площадь рабочей решетки последней ступени которого выбирается от 0,175 до 3,5 м²».

Каждый из обозначенных крупных модулей турбинного профиля состоит из стандартных библиотечных проверенных стандартных компонентов (подмодулей).

На рисунке 18.13 представлен продольный разрез паровой турбины серии SST-700, на котором цветами выделены стандартные библиотечные подмодули.

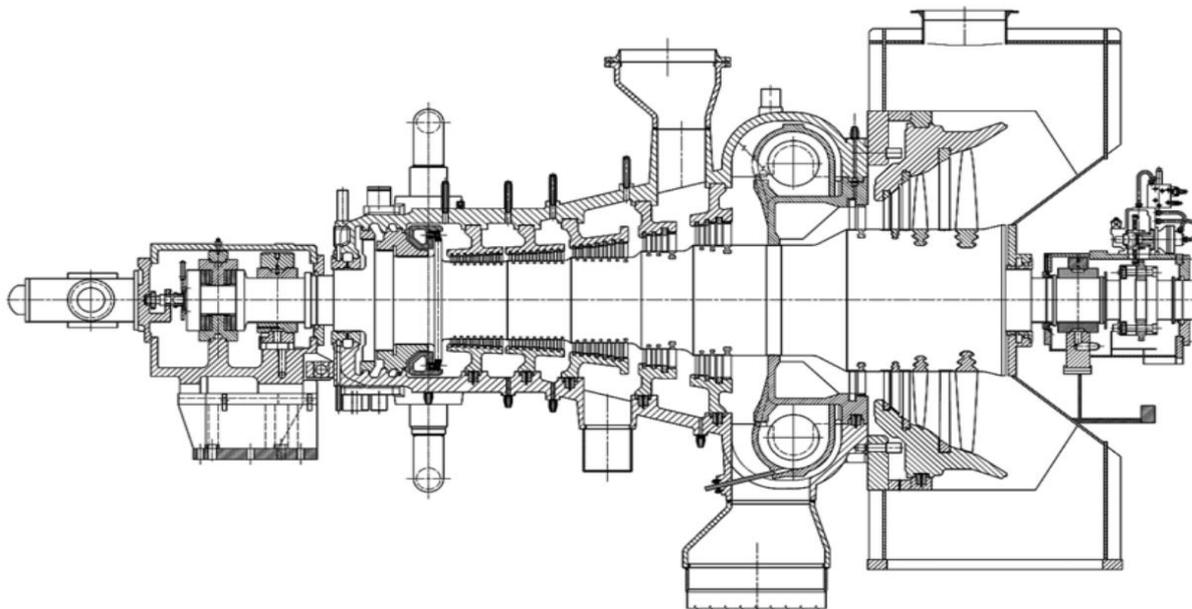


Рисунок 18.12 – Продольный разрез паровой турбины серии SST-600
компании Siemens

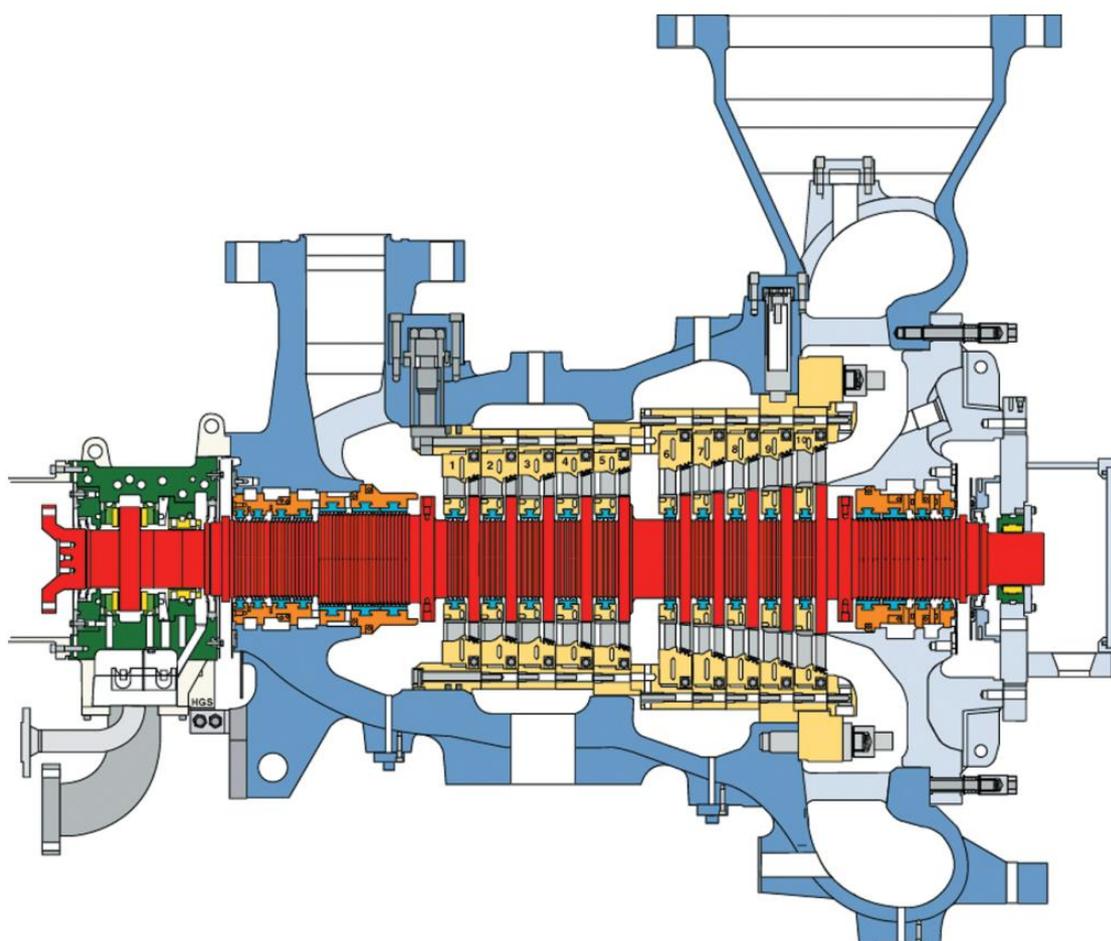


Рисунок 18.13 – Продольный разрез паровой турбины серии SST-700
компании Siemens: цветами выделены стандартные библиотечные

Аналогичная концепция модульного проектирования используется при разработке и производстве паровых турбин и ПТУ других серий.

Примеры комбинации стандартных модулей для паровых турбин серии SST-300 представлен на рисунке 18.14 и серии SST-400 компании Siemens – на рисунке 18.15.

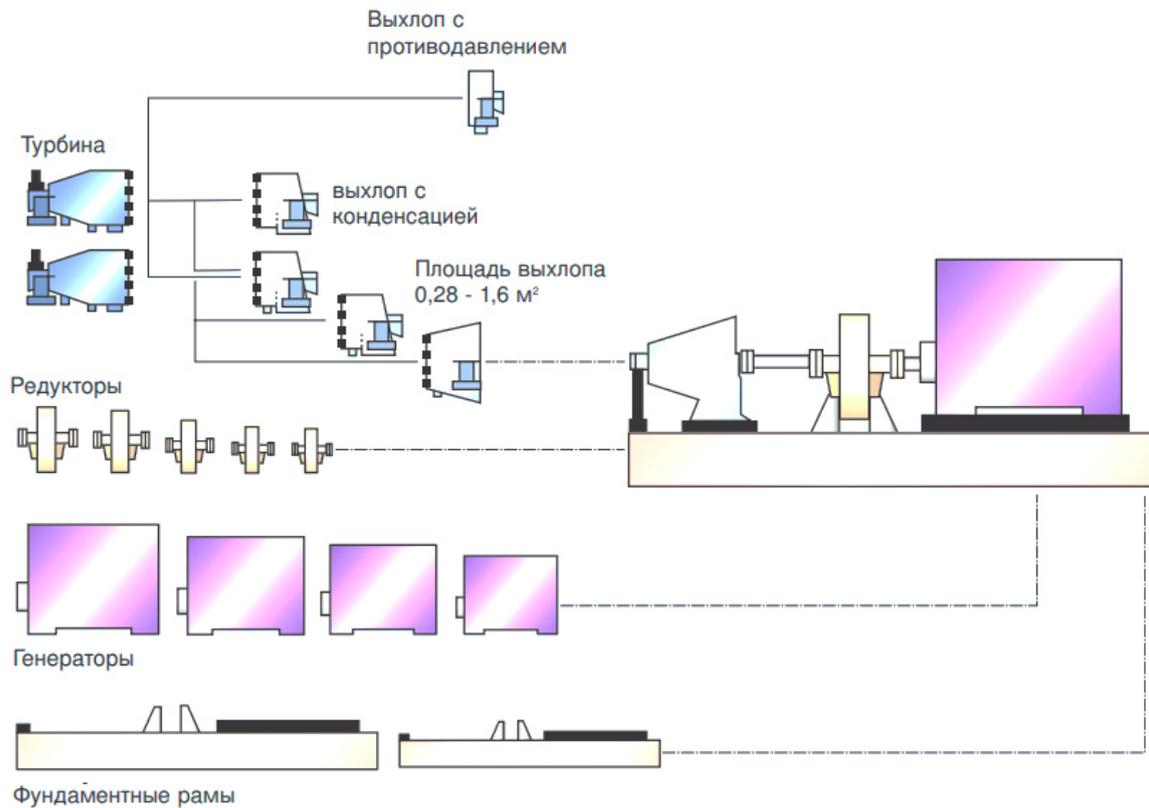


Рисунок 18.14 – Комбинирование стандартных библиотечных модулей при формировании профиля паровых турбин серии SST-300 компании Siemens

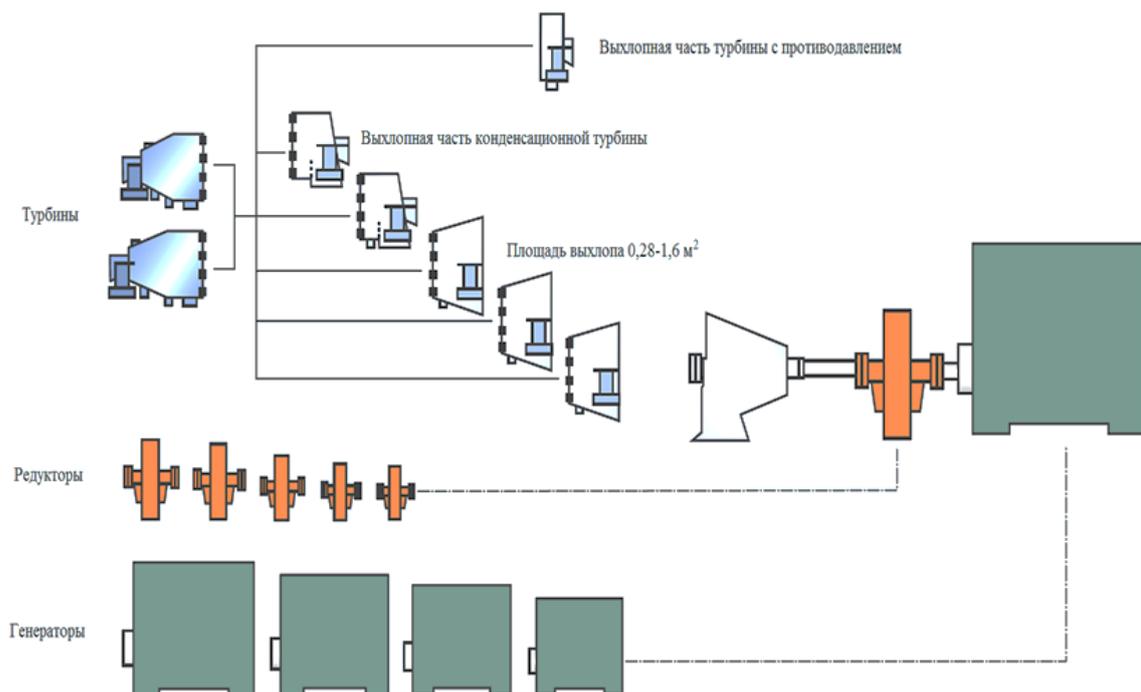


Рисунок 18.15 – Комбинирование стандартных библиотечных модулей при формировании профиля паровых турбин серии SST-400 компании Siemens

На рисунке 18.16 представлена 3Д-модель паровой турбины серии SST-800, на котором цветами выделены стандартные библиотечные модули.

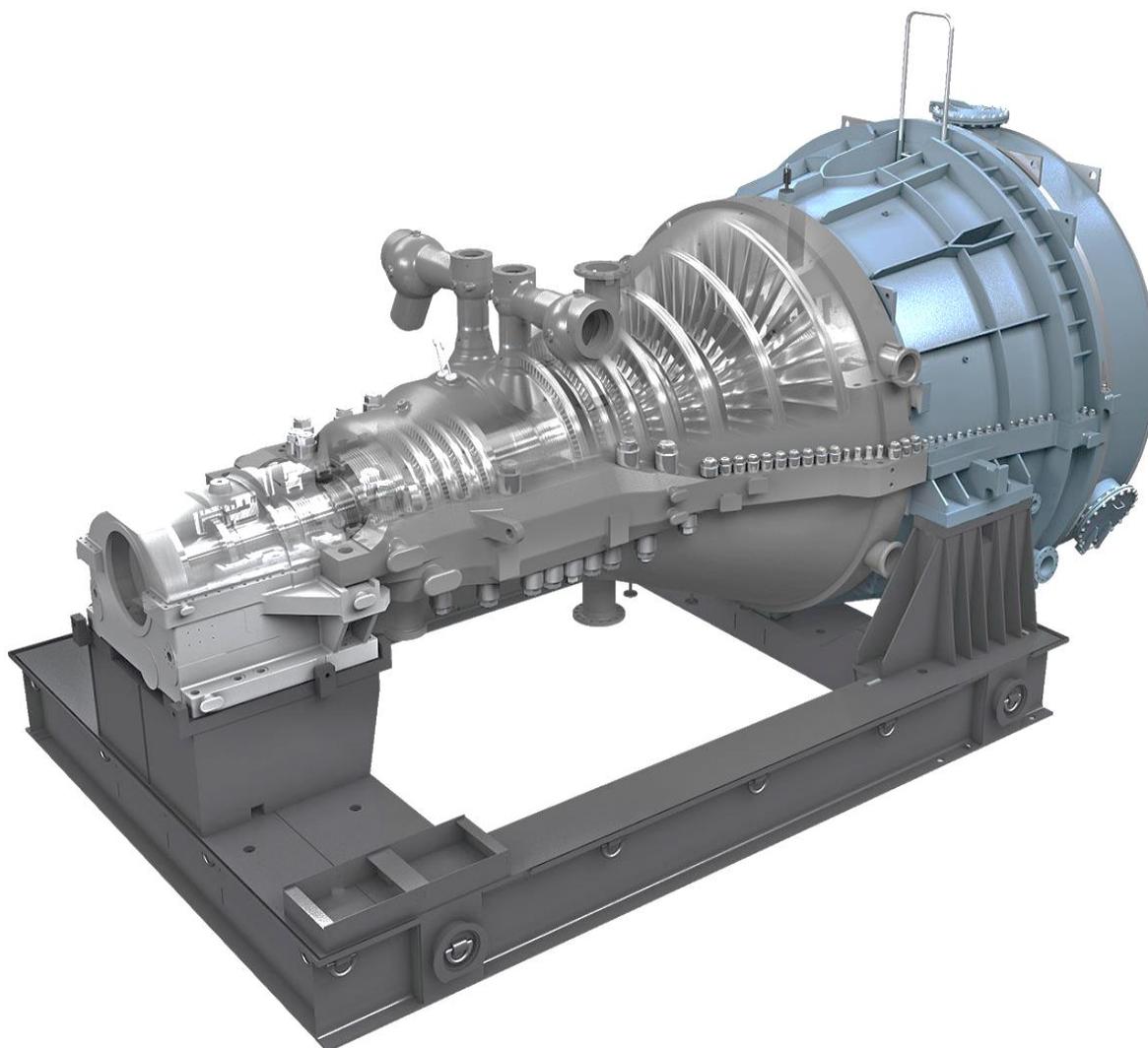


Рисунок 18.16 – 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины серии SST-800: цветами выделены стандартные библиотечные модули

Основные параметры энергетических паровых турбин серий SST-3000...9000 компании Siemens приведены в таблице 18.5.

При разработке турбин данных серий также использована концепция модульного проектирования, обеспечивает высокую гибкость к требованиям проектов и сокращение сроков производства и вывода нового типа серии на рынок.

Таблица 18.5 – Основные параметры крупных энергетических паровых турбин серии SST компании Siemens

Steam turbine type	Output SPP <i>MW</i>	Output CСPP <i>MW</i>	Net efficiency SPP %	Net efficiency CСPP %	Grid Frequency <i>Hz</i>	Inlet pressure <i>bar/psi</i>	Inlet temperature <i>°C/°F</i>	Reheat temperature <i>°C/°F</i>	Rotational Speed <i>rpm</i>
SST-9000	1,000–1,900				50/60	80/1,160	310/590		1,500–1,800
SST-6000	300–1,200		46,5 (Double reheat 48)		50/60	330/4,786	610/1,130	630/1,166	3,000–3,600
SST-5000	200–500	120–700	43 (subcritical) 46,4 (supercritical)	64	50/60	260/3,771 (SPP) 177/2,567 (CСPP)	600/1,112 (SPP) 600/1,112 (CСPP)	610/1,130 (SPP) 610/1,130 (CСPP)	3,000–3,600
SST-4000		100–500			50/60	105/1,523	600/1,112		3,000–3,600
SST-3000		90–275			50/60	177/2,567	600/1,112	610/1,130	3,000–3,600

Модельный ряд энергетических паровых турбин компании Siemens представлен 5-ю сериями, каждая из которых, аналогично другим модельным рядам компании, имеет собственную платформу и модульную конструкцию, позволяющие обеспечить индивидуальные требования проектов по назначению, принципиальной схеме, параметрам и технико-экономическим показателям.

Конструкция модульной платформы паровой турбины серии SST-9000 обеспечивает гибкость и позволяет обеспечить требования проектов в диапазоне мощности от 1000 до 1900 МВт при различных условиях эксплуатации.

На рисунке 18.17 представлена схема комбинирования стандартных библиотечных модулей при формировании профиля паровых турбин серии SST-9000 компании Siemens.

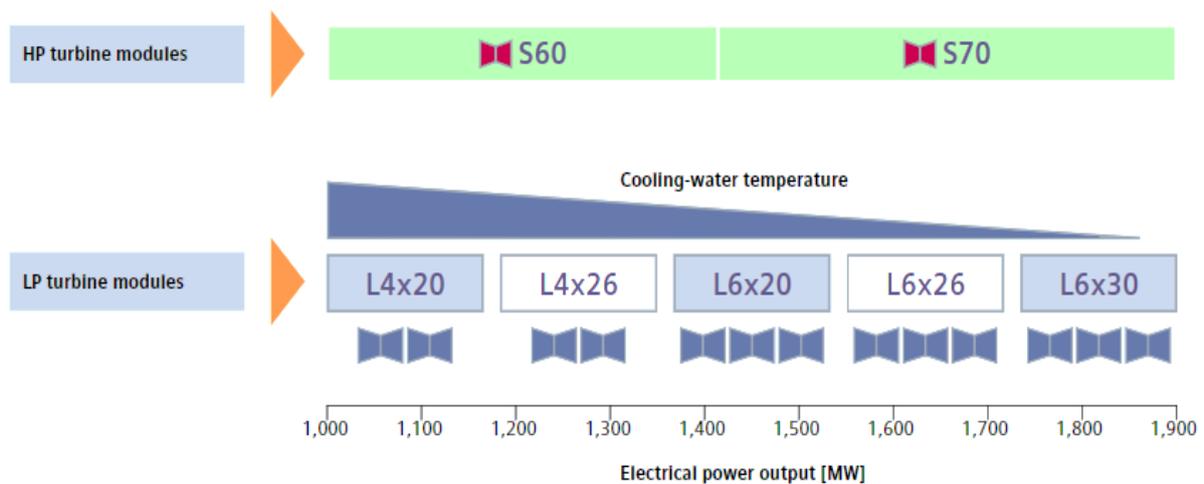


Рисунок 18.17 – Схема комбинирования стандартных библиотечных модулей при формировании профиля паровых турбин серии SST-9000 компании Siemens

На рисунке 18.18 представлен продольный разрез паровой турбины серии SST-9000, на котором цветами выделены стандартные библиотечные подмодули.

На рисунке 18.19 представлена 3Д-модель паровой турбины серии SST-9000, на котором цветами выделены стандартные библиотечные модули.

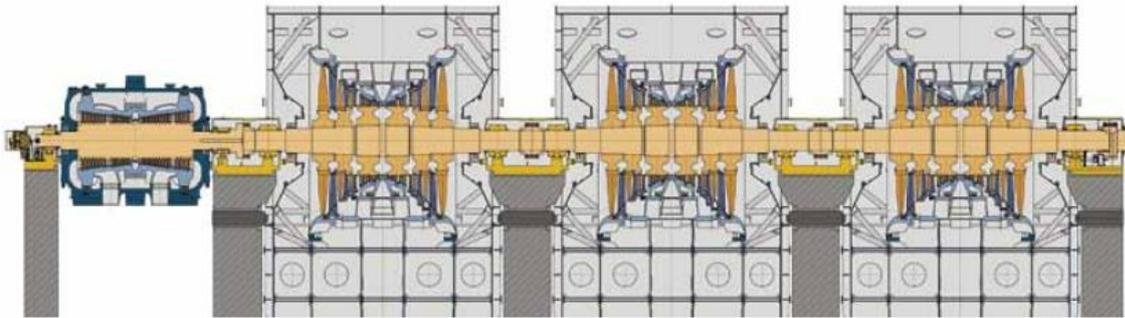


Рисунок 18.18 – Продольный разрез паровой турбины серии SST-9000 компании Siemens: цветами выделены стандартные библиотечные подмодули

Завершая обзор использования компанией Siemens концепции модульного проектирования, необходимо обозначить, что компания широко использует модульный подход к разработке и сопровождению ЖЦ своего оборудования и имеет без преувеличения самый богатый опыт формирования модульных конструкций оборудования, что, в том числе, связано с поглощением опыта разных школ турбостроения. Концепция распространяется на весь номенклатурный ряд, все модельные ряды паровых турбин. При этом важно отметить, что при формировании профиля паровых турбин и ПТУ просматривается четыре конструктивных уровня модульной идеологии, в то время как у других производителей просматривается три или

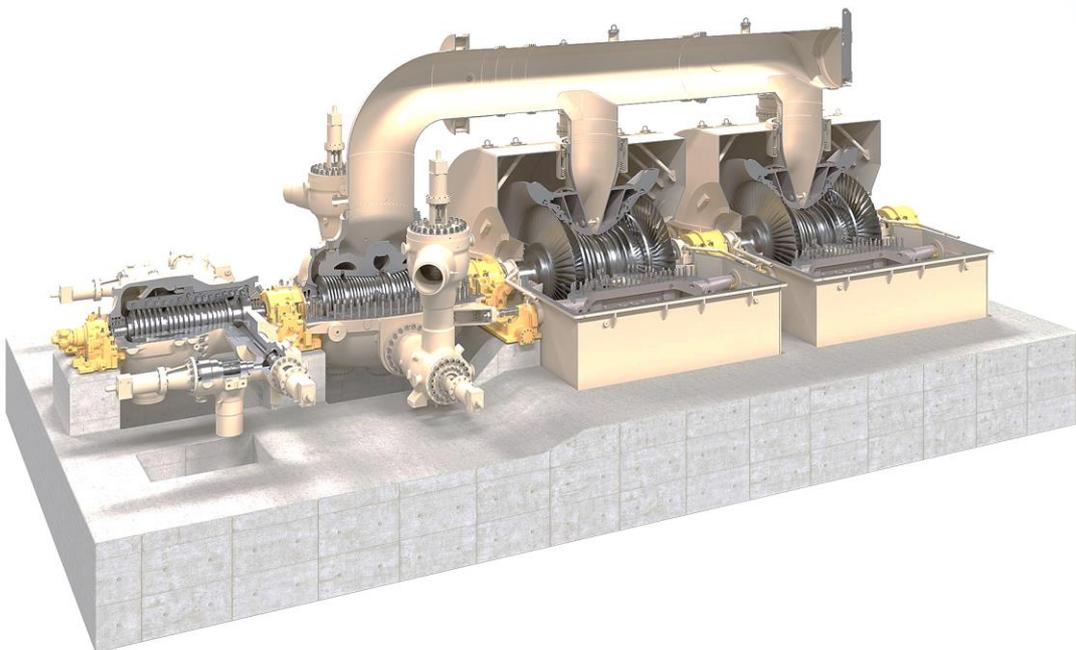


Рисунок 18.19 – 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины серии SST-9000 компании Siemens: цветами выделены стандартные библиотечные модули

максимум 3,5 уровня, что позволяет добиваться максимального эффекта от внедрения модульных конструкций, начиная от достигаемой доли унификации, заканчивая надежностью оборудования и сокращением сроков разработки, производства и сервисного обслуживания. Явно выраженным уровнем модульной концепции стало внедрение «улучшенной платформы», позволяющей создавать из стандартных компонентов паротурбинные агрегаты различных типов. Конечно, такой подход используется другими производителями, однако комбинирование новой паровой турбины или турбоагрегата требует значительных переделок по используемым составляющим имеющегося оборудования, что не позволяет положительно оценивать такую работу по формированию нового оборудования из стандартных библиотечных компонентов/турбин. В таблице 18.6 представлена структура уровней модульной концепции компании Siemens.

Таблица 18.6 – Структура уровней модульной концепции компании Siemens

Уровень	Наименование компонента	Входимость
1	Подмодуль	Модуль
2	Модуль	Турбина
3	Турбина	Составная турбина (улучшенная платформа)
4	Блок ПТУ	Турбина, турбоагрегат, ПТУ

Mitsubishi Power располагает широким номенклатурным рядом паровых турбин [155, 159], что позволяет гибко адаптировать каждую турбину в соответствии с потребностями проекта, сохраняя высокую эффективность и надежность оборудования. На рисунке 18.20 представлен номенклатурный ряд паровых турбин производства компании Mitsubishi Power, который разделен на четыре модельных ряда: паровые турбины для геотермальных станций, промышленные паровые турбины, паровые турбины для ТЭС, паровые турбины для АЭС.

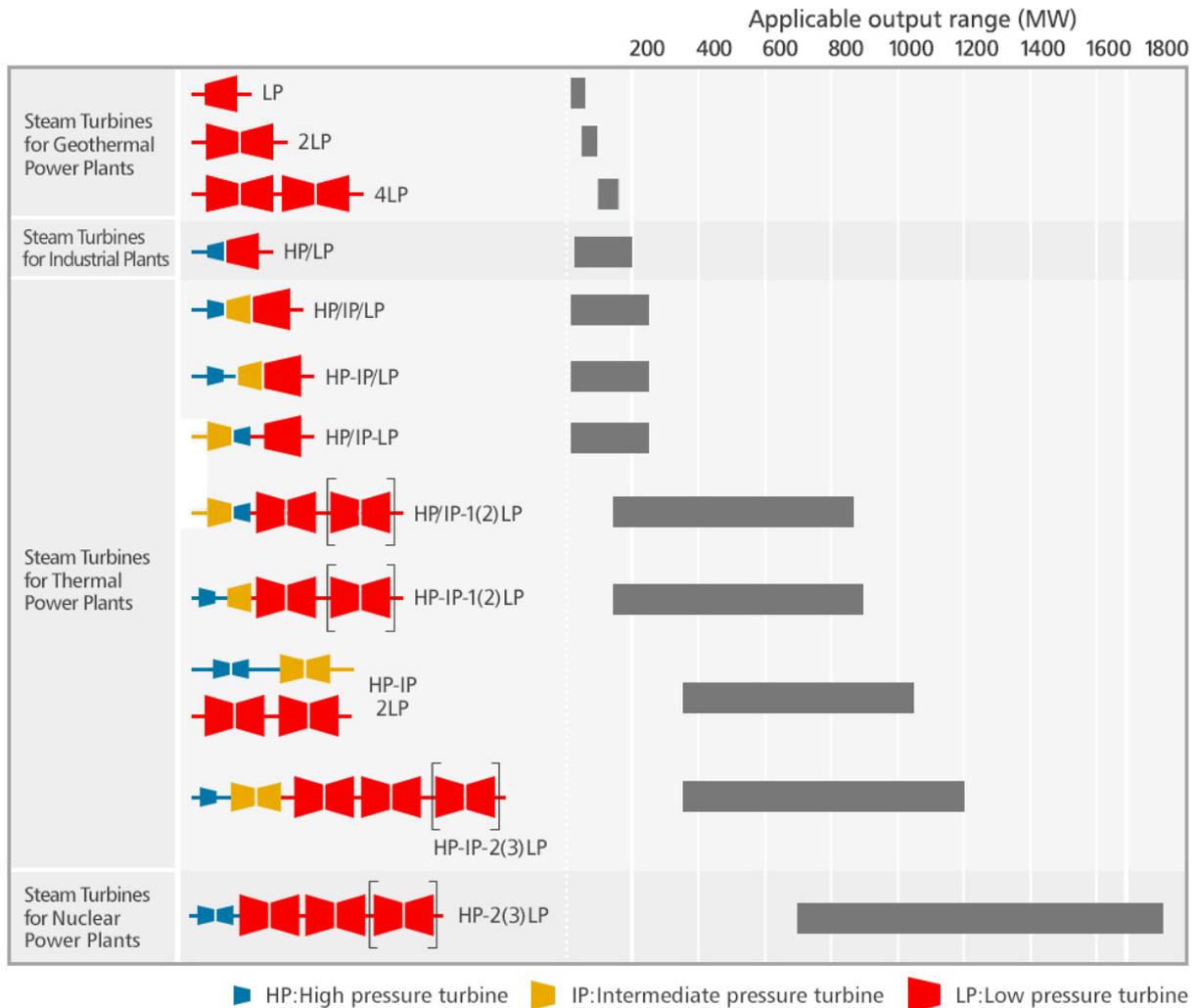


Рисунок 18.20 – Номенклатурный ряд паровых турбин производства компании Mitsubishi Power

Паровые турбины малой и средней мощности проектируются на основе концепции модульного проектирования (MD), в которой используются стандартизированные модули, такие как клапанные коробки и выхлопные патрубки части низкого давления. Эти стандартные модули выбираются в соответствии с требованиями проекта и объединяются для формирования конструкции турбины в по потребностям заказчика.

На рисунке 18.21 представлен продольный разрез паровой промышленной турбины Mitsubishi Power модульного дизайна с разбивкой на модули: 1. Регулирующий клапан; 2. Регулирующий клапан отбора пара; 3. Выхлопной патрубков; 4. Валоповоротное устройство; 5. Патрубков отбора пара; 6. Блок переднего подшипника; 7. Сервомотор; 8. Упорный подшипник; 9. Опорный подшипник; 10. Камин переднего уплотнения высокого давления; 11. Муфта соединения турбина-генератор.

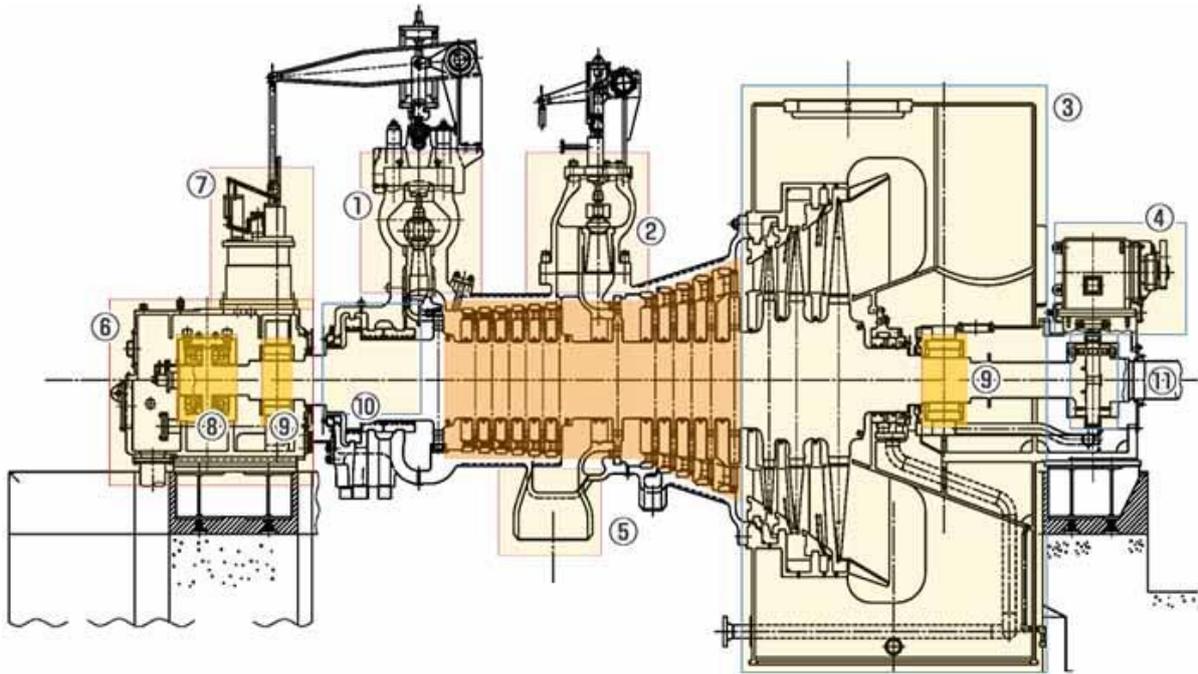


Рисунок 18.21 – Продольный разрез паровой промышленной турбины модульного дизайна с разбивкой на модули

Компания Mitsubishi Power – одна из немногих мировых производителей паротурбинного оборудования особое внимание уделяет повышению параметров парового цикла, развивая направление высокоэффективных угольных тепловых электростанций. На сегодняшний день компания как передовая среди мировых производителей в данном направлении уже поставила несколько паротурбинных установок, работающих на ультра супер сверхкритических параметрах при температурах свежего пара 600 °С и промежуточного перегрева пара 620 °С. В настоящее время они стремятся к следующему технологическому прорыву, разрабатывая паровые турбины следующего поколения для работы при сверхкритических параметрах пара: 700 °С и давлении до 35 МПа.

На рисунке 18.22 показано развитие паротурбинного оборудования компании Mitsubishi Power, связанное с повышением параметров пара и развитием принципиальных тепловых схем, в том числе с введением двойного промежуточного перегрева пара.

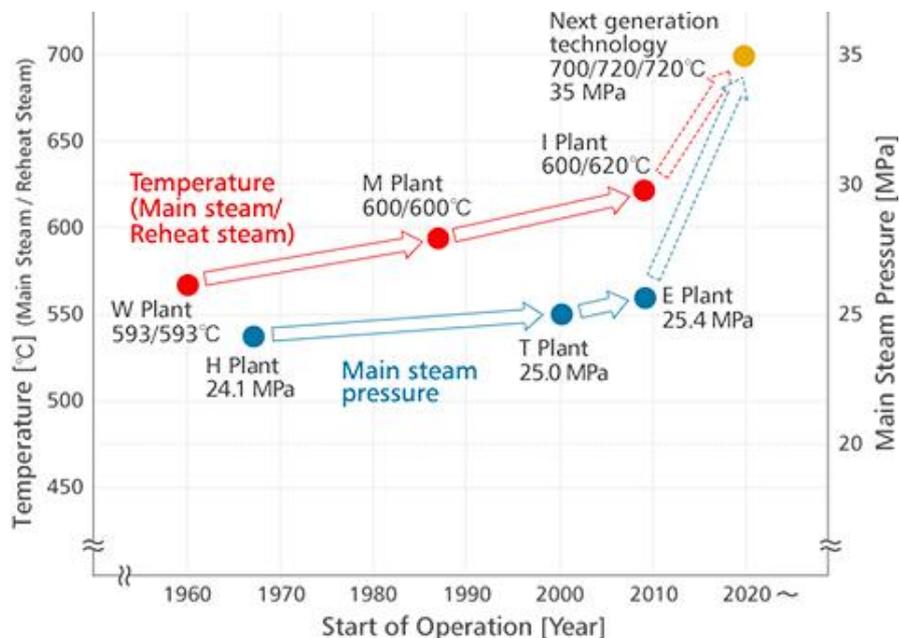


Рисунок 18.22 – Эволюция паротурбинного оборудования компании Mitsubishi Power, связанная с повышением параметров пара и развитием принципиальных тепловых схем

На рисунке 18.23 представлена 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины компании Mitsubishi Power из серии, используемой в диапазоне мощностей от 150 до 900 МВт.

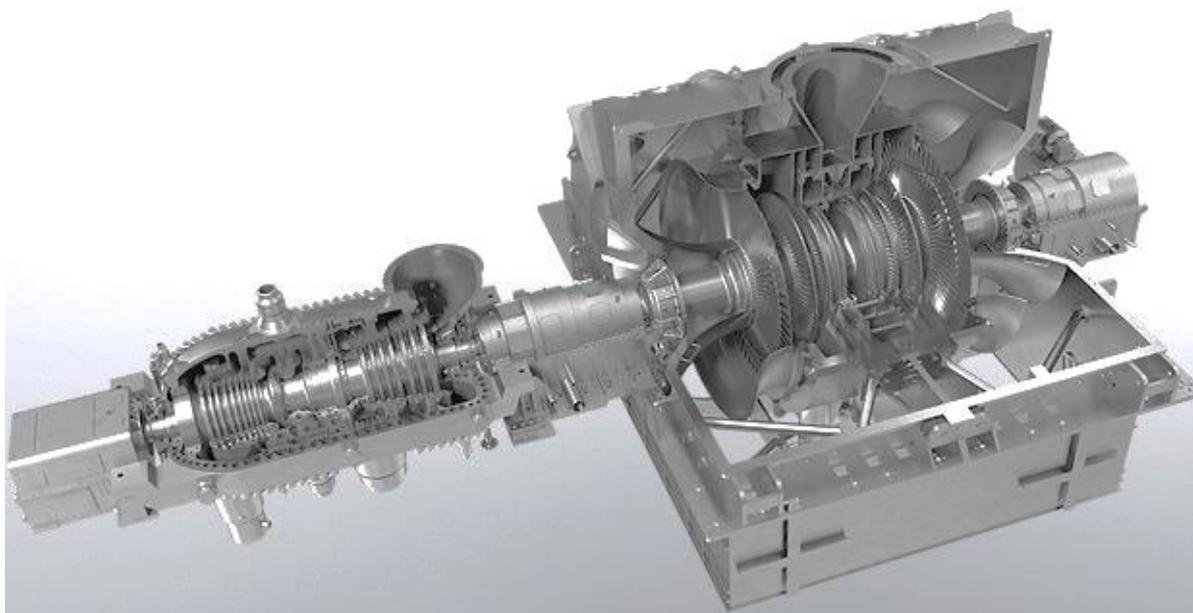


Рисунок 18.23 – 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины компании Mitsubishi Power серии, используемой в диапазоне мощностей от 150 до 900 МВт

Паровые турбины производства Ansaldo Energia имеют модульную конструкцию и, как следует из материалов сайта компании, [156, 159]: «...основаны на модульной концепции для снижения технических рисков и

времени изготовления, а также обеспечения высокой надежности. Каждая модель представляет собой комбинацию проверенных модулей, предварительно изготовленных в различных размерах, чтобы обеспечить широкий диапазон мощностей и областей применения. Доступны различные варианты материалов для соответствия различным условиям пара вплоть до самых передовых сверхкритических (600/620 °C)».

На рисунке 18.24 представлен номенклатурный ряд паровых турбин производства компании Ansaldo Energia, который разделен на три модельных ряда: паровые турбины для геотермальных станций, паровые турбины с промежуточным перегревом пара и без промежуточного перегрева пара различного назначения для ТЭС и АЭС.

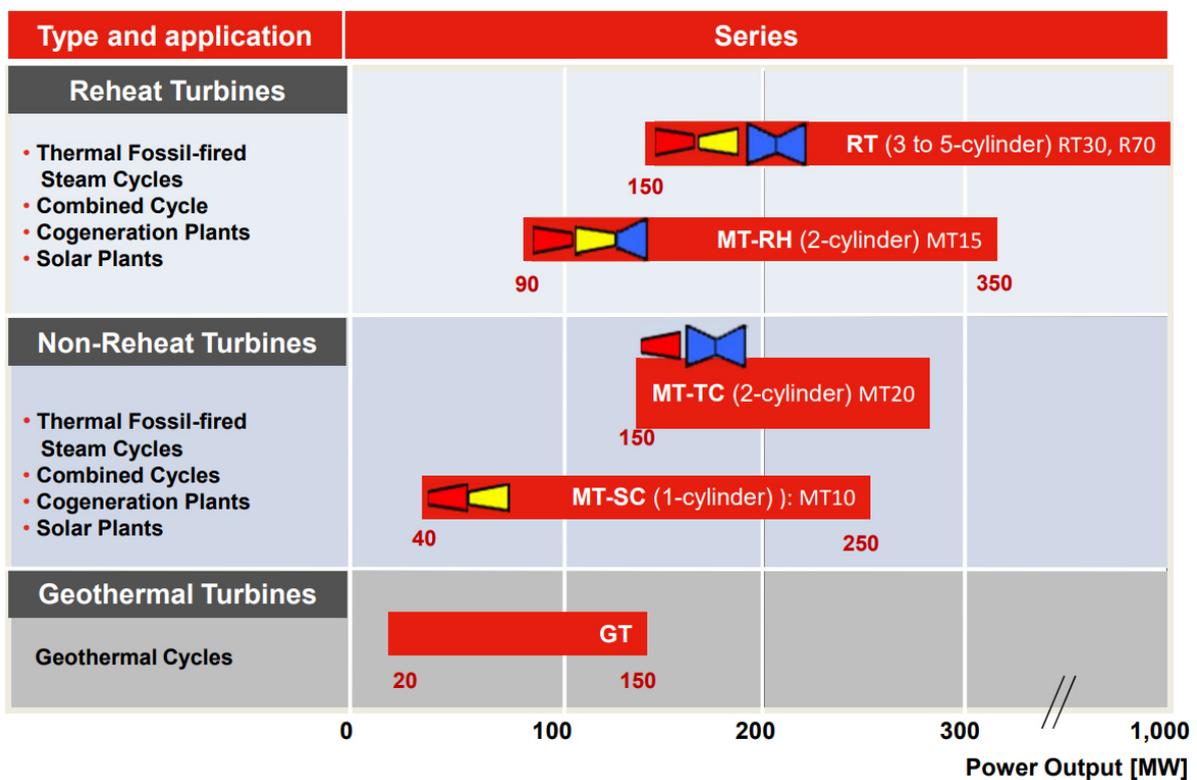


Рисунок 18.24 – Номенклатурный ряд паровых турбин производства компании Ansaldo Energia

В соответствии с конструкторской идеологией компании Ansaldo Energia каждый модельный ряд содержит модели, например, RT 30, R 70, MT 10, MT 15, MT 20, GT 60, каждая из которых содержит конфигурации, комбинированные с использованием стандартных отработанных модулей.

На рисунке 18.25 представлены продольные разрезы нескольких моделей паровых турбин с промежуточным перегревом пара компании Ansaldo Energia.

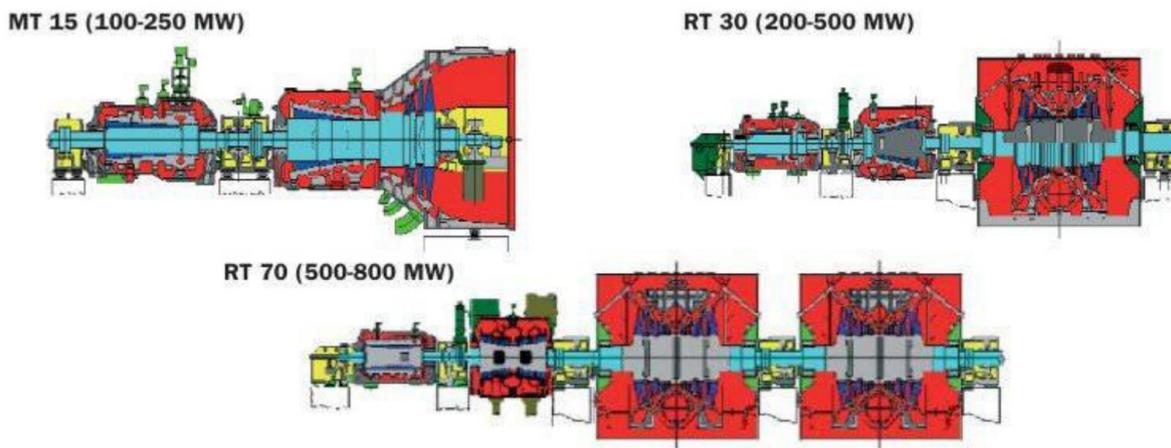


Рисунок 18.25 – Продольные разрезы паровых турбин модельного ряда с промежуточным перегревом пара моделей МТ 15, RT 30, RT 70 компании Ansaldo Energia: цветами выделены стандартные библиотечные подмодули

На рисунке 18.26 представлена 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины компании Ansaldo Energia модели типа RT 30, используемой в диапазоне мощностей от 200 до 500 МВт.

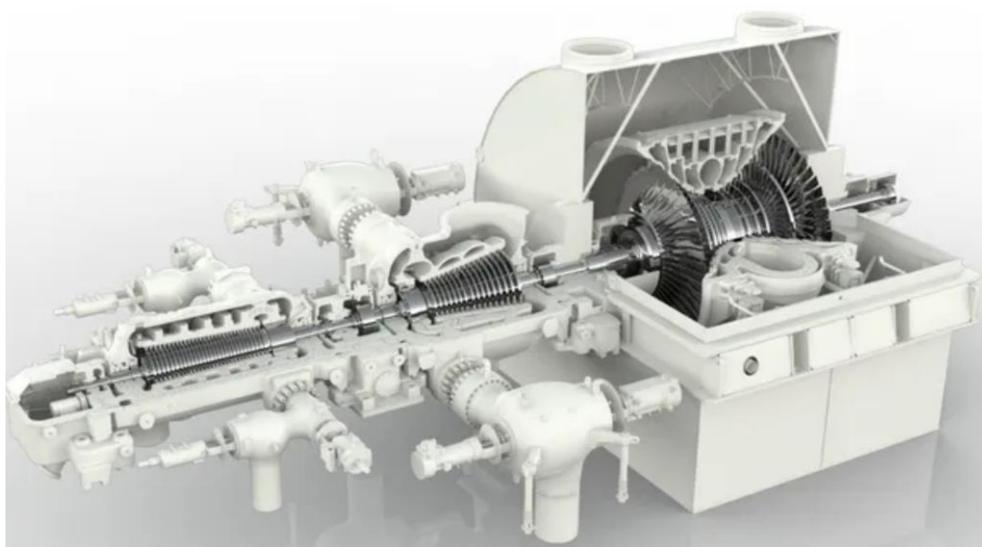


Рисунок 18.26 – 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины компании Ansaldo Energia модели типа RT 30, используемой в диапазоне мощностей от 200 до 500 МВт

Номенклатурный ряд паровых турбин компании Doosan Skoda Power [157, 159] совмещает использование модульной конструкции, используемые решения, базируемые на модульном дизайне турбин серий (ранее серий MTD 10...MTD 80), и индивидуальные проекты паровых турбин. Такая синергия модульной концепции с индивидуальными проектами позволяет эффективно обеспечить индивидуальные требования проектов в диапазоне мощности

с 3 до 1500 МВт, с температурами свежего пара от 230 до 621 °С и давлением свежего пара от 30 до 300 бар. При этом турбины используются для привода генераторов, насосов, компрессоров.

На рисунке 18.27 представлен номенклатурный ряд промышленных паровых турбин производства компании Doosan Skoda Power мощностью до 80 МВт с различными схемными решениями, оборотами и назначением.

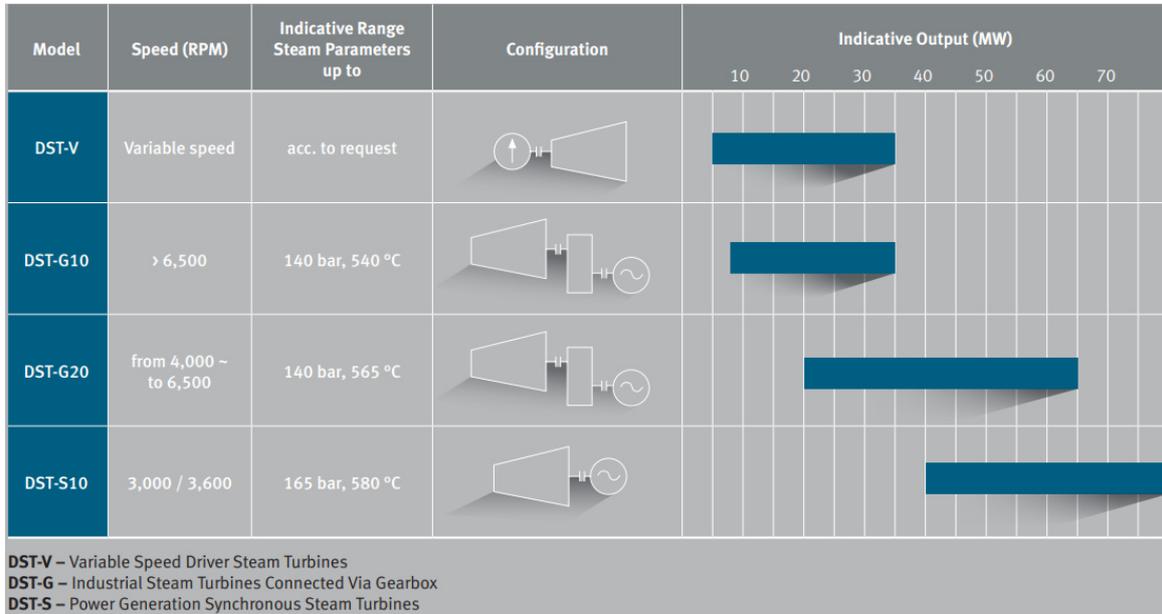


Рисунок 18.27 – Номенклатурный ряд промышленных паровых турбин производства компании Doosan Skoda Power

На рисунке 18.28 представлен номенклатурный ряд средних и крупных паровых турбин производства компании Doosan Skoda Power мощностью до 1500 МВт с различными схемными решениями, оборотами и назначением.

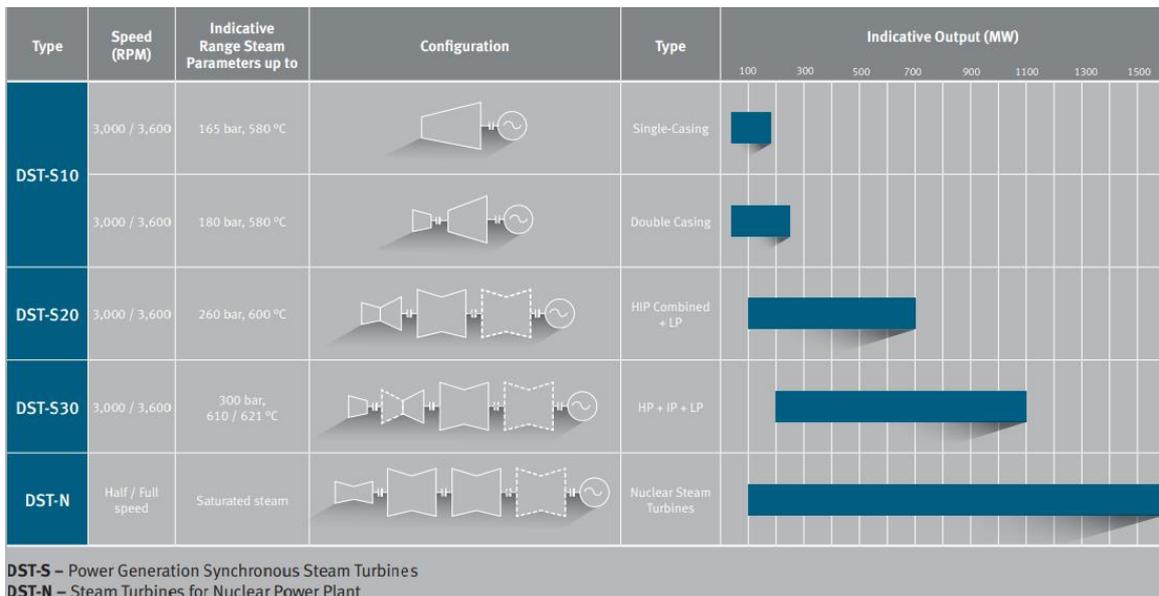


Рисунок 18.28 – Номенклатурный ряд средних и крупных паровых турбин производства компании Doosan Skoda Power мощностью до 1500 МВт

На рисунке 18.29 представлена 3Д-модель паровой турбины модели DST-S10 компании Doosan Skoda Power.

Компания MAN Energy Solutions также использует концепцию модульного проектирования и компоновки паровых турбин, номенклатурный ряд которых охватывает турбогенераторные установки мощностью до 180 МВт. Оборудование применяется для широкого спектра назначений: электроэнергетика, включая использование в цикле ПГУ и теплофикацию, био- и мусоросжигание, в схемах с солнечной энергетикой, а также рекуперацию отработанного тепла. Концепция модульной конструкции включает в себя стандартизированные модули: секции подвода, выхлопов, отборов/подводов, корпуса подшипников, регулирующих ступеней и т.д. Из стандартных модулей формируется и профиль турбоагрегата: паровая турбина, редуктор, генератор, система маслоснабжения смазки, система маслоснабжения регулирования. Такой модульный подход позволяет значительно сокращать длительность разработки и производства до окончательной заводской готовности при обеспечении высоких технико-экономических и эксплуатационных показателей паровых турбин и турбоустановок.

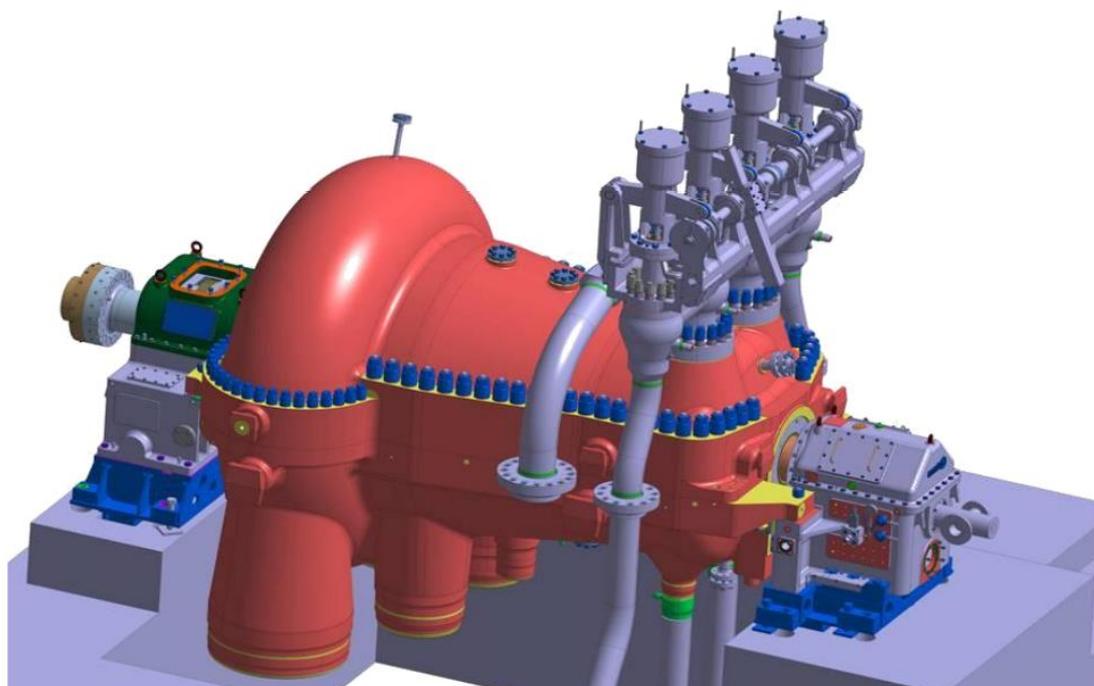


Рисунок 18.29 – 3Д-модель модульной конструкции паровой турбины модели DST-S10 производства компании Doosan Skoda Power: цветами выделены стандартные библиотечные модули

Номенклатурный ряд паровых турбин компании разделен на четыре платформы [158, 159]. Самой распространенной платформой компании является платформа промышленных паровых турбин типа MST (MAN Steam Turbine), которые могут использоваться как для выработки электроэнергии, так и для механических приводов и обеспечивают диапазон мощности от 1 до 180 МВт.

Основные параметры промышленных паровых турбин платформы типа MST компании MAN Energy Solutions приведены в таблице 18.7.

Таблица 18.7 – Основные параметры промышленных паровых турбин платформы типа MST компании MAN Energy Solutions

Type	Power Range	Max. steam inlet
MST010	0.5-1.5 MW	45 bar (652 psi) 450 °C (842 °F)
MST020	1-5 MW	130 bar (1,885 psi) 530 °C (986 °F)
MST040	3-15 MW	140 bar (2,031 psi) 540 °C (1004 °F)
MST050	5-30 MW	140 bar (2,031 psi) 540 °C (1004 °F)
MST060	15-55 MW	140 bar (2,031 psi) 540 °C (1004 °F)
MST080	25-75 MW	140 bar (2,031 psi) 540 °C (1004 °F)
MST100	40-140 MW	140 bar (2,031 psi) 540 °C (1004 °F)
MST120	70-180 MW	140 bar (2,031 psi) 540 °C (1004 °F)

Комбинации стандартных модулей для паровых турбин платформы типа MST компании MAN Energy Solutions приведены на рисунке 18.30.

На рисунке 18.31 представлены продольные разрезы нескольких типов паровых турбин, разработанных по концепции модульной компоновки MARC (Modular ARrangement Concept) компании MAN Energy Solutions.

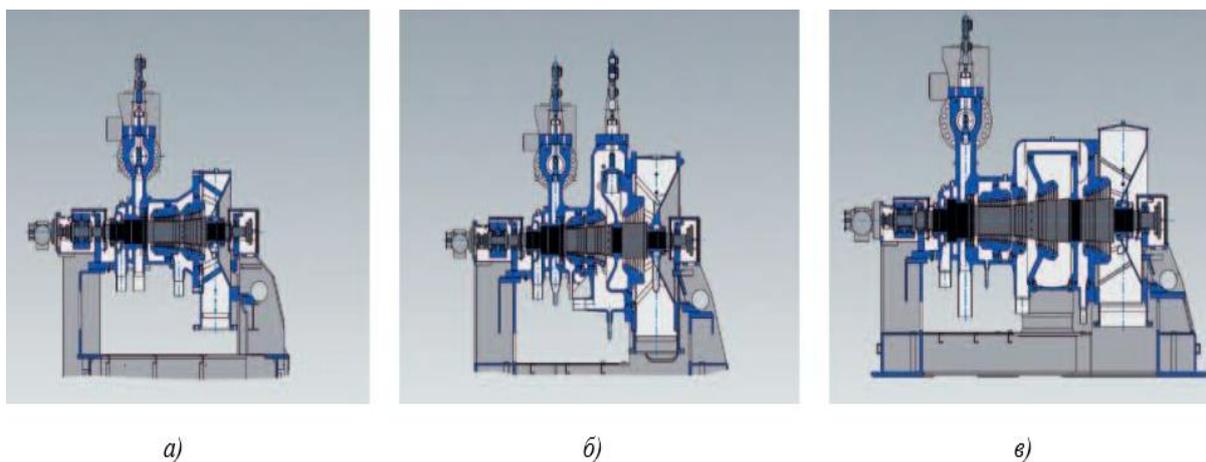


Рисунок 18.31 – Продольные разрезы паровых турбин, разработанных по концепции модульной компоновки MARC компании MAN Energy Solutions: а) противодавленческая типа Р (Type В); б) конденсационная типа К (Type С); в) теплофикационная типа Т (Type Н)

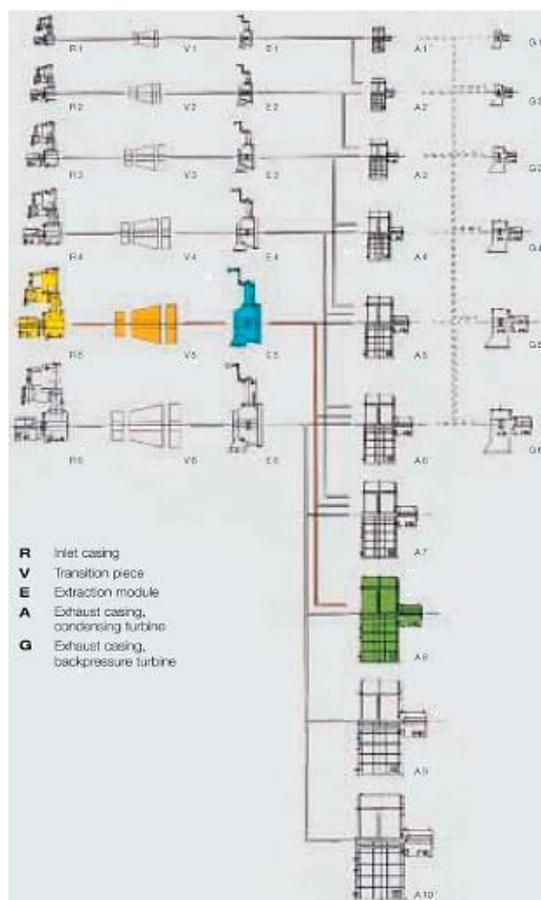


Рисунок 18.30 – Комбинирование стандартных библиотечных модулей при формировании профиля паровых турбин платформы типа MST компании MAN Energy Solutions

На рисунке 18.32 представлена 3Д-модель паровой турбины модульной компоновки MARC компании MAN Energy Solutions.

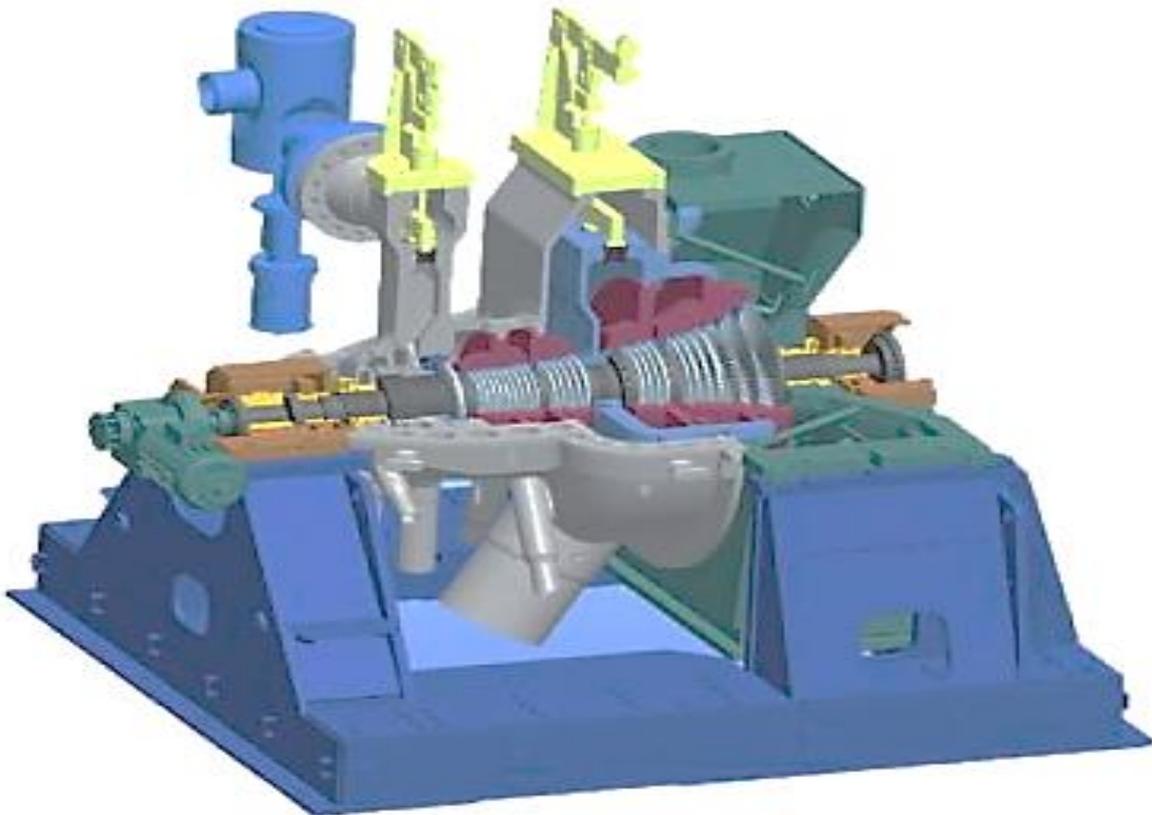


Рисунок 18.32 – 3Д-модель паровой турбины модульной компоновки MARC компании MAN Energy Solutions: цветами выделены стандартные библиотечные модули

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145.
2. Jarrett J.P., Dawes W.N., Clarkson P.J. Accelerating Turbomachinery Design, Proceedings of ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands.
3. Петреня Ю.К. По законам экономики и физики. Стимул. Онлайн – журнал об инновациях, 2018, https://stimul.online/articles/interview/po-zakonom-ekonomiki-i-fiziki/?sphrase_id=3051.
4. Петреня Ю.К. Развитие газотурбинных энергетических технологий в России // Вестник Российской Академии Наук. – 2019. – № 4.
5. Петреня Ю.К. О программе разработки российских газотурбинных энерготехнологий / Научное обеспечение реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации. Научная сессия общего собрания РАН 13-14 ноября 2018 г. // под ред. Бондура В.Г, Макоско А.А. Том 1. – 2019.
6. Петреня Ю.К., Фаворский О.Н., Длугосельский В.И., Гольдштейн А.Д., Комисарчик Т.Н. Состояние и перспективы развития парогазовых установок в энергетике России // Труды ЦКТИ. – 2002. № 285. – с. 21-33.
7. Липец А.У., Фаворский О.Н., Петреня Ю.К., Длугосельский В.И. Газотурбинная надстройка с паротурбинным блоком повышенной эффективности тепловой электростанции // Патент РФ на изобретение № 2. – № 269 009. – опубликован 27.01.2006 г., БИ № 1.
8. Петреня Ю.К., Иванов С.А., Лисянский А.С. Метод проектирования для конкуренции DfC (Design for Competition)// Научно-практическая конференция «Энергетика, экология, энергосбережение» к 25-летию образования НПВП «Турбоконт». Тезисы докладов. Калуга, 2016. – с. 159.
9. Петреня Ю.К., Глухов В.В., Шилин П.С. Развитие энергомашиностроения на базе инновационной деятельности высокотехнологичных компаний / Монография СПб . : СПбПУ. – 2019. – 253 с.
10. CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Modular Design, Springer, January 2019, pp. 1226-1235.

11. Дорожная карта развития «Сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии». Москва, 2019. – 49 с.
12. Паспорт национального проекта Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». https://digital.gov.ru/uploaded/files/natsionalnaya-programma-tsifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federatsii_NcN2nOO.pdf
13. Трухний А.Д., Михайлов И.А. Выбор профиля маневренных парогазовых установок для новых электростанций России / А.Д. Трухний, И.А. Михайлов // Теплоэнергетика. – 2006. – № 6. – С. 45-49.
14. Лебедев А.С. Парогазовый бум в России нарастает / А.С. Лебедев, Г.Л. Буталов // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 8 (69). – С. 6-7.
15. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2020 года // Электрические станции. – 2008. – № 9. – С. 4-17.
16. Обеспечение инвестиционной программы оборудованием и материалами // Электрические станции. – 2008. – № 9. – С. 18-24.
17. Баринберг Г.Д. Паровые турбины ЗАО «УТЗ» для ПГУ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Т.Ю. Линдер // Теплоэнергетика. – 2009. – № 9. – С. 12-14.
18. Култышев А.Ю. Совершенствование режимов пуска турбины К-300-240-2 в составе энергоблока : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.04.12 / Култышев Алексей Юрьевич; [Место защиты: Ур. гос. техн. ун-т]. – Екатеринбург, 2007. – 24 с.
19. Голошумова В.Н. 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.
20. Култышев А.Ю. Температурное и термонапряженное состояние ротора среднего давления турбины К-300-240-2 при пуске по новой технологии / А.Ю. Култышев, В.Л. Похорилер, В.Л. Голошумова // Надежность и безопасность энергетики. – 2008. – май. № 1. – С. 47-50.
21. 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.

22. Щегляев А.В. Паровые турбины / А.В. Щегляев. – в 2-х томах. М. : Энергоатомиздат, 1993. – 414 с.

23. Симою Л.Л. Повышение эффективности работы турбоустановки Т-250/300-240 путем модернизации ЦНД / В.Ф. Гуторов, В.П. Лагун, Г.Д. Баринберг // Теплоэнергетика. – 2005. – №11. – С. 68-71.

24. Трояновский Б.М. Турбины для атомных электростанций / Б.М. Трояновский. – М.: Энергия, 1973. – 184 с.

25. Линдер Т.Ю. 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.

26. 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.

27. Мэлоун М. Взрывной рост: Почему экспоненциальные организации в десятки раз продуктивнее вашей (и что с этим делать) / М. Мэлоун. – Альпина Диджитал, 2014.

28. Бененсон Е.И. Теплофикационные паровые турбины / Е.И. Бененсон, Л.С. Иоффе; под. ред. Д.П. Бузина; 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1986. – 271 с.

29. Кириллов И.И. Паровые турбины и паротурбинные установки / И.И. Кириллов, В.А. Иванов, А.И. Кириллов // Л. : Машиностроение, 1978. – 276 с.

30. Каталог продукции Группы компаний «Силловые машины» СПб. : 2019. – 361 с.

31. 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.

32. 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.

33. 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. Шибаетов // Теплоэнергетика. – 2014. – № 12. – С. 3-11.

34. Пат. 2490479 Российская Федерация: МПК F01K 7/34; F01D 3/02; F01K 17/02; F01K 23/00. Одноцилиндровая теплофикационная турбина для парогазовой установки: № 2011136004/06; заявл. 29.08.2011; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. / Сахнин Ю.А., Култышев А.Ю., Валамин А.Е., Кулаков А.Г.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Уральский турбинный завод».

35. Пат. 2386039 Российская Федерация: МПК F01D 9/02. Кольцевая камера проточной части турбины для смешения потоков пара: № 2008107392/06; заявл. 26.02.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 10. / Баринберг Г.Д., Сахнин Ю.А., Ивановский А.А.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Уральский турбинный завод».

36. Гольдберг А.А. Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода для ПГУ: монография / А.А. Гольдберг, Л.С. Иоффе, П.В. Коган, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, М.В. Шехтер, Т.Л. Шибаетов. – Екатеринбург: Априор. – 2013. – 168 с.

37. Гольдберг А.А. Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода для ПГУ: монография / А.А. Гольдберг, Л.С. Иоффе, П.В. Коган, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.В. Шехтер, М.Ю. Степанов, М.В. Шехтер, Т.Л. Шибаетов. – Екатеринбург: 2-е изд., переработанное и дополненное. ООО «Издательство УМЦ УПИ». – 2015. – 168 с.

38. Бененсон Е.И. Теплофикационные паровые турбины / Е.И. Бененсон, Л.С. Иоффе; под. ред. Д.П. Бузина; М. : Энергоатомиздат, 1976. – 270 с.

39. Култышев А.Ю. Парогазовые установки тепловых электрических станций: учебное пособие/ А.Ю. Култышев, В.Н. Голошумова. – Екатеринбург: УрФУ. – 2010. – 135 с.

40. Шибает Т.Л. Автоматическое проектирование компоновок паротурбинных установок / Т.Л. Шибает, А.А. Гольдберг, В.И. Брезгин // Теплоэнергетика. – 2008. – № 8. – С. 59–64.

41. Брезгин В.И. Обеспечение надежности паротурбинных установок на этапе проектирования компоновок с применением современных информационных технологий / В.И. Брезгин, Ю.М. Бродов, Т.Л. Шибает // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – № 4(19). – С. 22–26.

42. Пат. 2415276 Российская Федерация: МПК F01K 17/00. Способ защиты теплофикационной турбоустановки: № 2009143160/06; заявл. 23.11.09; опубл. 27.03.11, Бюл. № 9 / Баринберг Г.Д., Култышев А.Ю.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Уральский турбинный завод».

43. Пат. 2429352 Российская Федерация: МПК F01K 17/00. Способ эксплуатации теплофикационной турбоустановки с промежуточным перегревом пара: № 2010107087/06; заявл. 25.02.10; опубл. 20.09.11, Бюл. № 26 / Баринберг Г.Д., Валамин А.Е., Култышев А.Ю., Новоселов В.Б.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Уральский турбинный завод».

44. Култышев А.Ю. Диаграммы режимов теплофикационных паровых турбин для парогазовых установок / А.Ю. Култышев, М.Ю. Степанов, Т.Ю. Линдер // Теплоэнергетика. – 2012. – № 12. – С. 35-39.

45. Култышев А.Ю. Научное обоснование и разработка модульного принципа создания паротурбинной установки / А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2023. – № 1 (106). – С. 42-49.

46. Култышев А.Ю. Анализ и совершенствование конструкции основного и вспомогательного оборудования паротурбинных установок / А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2023. – № 2 (107). – С. 46-52.

47. Култышев А.Ю. Повышение технико-экономических показателей ПТУ: совершенствование монтажа, пуска и эксплуатации / А.Ю. Култышев // Турбины и дизели. – 2023. – № 3 (108). – С. 10-14.

48. Култышев А.Ю. Модульная конструкция паровых турбин /

А.Ю. Култышев // Надежность и безопасность энергетики. 2023. – Т. 16, № 3 – С. 167-175.

49. Култышев А.Ю. Научное обоснование, разработка и реализация модульного принципа создания паровых турбин : дис. ... доктора технических наук: 2.4.5 и 2.4.7 / А.Ю. Култышев. – Екатеринбург, Санкт-Петербург, 2023. – 435 с.

50. Култышев А.Ю. Паротурбинные установки: учебное пособие / А.Ю. Култышев, Е.Н. Поляева, М.Ю. Степанов, А.М. Табаков. – Екатеринбург: ЗАО «УТЗ». – 2011. – 230 с.

51. Култышев А.Ю. Парогазовые установки и особенности паровых турбин для ПГУ: учеб. пособие / А.Ю. Култышев, В.Н. Голошумова, А.С. Алешина. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 163 с.

52. Баринберг Г.Д. Теплофикационные паровые турбины для ПГУ мощностью 170...230 МВт / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, П.В. Коган, А.Ю. Култышев // Теплоэнергетика. – 2008. – № 6. – С. 28-33.

53. Баринберг Г.Д. Перспективные паровые турбины для ПГУ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Теплоэнергетика. – 2008. – № 8. – С. 2-8.

54. Баринберг Г.Д. Перспективные паровые турбины для ПГУ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 9. – С. 6-10.

55. Баринберг Г.Д. Модернизация энергоблоков с паровыми теплофикационными турбинами / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Надежность и безопасность энергетики. – 2009, июнь. – № 2 (5). – С. 57-61.

56. Баринберг Г.Д. Паровые турбины ЗАО «УТЗ» для перспективных проектов ПГУ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Теплоэнергетика. – 2009. – № 9. – С. 6-11.

57. 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.

58. 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, декабрь. – № 4 (11). – С. 38-41.

59. Баринберг Г.Д. Новые эскизные проекты паровых турбин для ПГУ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, Ю.А. Сахнин, А.Ю. Култышев, А.А. Ивановский // Теплоэнергетика. – 2011. – № 1. – С. 15-20.

60. Валамин А.Е. 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.

61. Валамин А.Е. Теплофикационная паровая турбина Тп-35/40-8,8 / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, А.А. Гольдберг, Ю.А. Сахнин, М.В. Шехтер, Х.К. Панэке Агилера, М.Ю. Степанов, Т.Л. Шибает // Теплоэнергетика. – 2012. – № 12. – С. 20-27.

62. Валамин А.Е. Паровые турбины ЗАО УТЗ для парогазовых установок / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Т.Л. Шибает, А.А. Гольдберг, В.Н. Билан, Х.К. Панэке Агилера, Ю.А. Сахнин, М.В. Шехтер, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева // Теплоэнергетика. – 2013. – № 8. – С. 6-13.

63. Валамин А.Е. Опыт ЗАО «Уральский турбинный завод» по реконструкции паротурбинных установок для тепловых станций / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, А.А. Гольдберг, Т.Л. Шибает, Х.К. Панэке Агилера // Теплоэнергетика. – 2013. – № 8. – С. 14-20.

64. Култышев А.Ю. Некоторые вопросы выбора параметров пара и схемных решений в целях оптимизации параметров паротурбинного оборудования и проектно-конструкторских разработок / А.Ю. Култышев, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева // Теплоэнергетика. – 2014. – № 12. – С. 16-18.

65. Валамин А.Е. 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.

66. Валамин А.Е. Обоснование выбора профиля теплофикационной паротурбинной установки для реконструкции энергоблоков с турбинами Т-250/300-23,5 / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Т.Л. Шибаетов, А.А. Гольдберг, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, В.Н. Билан, И.В. Кадкина // Теплоэнергетика. – 2016. – №11. – С.14-20.

67. Баринберг Г.Д. Паровые турбины для ПГУ Березовской и Среднеуральской ГРЭС / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.А. Ивановский, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин // Совершенствование теплотехнического оборудования, реконструкция ТЭС, внедрение систем сервиса, диагностирования и ремонта: материалы Пятой международной научно-практической конференции. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. – 2008. – С. 45-56.

68. Култышев А.Ю. Современные предложения ЗАО «Уральский турбинный завод» по реконструкции и модернизации основного паротурбинного оборудования / А.Ю. Култышев, Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.А. Ивановский, Ю.А. Сахнин // Сборник докладов Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2009» (9 июня, г. Москва). – Москва, 2009. – С. 12-16.

69. Баринберг Г.Д. Современные предложения ЗАО «Уральский турбинный завод» по реконструкции и модернизации основного паротурбинного оборудования / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.А. Ивановский, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, Р.Р. Давлетбаев // Сборник докладов Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2010» (8-9 июня, г. Москва). – Москва. – 2010. – С. 10-13.

70. Баринберг Г.Д. Создание мощных теплофикационных турбин на сверхкритические параметры пара / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем». ЭНЕРГО-2010 (1-3 июня, г. Москва). В 2 томах – М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – Том 1. – С. 39-42.

71. Баринберг Г.Д. Паровые турбины ЗАО «Уральский турбинный завод» в составе ПГУ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции

«Повышение эффективности энергетического оборудования» (1-2 ноября, г. Иваново). Иваново: ГОУ ВПО ИГЭУ. – 2010. – С. 93-96.

72. Култышев А.Ю. Современные предложения по основному и вспомогательному оборудованию ТЭЦ от ЗАО «УТЗ» / А.Ю. Култышев, А.Е. Валамин, Ю.А. Сахнин / Материалы XXIX Международной научно-практической конференции «UKR-POWER 2011» (21-25 июня, Украина, г. Ялта). Киев: АсТЭК. – 2011. – С. 20-23.

73. Валамин А.Е. 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 // Сборник докладов III Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2011» (7-8 июня, г. Москва). Москва. – 2012. – С. 14-17.

74. Валамин А.Е. Конструктивные особенности паровых турбин для ПГУ / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева// Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (6-8 декабря, г. Иваново). Иваново: ГОУ ВПО ИГЭУ. – 2011. – С. 105-110.

75. Култышев А.Ю. Диаграммы режимов паровых турбин для ПГУ / А.Ю. Култышев, В.Н. Билан, М.Ю. Степанов, Т.Ю. Линдер// Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (6-8 декабря, г. Иваново). Иваново: ГОУ ВПО ИГЭУ. – 2011. – С. 111-115.

76. Валамин А.Е. Паровые турбины ЗАО «Уральский турбинный завод» для реконструкции станций и нового строительства / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, А.М. Деминов // Сборник докладов V Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2013» (4-5 июня, г. Москва). Москва. – 2013. – С. 15-18.

77. Валамин А.Е. Новые разработки паровых турбоустановок ЗАО «УТЗ» / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Т.Л. Шибяев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, // Труды III Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования».

ЭНЕРГО-2013 (11-13 декабря, г. Москва). В 2 томах – М.: Издательский дом МЭИ. – 2013. Том 2. – С. 137-145.

78. Култышев А.Ю. Решения по схемам и конструкциям паровых турбин, применяемых в ПГУ / А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов // Сборник материалов докладов международной конференции «IX Семинар вузов по теплофизике и энергетике», г. Казань, КГЭУ. – 21-24 октября 2015. – Том 2. – С. 117-121.

79. Култышев А.Ю. Разработка новых проектов паровых турбин ЗАО «УТЗ» / А.Ю. Култышев, Т.Л. Шибаетов, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов // Тезисы докладов научно-практической конференции «Энергетика. Экология. Энергосбережение», г. Калуга. – 16-18 мая 2016 г. – С. 16-18.

80. Култышев А.Ю. Проектирование паровых турбин ЗАО «УТЗ» с использованием трехмерного математического моделирования / А.Ю. Култышев, Т.Л. Шибаетов, М.Ю. Степанов // Тезисы докладов научно-практической конференции «Энергетика. Экология. Энергосбережение», г. Калуга. – 16-18 мая 2016. – С. 177-179.

81. Култышев А.Ю. Проектирование паровых турбин ЗАО «УТЗ» с учетом определения оптимальных параметров пара для повышения эффективности парогазовых энергоблоков / А.Ю. Култышев, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева // Материалы научно-технической конференции «Перспективы развития новых технологий в энергетике России», ОАО «ВТИ», Москва. – С. 77-83.

82. Баринберг Г.Д. Перспективные паровые турбины уральского турбинного завода для ПГУ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Энергетика (Казахстан). – № 2 (25) май 2008. – С. 35-37.

83. Баринберг Г.Д. Перспективные паровые турбины для ПГУ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Энергетика и электрификация. – 2008. – № 2. (<http://www.energo.net.ua/index.php?id=202&t=10&par=magazine>).

84. Баринберг Г.Д. Перспективные паровые турбины Уральского турбинного завода для ПГУ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 7-8. (<http://www.energetika.by/arch/>

~page_m21=6~news_m21=176).

85. Сахнин Ю.А. Основные вопросы реконструкции и модернизации эксплуатируемого паротурбинного оборудования / Ю.А. Сахнин, А.Е. Валамин, Г.Д. Баринберг, В.Б. Новоселов, А.А. Ивановский, А.Ю. Култышев // Компрессорная техника и пневматика. – 2009. – № 7. – С. 24-25.

86. Валамин А.Е. Паровые турбины ЗАО УТЗ для установок комбинированного цикла / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин // Турбины и дизели. – 2011. – № 2 (35). – С. 26-27.

87. Валамин А.Е. 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. 11-15.

88. Валамин А.Е. Новые проекты Уральского турбинного завода для парогазовых установок / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов // Турбины и дизели. – 2012. – № 1. – С. 52-56.

89. Валамин А.Е. Новые проекты для парогазовых установок / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов // Энергетика (Казахстан). – 2012. – № 1(40). – С. 52-56.

90. Баринберг Г.Д. Реконструкция мощных паровых турбин / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин // Энергетик. – 2012. № 10. – С. 33-35.

91. Валамин А.Е. Основное и вспомогательное оборудование для реконструкции ТЭС, ГРЭС и ТЭЦ / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов // Энергонадзор. – 2013. – № 6. – С. 52-53.

92. Валамин А.Е. Опыт разработки и внедрения на территории Российской Федерации современных паровых турбин для парогазовых установок / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов // Вестник арматурщика. – 2015. – № 6 (26). – С. 52-54.

93. 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.

94. Култышев А.Ю. Проектирование паровых турбин АО «УТЗ» для повышения эффективности ПГУ / А.Ю. Култышев, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева // Турбины и дизели. 2017. – № 2. – С. 16-20.

95. URL: <https://www.utz.ru>

96. Валамин А.Е. Паровые турбины Т-50/60-8,8, К-63-8,8 и Тп-100/110-8,8 для реконструкции электростанций с турбинами К-50-90 и К-100-90 / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.В. Шехтер, М.Ю. Степанов, // Теплоэнергетика. – 2012. – № 12. – С. 28-34.

97. Баринберг Г.Д. Паровые теплофикационные турбины ПТ-30/35-8,8/1,0-5М и ПТ-40/50-8,8/1,0 для замены турбин семейства ВПТ-25 / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев // Теплоэнергетика. – 2011. – № 1. – С. 12-14.

98. Валамин А.Е. 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. 3-15.

99. Култышев А.Ю. Проектирование паровых турбин ЗАО «УТЗ» для реконструкции, модернизации и нового строительства электростанций с применением современных технологий / А.Ю. Култышев, Т.Л. Шибает, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, О.А. Самойлов // Сборник докладов VIII Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2016» (7-8 июня, г. Москва). Москва. – 2016. – С. 28-31.

100. Верткин М.А. Совершенствование паросиловой части теплофикационных ПГУ с котлами-утилизаторами для ТЭЦ крупных городов РФ / М.А. Верткин, С.П. Колпаков, В.Е. Михайлов, Ю.Г. Сухоруков, Л.А. Хоменок // Теплоэнергетика. – 2021. – № 2. – С. 34-40.

101. Михайлов В.Е. Основные направления повышения эффективности энергетического оборудования ТЭЦ / В.Е. Михайлов, Ю.В. Смолкин, Ю.Г. Сухоруков // Теплоэнергетика. – 2021. – № 1. – С. 63-68.

102. Валамин А.Е. Теплофикационная паровая турбина Т-63/76-8,8 для

серии ПГУ-230 / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, В.Н. Билан, А.А. Гольдберг, Ю.А. Сахнин, М.В. Шехтер, Х.К. Панэке Агилера, М.Ю. Степанов, Т.Л. Шибает, Е.Н. Поляева // Теплоэнергетика. – 2012. – № 12. – С. 3-12.

103. Валамин А.Е. Особенности конструкции паровой теплофикационной турбины Т-63/76-8,8 для серии ПГУ-230 (ЗАО «Уральский турбинный завод») / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева // Сборник докладов IV Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2012» (5-6 июня, г. Москва). Москва. – 2012. – С. 14-17.

104. Валамин А.Е. Конструктивные особенности теплофикационной паровой турбины Т-63/76-8,8 / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Ю.А. Сахнин, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева // Труды II Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем». ЭНЕРГО-2012 (4-6 июня, г. Москва). В 2 томах – М.: Издательский дом МЭИ. – 2012. – С. 152-154.

105. Валамин А.Е. Теплофикационная паровая турбина Т-40/50-8,8 для ПГУ-115 / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, В.Н. Билан, А.А. Гольдберг, Ю.А. Сахнин, М.В. Шехтер, Х.К. Панэке Агилера, М.Ю. Степанов, Т.Л. Шибает, Е.Н. Поляева // Теплоэнергетика. – 2012. – № 12. – С. 13-19.

106. Валамин А.Е. Конденсационная паровая турбина К-65-12,8 / 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. – 2016. – №11. – С. 21-26.

107. Пат. 2576392 Российская Федерация: МПК F01D 9/00; F25/26. Цилиндр паровой турбины с регулирующим отсеком: № 2014116215/06; заявл. 22.04.14; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 7 / Валамин А.Е., Култышев А.Ю., Сахнин Ю.А., Степанов М.Ю.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Уральский турбинный завод».

108. Пат. 2425229 Российская Федерация: МПК F01K 17/02. Способ работы паровой турбины: № 2010107079/06; заявл. 25.02.2010; опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21 / Баринберг Г.Д., Култышев А.Ю.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Уральский турбинный завод».

109. Рекомендации Р 50-54-103-88. Модульные и базовые конструкции изделий. Основные положения. Утверждены и введены приказом ВНИИНМАШ № 199 от 22.07.1988 в части базовых конструкций взамен ГОСТ 23945.1-80, отмененный с 01.07.86. – М. : Ротапринт ВНИИНМАШ, 1989. – 28 с.

110. ГОСТ 23945.1-80. Унификация изделий. Основные требования к разработке (выбору) базового изделия. Дата введения 01.12.1980 – М. : Издательство стандартов, 1991. – 12 с.

111. ГОСТ 23945.0-80. Унификация изделий. Основные положения. Дата введения 01.07.1980 – М. : Издательство стандартов, 1991. – 7 с.

112. ГОСТ 23945.2-80. Унификация изделий. Порядок задания требований по унификации и стандартизации в техническом задании. Дата введения 01.07.1980 – М. : Издательство стандартов, 1982. – 6 с.

113. ГОСТ 23945.3-80. Унификация изделий. Экспертиза проектов по заданному уровню унификации. Дата введения 01.07.1980 – М. : Издательство стандартов, 1982. – 5 с.

114. ГОСТ 6.38-72. Унифицированные системы документации. Система организационно-распорядительной документации. Основные положения. Дата введения 01.07.1973 – М. : Издательство стандартов, 1982. – 5 с.

115. ОСТ 108.001.02-81. Унификация изделий. Основные требования к разработке (выбору) базового изделия в энергомашиностроении. Утвержден и введен в действие указанием Министерства энергетического машиностроения от 04.01.81 № ЮК-002/11. – Л. : НПО ЦКТИ, 1981. – 10 с.

116. ОСТ 108.001.08-77. Разработка и постановка продукции на производство. Изделия энергетического машиностроения Утвержден и введен в действие указанием Министерства энергетического машиностроения от 24.02.77 № ПС-002/1586. – Л. : НПО ЦКТИ, 1978. – 23 с.

117. РД 50-176-80. Методические указания. Унификация изделий. Порядок разработки ограничительных перечней. Дата введения в действие от 01.01.1981. – данные об отмене опубликованы в ИУС № 08-1988. – 12 с.

118. РТМ 108.002.03-80. Унификация изделий. Порядок разработки, учета и регистрации конструкторской документации на унифицированные

изделия энергетического машиностроения. Утвержден и введен в действие указанием министерства энергетического машиностроения №ЮК-002/10653 от 31.12.1980 – СПб. : НПО ЦКТИ, 1981. – 16 с.

119. ГОСТ 19490-74. Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 7 февраля 1974 г. № 369. – М. : Издательство стандартов, 1974. – 12 с.

120. РД 50-149-79. Методические указания по оценке технического уровня и качества промышленной продукции. Утвержден Постановлением Госстандарта 17.04.79 № 1497. – М. : Издательство стандартов, 1979. – 124 с.

121. РД 50-33-80. Методические указания. Определение уровня унификации и стандартизации. Утвержден Постановлением Госстандарта 30.01.80 № 488. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 13 с.

122. Базров Б. М. Совершенствование машиностроительного производства на основе модульной технологии / Б.М. Базров // Станки и инструмент. – № 10. – 1985. – С. 22-25.

123. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. – М. : Машиностроение, 2001. – 368 с.

124. Васильев А.Л. Модульный принцип формирования техники / А.Л. Васильев. – М. : Издательство стандартов, 1989. – 238 с.

125. Аракелян Э.К. Методические подходы к оптимальному управлению режимами работы ТЭЦ со сложным составом оборудования / Аракелян Э.К., Андрюшин А.В., Зройчиков Н.А., Макарьян В.А., Черняев А.Н., Андрюшин К.А. // Теплоэнергетика. – 2012. – № 10. – С. 12.

126. Гокун В.Б. Технологические основы конструирования машин: монография / В.Б. Гокун. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 736 с.

127. Самые цифровые страны мира: рейтинг 2020 года. <https://hbr-russia.ru/innovatsii/trendy/853688/>.

128. Топ-10 стран с наиболее развитой цифровой экономикой. [Web-payment.ru](http://web-payment.ru/article/250/top-10-stran-s-naibolee-razvitoj-tsifrovoy-ekonomikoy/). [Электронный ресурс]. URL: [http://web-payment.ru/article/250/top-](http://web-payment.ru/article/250/top-10-stran-s-naibolee-razvitoj-tsifrovoy-ekonomikoy/)

10-cifrovaya-/.

129. 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.

130. Индекс digital-развития 60 стран. Исследование. Rusability. [Электронный ресурс]. URL: <https://rusability.ru/research/indeks-digital-razvitiya-60-stran-issledovanie>.

131. Публичный аналитический доклад по развитию новых производственных технологий / Сколковский институт науки и технологий. – октябрь 2014. – 203 с.

132. Балахонова И.В. Оценка цифровой зрелости как первый шаг цифровой трансформации процессов промышленного предприятия: монография / И.В. Балахонова. – Пенза : Издательство ПГУ, 2021. – 276 с.

133. 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>.

134. Цифровая зрелость: Методология оценки цифровой зрелости организации <https://cpur.ru/wp-content/uploads/2020/10/Methodologiya-oczenki-cifrovoj-zrelosti-organizaczii.pdf>.

135. 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>

136. 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.

137. 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.

138. 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.

139. 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.

140. Digital Transformation – How to Become Digital Leader. Study 2015 Results. URL: http://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/ADL_HowtoBecomeDigitalLeader_02.pdf.

141. 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>.

142. ГОСТ Р 57193-2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. Дата введения 31.10.2016 – М. : Стандартинформ, 2016. – 94 с.

143. 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.

144. 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.

145. Баринберг Г.Д. Приключенные паровые турбины ЗАО УТЗ / Г.Д. Баринберг, А.Е. Валамин, Ю.А. Сахнин // Теплоэнергетика. – 2008. – № 8. – С. 34-40.

146. Валамин А.Е. Особенности конструкции приключенной паровой турбины К-110-1,6 / А.Е. Валамин, А.А. Ивановский, М.Ю. Куклин, Т.Л. Шibaев // Теплоэнергетика. – 2009. – № 9. – С. 24-29.

147. Култышев А.Ю. 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. 32-39.

148. Солодов В.Г. 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.

149. 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.

150. URL: <https://www.ge.com/ru/content/паросиловое-оборудование/>

151. Кузнецов А.В. Паровые турбины Siemens SST / А.В. Кузнецов, А.В. Резниченко, С.В. Холодков // Турбины и дизели. – 2019. – май-июнь. – С. 4-9.

152. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en.html>.

153. Касилов В.Ф. Теплофикационные паровые турбины Siemens / В.Ф. Касилов, С.В. Холодков // Теплоэнергетика. – 2017. – № 3. – С. 31–37.

154. Касилов В.Ф. Паровые турбины SST-200 – SST-900 Siemens в России / Теплоэнергетика. – 2015. – № 4. – С. 10-16.

155. URL: <https://power.mhi.com/products/steamturbines/lineup>.

156. URL: <https://www.ansaldoenergia.com>.

157. URL: <http://www.ansaldoenergia.com>.

158. URL: <http://www.man-es.com>.

159. Култышев А.Ю. Научное обоснование, разработка и реализация модульного принципа создания паровых турбин : дис. ... доктора технических наук: 2.4.5 и 2.4.7 / А.Ю. Култышев. – Екатеринбург, Санкт-Петербург, 2023. – 435 с.

Серия научно-технических изданий «Формула турбин»

Култышев Алексей Юрьевич
Петреня Юрий Кириллович

МОДУЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ И ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ТУРБОУСТАНОВОК

Монография



Подписано в печать 30.08.2024. Формат 70×100/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 26,75. Тираж 501. Заказ 3790.

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.