

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Турецов Алексей Васильевич

**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ
ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ ТУРБИНЫ**

05.04.12 — Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург — 2021

Работа выполнена на кафедре «Турбины и двигатели» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» и в Специальном конструкторском бюро по турбиностроению (СКБт) АО «Уральский турбинный завод».

Научный руководитель: доктор технических наук,
Новоселов Владимир Борисович

Официальные оппоненты: **Рассохин Виктор Александрович**,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург,
руководитель научного направления
«Исследование турбин и авиационных двигателей»
Института энергетики Высшей школы
энергетического машиностроения;

Рогалев Андрей Николаевич,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва, заведующий кафедрой
«Инновационные технологии наукоемких
отраслей»;

Зорченко Наталья Викторовна,
кандидат технических наук, ОАО «Всероссийский
дважды ордена Трудового Красного Знамени
теплотехнический научно-исследовательский
институт», г. Москва, заведующая отделением
автоматизации.

Защита состоится «19» ноября 2021 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.05.12 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2848>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень её разработанности. Особенностью энергосистемы России является большая доля теплофикационных турбин в составе её генерирующих мощностей. Это обусловлено высокой потребностью в теплоснабжении страны и экономической целесообразностью комбинированной выработки энергии. Теплофикационные турбины являются важным элементом в энергетической инфраструктуре и поэтому должны быть надёжным поставщиком энергоресурсов. В настоящее время проблемой в области комбинированной выработки энергии является поиск таких решений, которые позволяли бы повысить качество и экономичность работы турбины и устраняли бы неполадки в её работе, приводящие к остановам, в том числе связанные с системами автоматического регулирования (САР). Исследование работы САР в штатных и аварийных режимах с целью её совершенствования позволит повысить надёжность и экономичность работы, а также снизить долю неплановых остановов турбин.

Одним из критически важных режимов работы паровой турбины, на который она должна быть рассчитана, является сброс полной электрической нагрузки. Для правильной оценки такого режима необходимо учитывать как аккумулированный пар в проточной части турбины, так и поступающий в турбину (пролётный) пар в процессе закрытия регулирующих клапанов. В настоящее время отечественные заводы-изготовители паровых турбин, в частности УТЗ, начали применять индивидуальные приводы регулирующих клапанов (ИПРК), построенные по технологии высокого давления (давление рабочей жидкости 16–20 МПа). В связи с этим при новой системе парораспределения необходимо корректно учитывать количество пролётного пара, поступающего в турбину при сбросе нагрузки.

Применение ИПРК также открывает возможности для реализации новых алгоритмов управления регулируемыми клапанами для реализации парораспределения с минимальным дросселированием. Это позволяет оптимизировать режимы работы регулирующей ступени (РС) и повысить КПД РС и турбины в целом. Различные приёмы оптимизации режимов РС предлагались и ранее, но их реализация была затруднена, в частности, из-за жёсткого порядка открытия регулирующих клапанов (РК). В настоящее время уже широко распространены микропроцессорные САР турбин, которые в сочетании с ИПРК позволяют реализовать алгоритмы управления РК любой сложности.

Ещё одной современной тенденцией является применение в САР электромеханических приводов (ЭМП) взамен электрогидравлических. Особенностью теплофикационных турбин УТЗ является наличие поворотных регулирующих диафрагм (ПРД) для управления давлением в отборе, приводимых в штатном варианте гидравлическим двусторонним сервомотором. Вопрос замены гидравлического привода ПРД на электромеханический возникал на УТЗ неоднократно как по просьбе заказчиков, так и с позиций нового проектирования и производства УТЗ. Поэтому разработка и исследование ЭМП ПРД также является сегодня актуальной задачей.

В настоящее время для исследования переходных режимов САР паровых турбин применяются методы математического моделирования. Эти методы

позволяют безопасно исследовать работу САР в штатных, предаварийных и аварийных режимах. Результаты таких исследований имеют высокую точность благодаря возможности учёта при моделировании как расчётных, так и полученных в ходе натурных опытов характеристик оборудования.

Целью работы является разработка и исследование методами математического моделирования для совершенствования современной системы парораспределения теплофикационной турбины.

Для достижения указанной цели исследования поставлены и решены следующие **задачи**:

- выполнен критический обзор литературы по теме исследования;
- проведён анализ современных методов математического моделирования паровых турбин и определены наиболее подходящие для проведения исследования;
- разработаны математические модели теплофикационных паровых турбин и их узлов, для которых проводится исследование;
- с помощью разработанной математической модели теплофикационной паровой турбины обнаружено и оценено влияние схемы парораспределения с ИПРК на динамическое повышение частоты вращения при сбросе нагрузки;
- разработан новый способ управления паровой турбиной и цифровая адаптивная система регулирования для реализации парораспределения с минимальным дросселированием;
- разработанный способ управления исследован и оценён на математической модели;
- разработана концепция (кинематическая схема) ЭМП ПРД и оценены его основные параметры.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Разработана динамическая математическая модель турбины Т-120/130-130-8МО и её парораспределения, учитывающая силовые и расходные характеристики регулирующих клапанов и расходные характеристики регулирующей ступени.
- На динамической модели турбины Т-120/130-130-8МО исследованы режимы сброса нагрузки с традиционной и индивидуальной схемой управления регулирующими клапанами. При этом получены количественные результаты расчёта частоты вращения и массы пролётного пара.
- Разработана математическая модель турбины Т-295/335-23,5 и её парораспределения, учитывающая расходные характеристики регулирующих клапанов и расходные характеристики регулирующей ступени.
- Разработан и предложен новый способ управления регулирующими клапанами и система регулирования для реализации оптимизированного парораспределения с минимальным дросселированием.
- На динамической модели турбины Т-295/335-23,5 исследовано оптимизированное парораспределение для повышения эффективности работы турбины при традиционном и новом разработанном способе управления

регулирующими клапанами. При этом получены качественные и количественные результаты расчёта переходных процессов.

- Предложено и разработано устройство возврата выходного звена в исходное положение, для использования его в составе ЭМП ПРД.

- На математической модели ЭМП ПРД проведено исследование его работы в аварийных режимах.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Показано положительное влияние индивидуальной схемы управления регулирующими клапанами при сбросах нагрузки, заключающееся в снижении динамического повышения частоты вращения.

- Показана возможность реализации оптимизированного парораспределения безударным способом, без резких переключений РК и положительный экономический эффект такого парораспределения.

- Предложена и разработана кинематическая схема ЭМП ПРД теплофикационной паровой турбины с функцией энергонезависимого аварийного закрытия ПРД. Исследованы основные параметры ЭМП.

- Показана возможность замены гидравлического привода регулирующих диафрагм на электромеханический со сниженным быстродействием без отрицательного влияния на повышение частоты вращения при сбросе нагрузки с использованием индивидуальной схемы управления РК.

Методология и методы исследования. Для решения задач исследования в работе используются методы математического моделирования. Модели турбин были построены на базе известных из литературы способов моделирования с использованием уравнений как массовых, так и тепловых балансов паровых объёмов трубопроводов и камер турбины. При определении расходов пара через РК и сегменты РС, а также паровых усилий на штоках РК были использованы их расходные и силовые характеристики, полученные при экспериментальных продувках моделей или натурных опытах. Моделирование выполнялось в среде *Simulink* пакета *MATLAB*.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается применением научно обоснованных принципов построения математических моделей паровых турбин, сертифицированного и общепризнанного программного обеспечения *Simulink* для моделирования динамических систем. Моделирование режимов работы турбин базируется на использовании режимных карт (тепловых балансов), полученных в результате подробных расчётов проточной части турбин и вспомогательного оборудования паротурбинной установки, проведённых ранее на заводе-изготовителе (УТЗ) и подтвердивших свою достоверность на множестве проектов. В основу моделирования регулирующих клапанов заложены реальные расходные характеристики, полученные в ходе продувок на испытательном стенде. Объёмы камер проточной части турбины, трубопроводов и сопротивления перепускных труб вычислены с учётом реальной геометрии и трассировки по чертежам завода-изготовителя (УТЗ).

Положения, выносимые на защиту:

- Результаты исследования режима сброса нагрузки турбины Т-120/130-130-8МО с традиционной и индивидуальной схемами управления РК, показывающие повышение надёжности турбоагрегата при индивидуальной схеме управления РК.
- Разработанный способ управления регулирующими клапанами паровой турбины и цифровую адаптивную систему регулирования, позволяющие реализовать парораспределение с минимальным дросселированием.
- Результаты исследования на динамической модели паровой турбины Т-295/335-23,5 оптимизированного парораспределения предложенным способом управления, которое позволяет получить прирост мощности цилиндра высокого давления (ЦВД) до 2,7 МВт и экономию условного топлива на электроэнергию 1020 т у.т. в год или 0,77 г у.т./(кВт·ч).
- Устройство возврата выходного звена в исходное положение и кинематическую схему, позволяющие реализовать ЭМП ПРД с функцией их энергонезависимого аварийного закрытия.
- Результаты исследования аварийного режима работы ЭМП на основе предлагаемого устройства возврата, обосновывающие необходимость применения в составе ЭМП амортизатора для исключения пластических деформаций деталей.

Реализация результатов работы. Полученные результаты исследований используются на УТЗ. Результаты моделирования турбины Т-120/130-130-8МО с разными схемами управления регулирующими клапанами используются при оценке динамического повышения частоты вращения и количества пролётного пара при сбросе нагрузки паровых турбин с той или иной схемой управления. Эти данные позволяют дополнительно обосновать выбор в пользу конкретной схемы управления регулирующими клапанами при проектировании турбины. Разработанная математическая модель ИПРК используется для оценки работы других типов ИПРК для различных турбин.

Результаты моделирования оптимизированного парораспределения на динамической модели паровой турбины Т-295/335-23,5 используются для оптимизации турбины и применения на других турбинах УТЗ. Разрабатываются алгоритмы для реализации предлагаемого способа управления.

Предложенное устройство возврата исполнительного механизма и результаты его моделирования используются в работе над проектом ЭМП ПРД.

Результаты и опыт разработки математических моделей паровых турбин Т-120/130-130-8МО и Т-295/335-23,5 используются при внедрении программного обеспечения для динамического моделирования паротурбинных установок на УТЗ.

Апробация работы. Основные результаты настоящей диссертационной работы обсуждены и докладывались на четвёртой научно-технической конференции молодых учёных Уральского Энергетического Института (г. Екатеринбург, 2019 г.), XI Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2019» (г. Москва, 2019 г.), молодёжной научно-технической конференции «Современные задачи автоматизации» ОАО «ВТИ» (г. Москва, 2020 г.). Получены патенты РФ на изобретения «Способ управления турбиной и

устройство для его осуществления» (№2730088), «Адаптивная цифровая система регулирования турбины» (№2722680) и на полезную модель «Устройство возврата выходного звена исполнительного механизма рабочего органа в исходное положение» (№199149).

Публикации. Все основные результаты, положения, выводы, основные результаты научных и практических исследований отражены в рецензируемых изданиях, определяемых ВАК РФ для представления результатов диссертационного исследования, докладывались соискателем и обсуждались на научно-технических конференциях. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 статьи — в рецензируемых научных публикациях из перечня, определённого ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ; 2 патента РФ на изобретение; 1 патент РФ на полезную модель.

Личный вклад автора состоит в проведении критического обзора литературных источников, постановке задач исследования, анализе и выборе методов динамического моделирования паровых турбин, в сборе исходных данных для моделей, построении математических моделей паровых турбин и их верификации, в разработке нового способа управления регулирующими клапанами и системы регулирования для его реализации, проведении моделирования режимов работы турбин при сбросах нагрузки и при исследовании разработанного способа управления РК, в определении экономического эффекта оптимизированного парораспределения, в разработке и расчёте основных параметров кинематической схемы ЭМП ПРД, в построении динамической модели ЭМП ПРД, в проведении исследования на динамической модели привода ПРД.

Структура работы. Научно-квалификационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 125 наименований. Весь материал изложен на 140 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков, 4 таблицы, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы научно-квалификационной работы, цель, задачи исследования, положения, выносимые на защиту; определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе приведён критический обзор литературы, посвящённый исследованию и совершенствованию систем регулирования и защиты паровых турбин.

В первом параграфе проанализированы методы учёта пролётного пара (ПП) при сбросе нагрузки. В инженерных расчётах для оценки работы ПП по его массе, поступившей в турбину за время закрытия регулирующих клапанов (РК), может быть использована формула:

$$m_{пп} = G_T (f T_{рк} + T_{з,рк}), \quad (1)$$

где $m_{пп}$ — масса пролётного пара, кг;

G_T — расход свежего пара на турбину, кг/с;

f — коэффициент дросселирования клапана или парораспределения;

$T_{\text{рк}}$ — время закрытия РК, с;

$T_{\text{з,рк}}$ — время задержки перед началом закрытия РК, с.

Анализ литературы показал, что формула (1) основана на упрощённом представлении парораспределения, в виде эквивалентного клапана, что не позволяет решать задачи расчёта с учётом реальных нелинейных расходных и силовых характеристик РК. Более того, на существующих нелинейных моделях турбоагрегатов недостаточно исследовано влияние ПП на динамику валопровода при разных схемах управления РК турбины.

Во втором параграфе рассмотрены проблемы обеспечения высокой экономичности паровых турбин при работе на частичных режимах. Отмечено, что наибольшее влияние на экономичность работы турбин в частичных режимах оказывает регулирующая ступень (РС), а также то, что РС обладает существенными резервами для повышения экономичности за счёт уменьшения потерь от дросселирования пара в РК. Приведён краткий обзор известных приёмов повышения экономичности турбин путём оптимизации режимов работы РС и системы парораспределения. Такие приёмы заключаются в выборе размеров сопловых сегментов таким образом, что различными комбинациями открытия РК может быть получено большое количество режимов работы турбины с полностью открытыми (т.е. не дросселирующими) РК. При этом отмечаются проблемы и ограничения при реализации таких приёмов, связанных с необходимостью резких переключений РК. В литературе подобный тип парораспределения с минимальным дросселированием также известен как «комбинаторное парораспределение» или «раздельное сопловое регулирование».

В третьем параграфе рассмотрены проблемы применения ЭМП в системах регулирования паровых турбин для непосредственного управления парораспределительными органами. Отмечено, что наиболее полно рассмотрены конструкции ЭМП с энергонезависимым аварийным возвратом для непосредственного управления стопорными клапанами (СК), РК и затворами на линии производственного отбора турбин. Конструкции ЭМП с энергонезависимым возвратом для непосредственного управления ПРД теплофикационных турбин исследованы недостаточно. Отмечается, что ЭМП ПРД с функцией энергонезависимого аварийного возврата возможно создать с использованием в конструкции спиральной пружины.

Во второй главе представлены количественные результаты исследования на математической модели теплофикационной паровой турбины и её парораспределения режимов сброса нагрузки с традиционной и индивидуальной схемами управления регулирующими клапанами. На модели выявлено и оценено (количественно) влияние различных схем управления РК на динамическое повышение частоты вращения.

Для решения задачи исследования была разработана математическая модель паровой турбины Т-120/130-130-МО. Расчётная схема модели представлена на рисунке 1. Модель состоит из двух частей. Первая часть — парораспределение, включающее сервомотор, регулирующие клапаны, КРУ, паровые объёмы между

каждым регулирующим клапаном и соответствующим им сегментом сопел регулирующей ступени и собственно регулирующую ступень. Вторая часть — отсеки паровой турбины с нерегулируемыми ступенями и паровыми объёмами между ними. Паровые объёмы камер отборов включают паровое пространство до обратных клапанов на трубопроводах отборов. Паровые объёмы трубопроводов отборов за обратными клапанами и регенеративных подогревателей в модели не учитывались, так как предполагается безаварийное срабатывание обратных клапанов, которые отсекают эти объёмы.

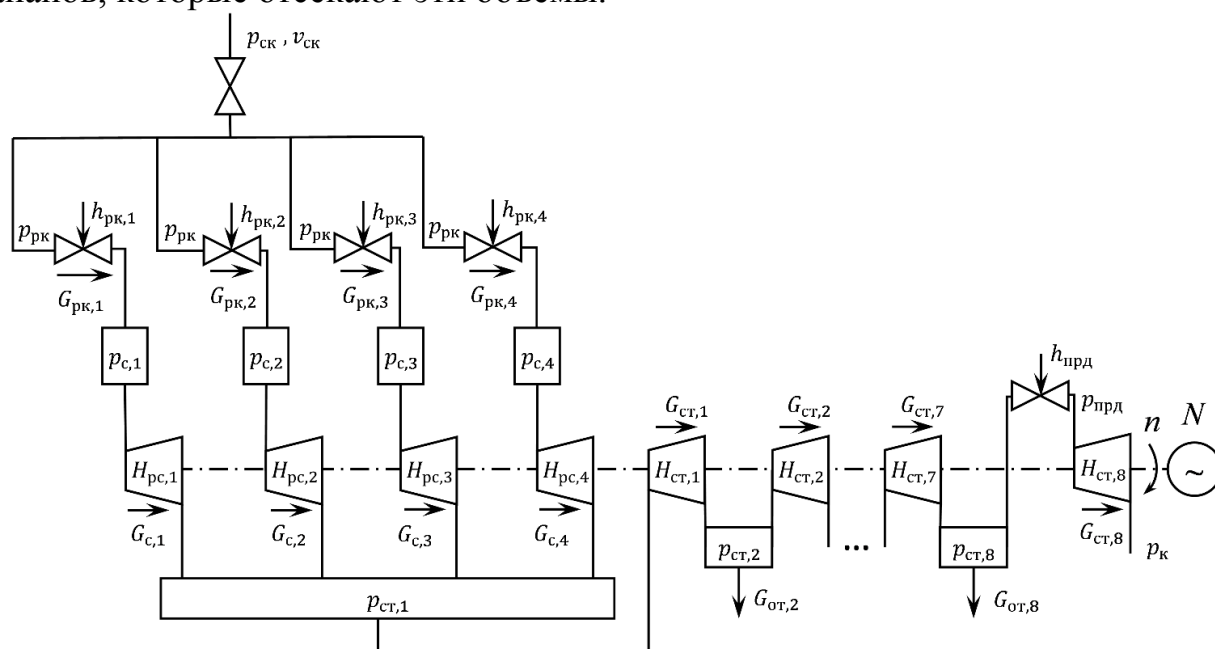


Рисунок 1 — Расчётная схема модели турбины типа Т-120/130-130-8МО

В основу моделирования части парораспределения легли уравнения, используемые в инженерном («прямом») методе его расчёта, описанном в литературе. В «прямом» методе расчёта исходными данными являются заданная, обычно линейная, зависимость расхода пара на турбину от хода сервомотора, а конечной целью расчёта является определение требуемых подъёмов штоков клапанов, исходя из заданной зависимости, и определение паровых усилий на клапаны и сервомотор.

В отличие от «прямого» метода расчёта, в «обратном» методе, использованном в модели, исходными данными являются подъёмы штоков РК, а цель расчёта — определение расходов пара через РК и через сопла РС. Дополнительно, в отличие от «прямого» метода, для учёта динамики паровых объёмов между РК и соплами РК, расходы через клапаны и через соответствующие им сопловые сегменты заданы разными переменными.

Поскольку паровая турбина Т-120/130-130-8МО может работать с двумя типами электрических генераторов, ТВФ-125-2УЗ и ТФ-125-2УЗ, моменты инерции которых значительно отличаются, исследование было проведено для каждого из этих вариантов.

Для исследования был выбран режим с максимальным пропуском пара в ЦНД, соответствующий конденсационному режиму с электрической мощностью

130 МВт. При этом ПРД полностью открыты, сервомотор РК находится в положении 180 мм своего хода, расход свежего пара составляет 128,6 кг/с. Пар в турбину подаётся через РК №1, №2 и №3; РК №4 закрыт. Расчёт выполнялся в программе *Simulink*. Помимо штатной работы регулирования был также исследован режим с отказом ПРД. Количественные результаты расчёта частоты вращения и массы пролётного пара приведены в таблице 1.

Исследование показало положительное влияние индивидуальной схемы управления РК при сбросах нагрузки, заключающееся в снижении динамического повышения частоты вращения.

Таблица 1 — Расчётное повышение частоты вращения турбины Т-120/130-130-8МО при сбросе нагрузки

Тип парораспределения	Количество пролётного пара регулирующих клапанов ВД, кг		Динамический заброс оборотов, об/мин			
			с генератором ТВФ-125-2УЗ		с генератором ТФ-125-2УЗ	
	определённое по формуле (1)	определённое по модели	при штатной работе ПРД	при отказе ПРД	при штатной работе ПРД	при отказе ПРД
КРУ	27,0	25,9	3202	3267	3162	3214
ИПРК	12,1	12,0	3160	3219	3129	3175

На модели было определено, что при схеме с ИПРК возможно допустить увеличенное время хода привода ПРД при условии сохранения динамического заброса частоты вращения в прежних границах, как у системы с КРУ. Это позволяет заменить гидравлический привод ПРД на относительно медленный электромеханический.

В третьей главе представлены новый способ управления турбиной для реализации парораспределения с минимальным дросселированием, результаты исследования предложенного способа и оценка его работы на математической модели теплофикационной турбины. На модели определён прирост мощности ЦВД и показан положительный экономический эффект такого парораспределения.

Для решения задачи исследования были предложены запатентованная система регулирования и запатентованный способ (алгоритм) управления турбиной. Реализация этого решения возможна на турбинах, оснащённых современными микропроцессорными системами регулирования при индивидуальных приводах РК, с их независимым позиционированием.

Суть нового способа (алгоритма) заключается в том, что в переходных режимах расходы пара через сопловые сегменты изменяются одновременно, подобно дроссельному парораспределению, а не исходно предусмотренному сопловому. После этого выполняется изменение комбинации РК с целью оптимизации режима работы РС и минимизации дросселирования пара.

При этом в системе регулирования учитываются нелинейные расходные характеристики РК и РС. Это позволяет выдерживать линейной общую расходную характеристику парораспределения и статизм регулятора частоты вращения при

любых сочетаниях положений РК. Таким образом, схема работы сопловых сегментов в переходных и установившихся режимах оказывается различной.

Для турбины Т-295/335-23,5 на УТЗ был рассчитан вариант оптимизированного (комбинаторного) парораспределения с минимальным дросселированием, представленный в таблице 2 и на рисунке 2. Здесь показаны положения h РК и кривые изменения расчётного КПД регулирующей ступени $\eta_{рс}$ при последовательной и оптимизированной схемах открытия РК с их предполагаемыми переключениями в режимах, соответствующих расходу пара G_T на турбину около 153 кг/с и 256 кг/с. Как видно из рисунка 2, оптимизированная (комбинаторная) схема позволяет увеличить КПД РС в диапазоне расходов 60–100 %. Данный диапазон работы является наиболее востребованным при работе турбины. Оптимизированная схема эквивалентна парораспределению с шестью сопловыми сегментами.

Таблица 2 — Расчётные положения РК в зависимости от расхода пара на турбину при их переключениях

G_T , кг/с	$h_{рк,1}$, %	$h_{рк,2}$, %	$h_{рк,3}$, %	$h_{рк,4}$, %
22	8	8	0	0
151	100	100	0	0
153	7	0	100	0
175	20	0	100	0
245	100	34	100	0
263	23	0	100	100

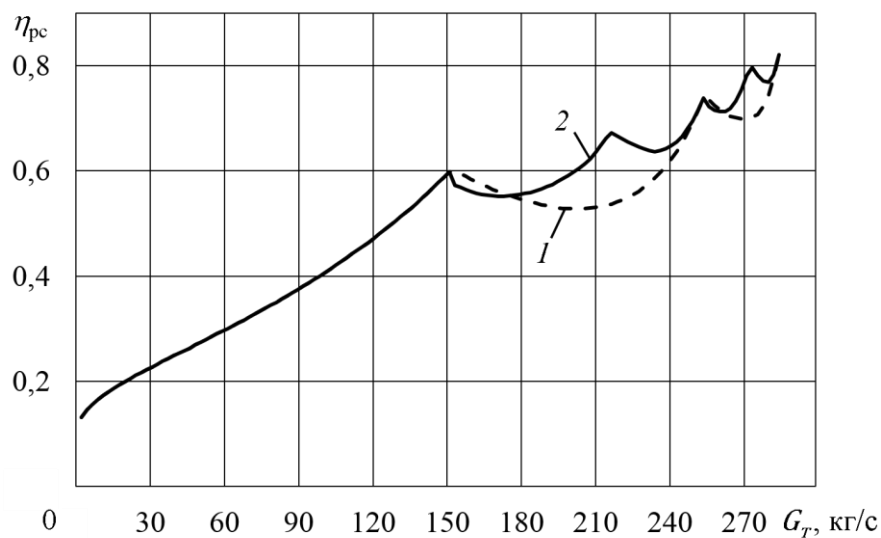


Рисунок 2 — Зависимость расчётного КПД регулирующей ступени от расхода пара на турбину при последовательном (1) и оптимизированном (2) парораспределении

Работа нового алгоритма управления была исследована в динамике на математической модели паровой турбины Т-295/335-23,5. Помимо турбины в модели была построена алгоритмическая часть системы регулирования, при помощи которой имитировались традиционный и новый способы управления. Под

традиционным способом управления понимается позиционирование РК по жёстко заданным нагрузочным характеристикам (электронное КРУ). Исследования заключались в изменении сигнала общего задания клапанам около точки смены их комбинации на величину не более 10 % расхода пара на турбину как в сторону увеличения нагрузки, так и в сторону её уменьшения.

Анализируя графики переходных процессов (рисунок 4), можно отметить следующее:

- резкое открытие и закрытие РК приводит к мгновенному нагружению и разгрузке сопловых коробок и риску возникновения в них повышенных температурных напряжений;
- резкое переключение РК приводит к скачкам температуры пара в сопловых коробках выше или ниже конечных установившихся значений вследствие адиабатического сжатия или расширения пара, что увеличивает амплитуду колебания температуры (рисунок 4 б);
- искажение статической характеристики САР из-за резких переключений РК, их нелинейных расходных характеристик и конечной скорости приводных устройств. Расход пара на турбину и электрическая мощность изменяются не монотонно;
- снижение надёжности и ресурса работы системы регулирования при реакции САР на колебательный процесс, когда резкие переключения РК будут повторяться по несколько раз, пока клапаны не достигнут заданного положения согласно статической характеристике.

На рисунке 5 представлены графики переходных процессов при реализации парораспределения с минимальным дросселированием новым предлагаемым способом управления. В отличие от предыдущего опыта, в переходных режимах при изменении расхода пара в турбину не происходит резкое полное открытие или закрытие РК. Приращение дополнительной нагрузки при нагружении или разгрузке турбины распределяется между несколькими РК и соответствующими им сопловыми сегментами. Таким образом, каждый РК отрабатывает лишь часть полного приращения нагрузки, соответственно, температура пара внутри сопловых коробок изменяется значительно меньше, чем при регулировании традиционным способом. Изменение расхода пара в турбину и электрической мощности является монотонным, отсутствуют неконтролируемые броски расхода и электрической мощности.

После завершения переходного процесса САР выполняет оптимизацию режима работы РС, при котором сумма расходов пара через все сопловые сегменты не изменяется, что обеспечивает постоянство расхода пара в турбину.

В результате проведённого исследования на модели паровой турбины было установлено, что разработанный алгоритм управления турбиной устраняет недостатки реализации комбинаторного парораспределения традиционным способом, а именно:

- снижается амплитуда температурных скачков в сопловых коробках;
- становится возможным управление нагружением и прогревом сопловых коробок независимо от изменения нагрузки турбины;

- повышается качество переходных процессов;
- работа элементов системы регулирования становится более плавной, устраняются гидроудары в гидравлической части САР и, соответственно, повышается ресурс и надёжность САР.

Полученные результаты испытаний указывают на возможность дальнейшего проведения натурных испытаний нового способа управления как автономных на контроллерном оборудовании, так и совместных на паровой турбине. В зависимости от турбины необходимо проведение дополнительных исследований температурных напряжений в элементах статора для уточнения максимальной скорости оптимизации режима РС, а также получения как можно более точных расходных характеристик РК и РС.

Дополнительно был оценён экономический эффект оптимизированного парораспределения. Расчёт экономичности турбины выполнялся, исходя из предпосылки, что изменение экономичности в работе происходит только в ЦВД, так как параметры пара в ЦСД и ЦНД остаются неизменными и определяются параметрами промежуточного перегрева пара. Для учёта реального графика нагрузки были использованы суточные ведомости турбины Т-250/300-240 ст. №10 ТЭЦ-22 г. Москва ПАО «Мосэнерго» за 2019 год. На математической модели турбины была получена зависимость вида $\Delta N_i = f(G_T)$ — прирост внутренней мощности ЦВД от расхода пара при оптимизированном парораспределении по сравнению с последовательным открытием РК (рисунок 3). Используя данные суточных ведомостей и полученных на модели данных прироста внутренней мощности ЦВД, было установлено, что экономия условного топлива на электроэнергию составит 1020 т у.т. в год или 0,77 г у.т./(кВт·ч).

В результате исследование показало возможность реализации оптимизированного парораспределения безударным способом, без резких переключений РК и положительный экономический эффект такого парораспределения.

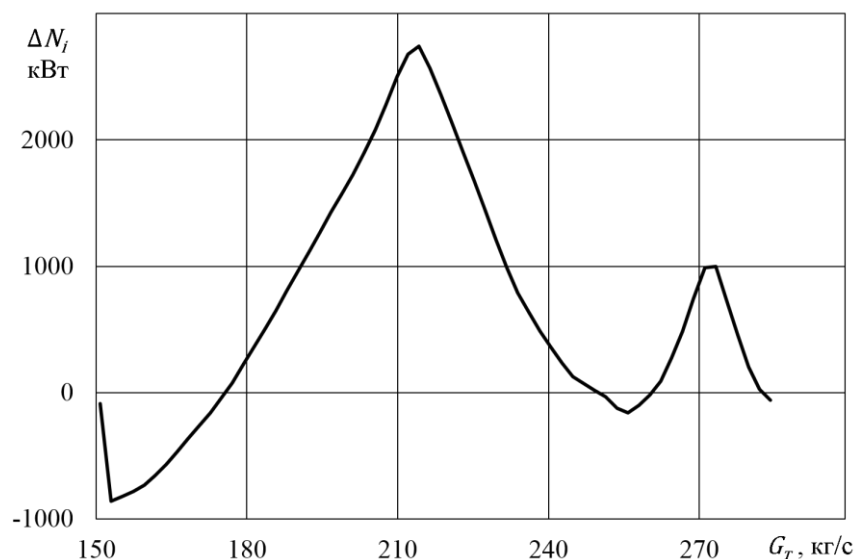


Рисунок 3 — Прирост внутренней мощности ЦВД от расхода пара на турбину при оптимизированном (комбинаторном) парораспределении

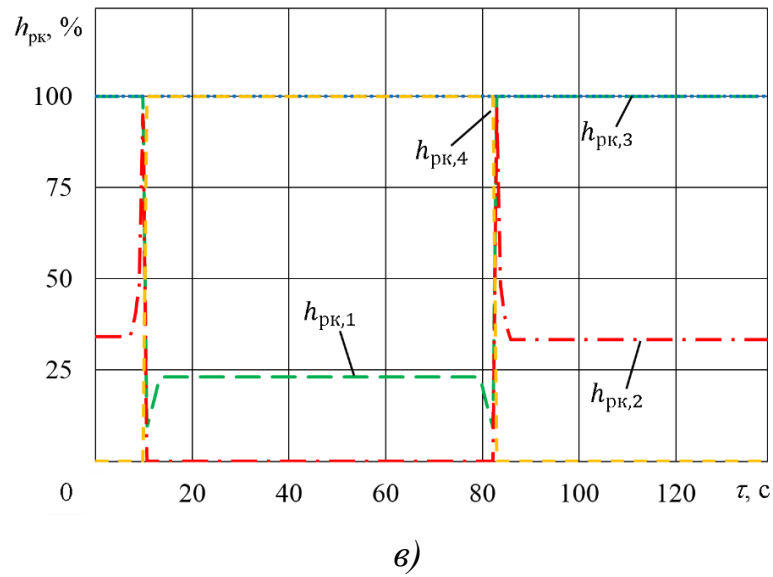
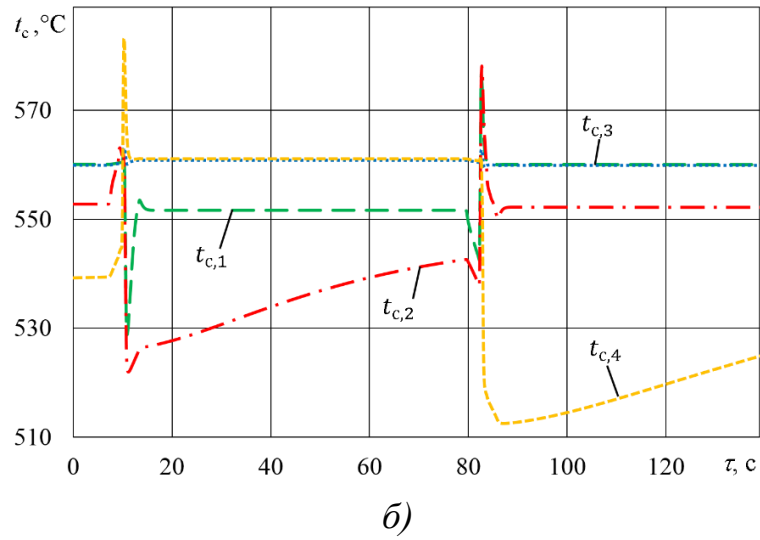
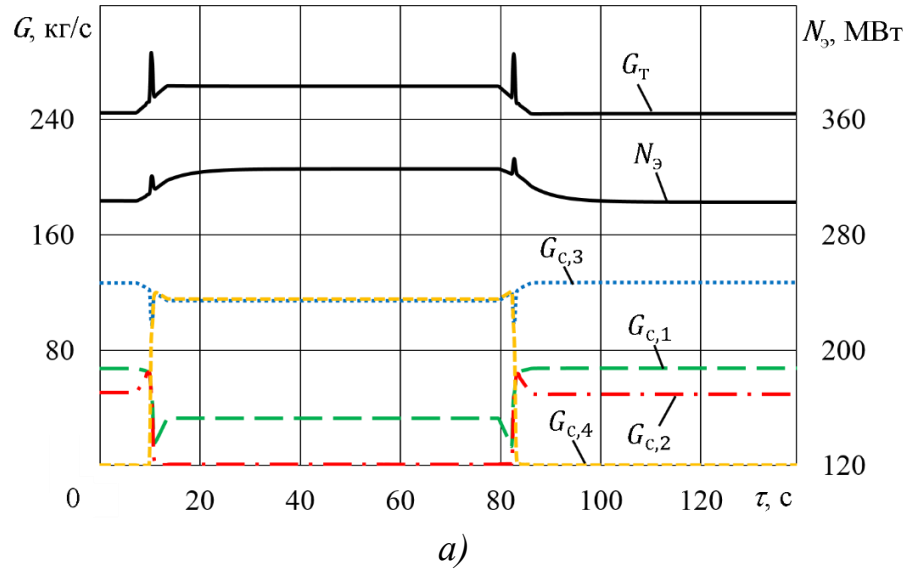
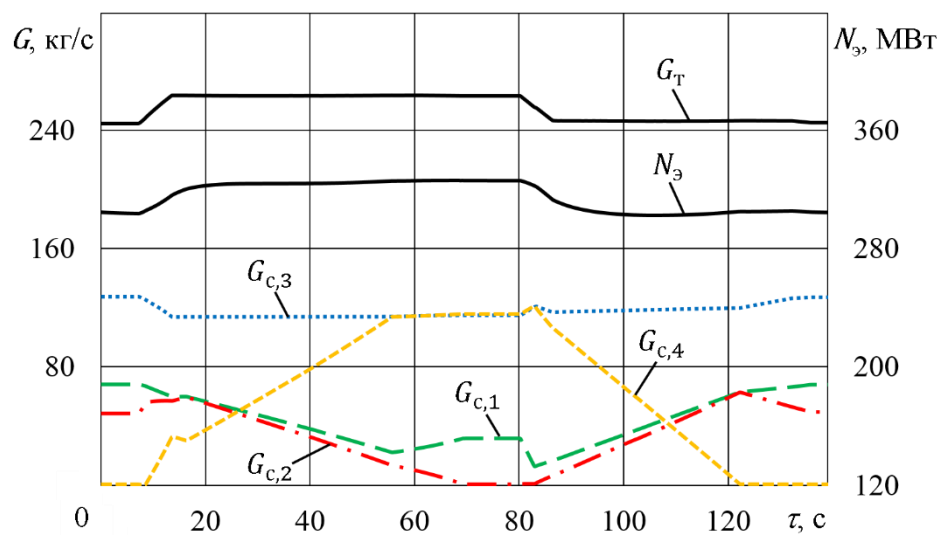
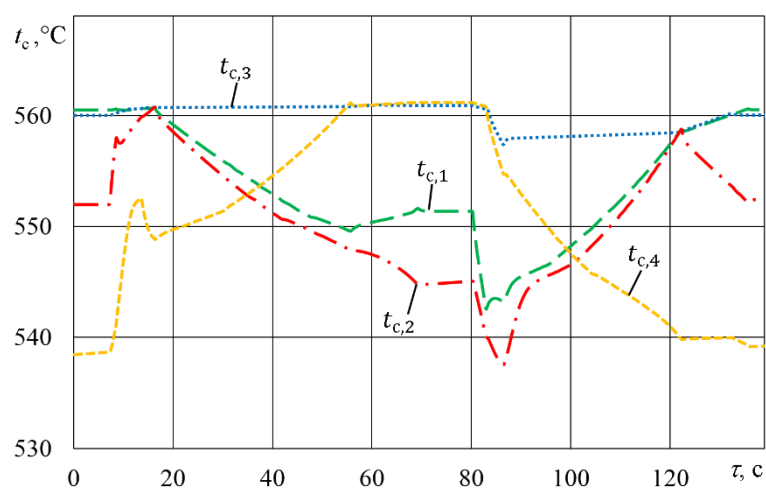


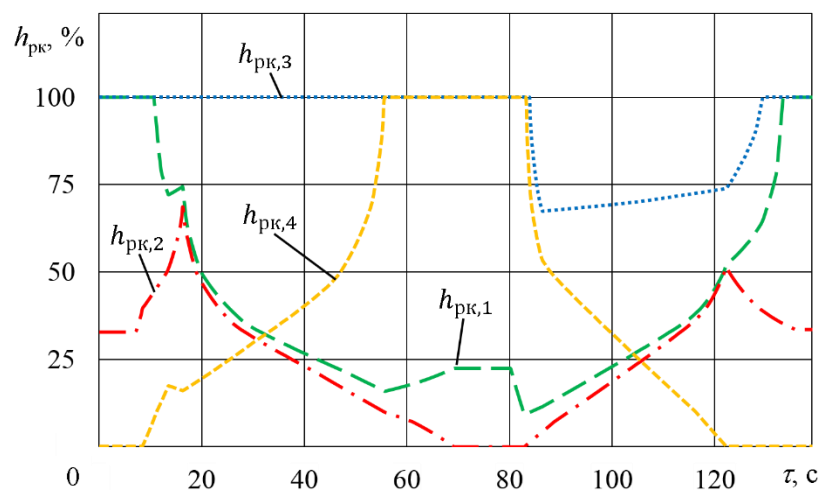
Рисунок 4 — Переходные процессы изменения расхода пара G и электрической мощности $N_{\text{э}}$ (а), температуры пара $t_{\text{с}}$ (б) и положения РК $h_{\text{рк}}$ (в) при традиционном способе реализации комбинаторного парораспределения во времени τ



a)



б)



в)

Рисунок 5 — Переходные процессы изменения расхода пара G и электрической мощности N_3 (а), температуры пара t_c (б) и положения РК h_{pk} (в) при использовании предлагаемого алгоритма управления парораспределением во времени τ

В четвертой главе представлены результаты разработки кинематической схемы ЭМП ПРД с функцией энергонезависимого аварийного закрытия ПРД и оценки основных параметров ЭМП.

Кинематическая схема ЭМП ПРД построена на базе запатентованного устройства, с применением спиральной пружины. Особенность схемы в том, что при штатной работе привода крутящий момент пружины замкнут электромагнитной муфтой сам на себя, т.е. с вала пружины на её барабан. Пружина находится в фиксированном заведённом состоянии. Управление ПРД осуществляется от электродвигателя через самотормозящуюся (червячную) передачу. При сбросе нагрузки турбины или останове муфта размыкается и освобождает вал пружины от связи с электродвигателем. Освобожденный вал пружины приводит винтовую передачу, и ПРД закрываются (рисунок 6).

На базе предложенного устройства возврата была разработана габаритная модель-эскиз ЭМП ПРД (рисунок 7).

В ходе исследования были оценены параметры пружины по различным расчётным методикам (таблица 3).

Таблица 3 — Результаты расчёта спиральной пружины для ЭМП ПРД

Методика Параметр	В.И. Анурьев			А.С. Радчик			Р.С. Курендаш		
t	20	25	30	20	25	30	20	25	30
ψ	10	8	6,7	10	8	6,7	10	8	6,7
$M_{\text{уст}}$	322	431	517	322	402	483	322	402	483
$M_{\text{раб}}$	787	1070	1298	483	603	725	483	603	725
s	3,1	3,4	3,8	2,8	3	2,9	3,6	3,1	2,8
D	0,425	0,370	0,355	0,398	0,370	0,324	0,450	0,400	0,350
b	0,410	0,340	0,290	0,160	0,160	0,200	0,190	0,300	0,440
V	0,058	0,037	0,029	0,020	0,017	0,017	0,030	0,038	0,050

где t — шаг передачи, мм;

ψ — число рабочих оборотов пружины, об;

$M_{\text{уст}}$ — минимально необходимый (установочный) момент пружины при спуске, Н·м;

$M_{\text{раб}}$ — максимальный момент (рабочий) пружины при спуске, Н·м;

s — толщина пружинной ленты, мм;

D — внутренний диаметр барабана пружины, м;

b — ширина пружины, м;

V — объём пружины, м³.

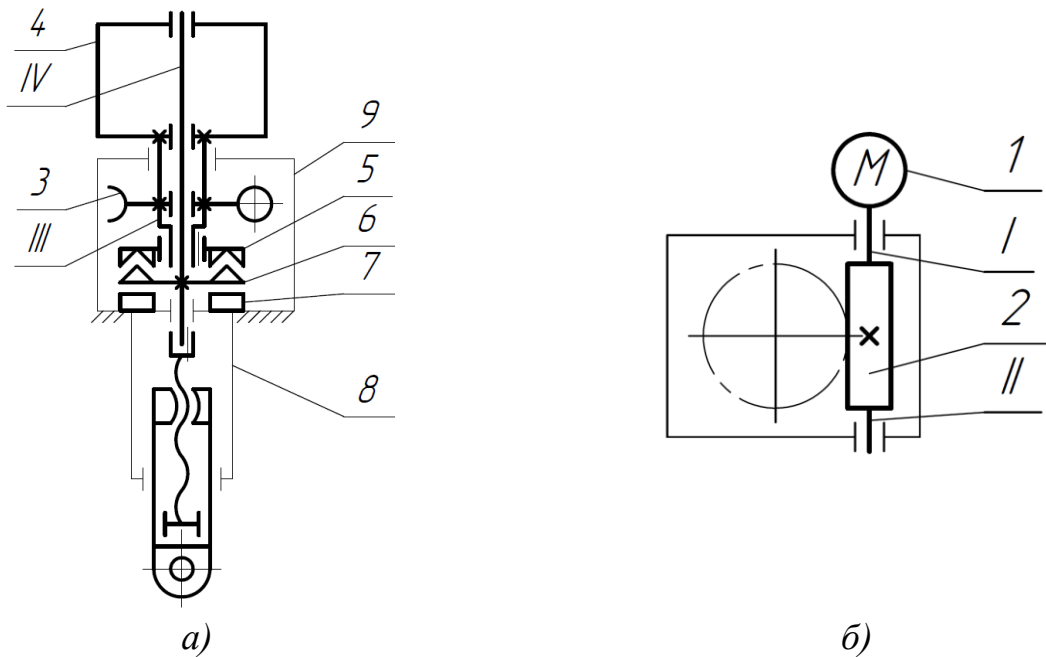


Рисунок 6 — Кинематическая схема предложенного устройства в составе исполнительного механизма: а) — главный вид, б) — разрез по червячному колесу 3.

I, II — ведущие валы, *III* — внешний вал, *IV* — внутренний вал (ведомый), *1* — приводной двигатель, *2* — червяк, *3* — червячное колесо, *4* — барабан спиральной пружины, *5, 6* — зубчатые полумуфты, *7* — катушка электромагнитной муфты, *8* — винтовая передача, *9* — корпус.

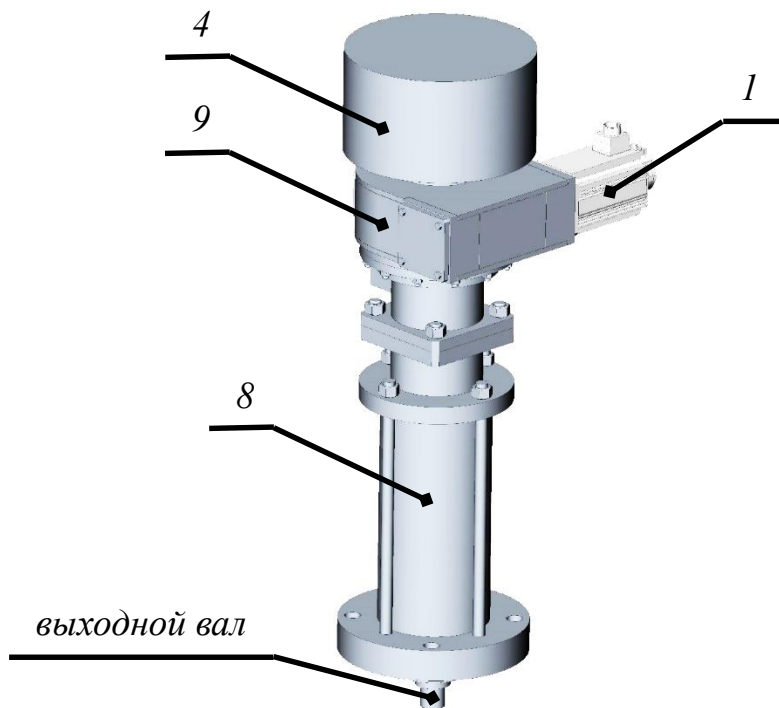


Рисунок 7 — Габаритная модель ЭМП ПРД на базе предложенного устройства возврата. Обозначения позиций в соответствии с рисунком 5.

Проведён анализ трёх типов винтовых передач: на основе трапецеидальной резьбы по ГОСТ 9484-81, на основе роликовинтовой пары (РВП) и на основе шариковинтовой пары (ШВП). Отмечено, что наиболее оптимальным решением для предложенной конструкции ЭМП ЧНД будет применение ШВП с шагом 20–30 мм.

В методиках расчёта ШВП одним из главных критериев, по которым ведётся выбор ШВП, является динамическая грузоподъёмность, определяемая на основе эквивалентной (средней) нагрузки. Данный параметр определяет ресурс ШВП. В главе приведены результаты расчёта эквивалентной нагрузки ШВП для ЭМП ЧНД на основе анализа циклограммы работы гидравлического сервомотора ЧНД (таблица 4). В качестве циклограммы были взяты опытные данные работы в течение года паровой турбины Т-120/120-130-ПР2 ст. №11 Усть-Каменогорской ТЭЦ. Показано, что эквивалентная нагрузка на порядок ниже, чем максимальное усилие сервомотора. В связи с этим, динамическая грузоподъёмность не будет являться ограничивающим параметром при выборе ШВП.

Таблица 4 — Результаты расчёта эквивалентной нагрузки ПРД

Направление Параметр	Положительное (на открытие ПРД)	Отрицательное (на закрытие ПРД)
Время перемещения, с	13192	12724
Общее перемещение, %	4653	4692
Средняя скорость, %/с	0,353	0,369
Эквивалентная нагрузка, Н	7590	7286

В качестве приводного электродвигателя предлагается использовать сервопривод вращательного движения — серводвигатель. Для подбора электродвигателя были рассмотрены серводвигатели одной из наиболее распространённых марок — *Omron*, серии *Accurax G5*. Для оценки параметров приводного электродвигателя были проанализированы два режима его работы: штатное регулирование и режим взведения пружины. По результатам расчётов было определено, что наиболее подходящим для ЭМП ПРД будет являться серводвигатель мощностью 5 кВт с номинальной частотой вращения 3000 об/мин указанной серии.

На математической модели ЭМП ПРД проведено исследование аварийного режима работы привода. Для решения данной задачи была использована модель, построенная на базе дифференциального уравнения движения:

$$m_{\text{ЭМП}} \frac{d^2 h_{\text{ЭМП}}}{d\tau^2} = F_{\text{нагр}} - F_{\text{пр}}^{\text{уст}} - K_{\text{пр}} h_{\text{ЭМП}}(\tau) \quad (2)$$

где $m_{\text{ЭМП}}$ — масса подвижных частей ПРД и ЭМП, кг;

$h_{\text{ЭМП}}$ — положение штока ЭМП, м;

$F_{\text{нагр}}$ — усилие от нагрузки на штоке ЭМП, Н;

$F_{\text{пр}}^{\text{уст}}$ — установочное усилие пружины ЭМП (при закрытых ПРД), Н;

$K_{\text{пр}}$ — коэффициент жёсткости пружины ЭМП, Н/м.

В этом уравнении (2) вращающий момент пружины ЭМП был преобразован в осевую силу на штоке ЭМП, а моменты инерции ПРД и рычажного привода приведены к эквивалентной массе на штоке ЭМП. Результаты исследования представлены на рисунке 8.

Реальный процесс из-за возрастающего перепада давления на ПРД при их закрытии будет находиться между двумя представленными графиками. Как видно из рисунка 8, при отсутствии демпфера конечная скорость штока ЭМП при достижении упора (положение 0 мм) может превысить допустимую (0,3–0,4 м/с) и достичь 5–12 м/с. При шаге ШВП 30 мм её частота вращения также может превысить допустимую (3000 об/мин) в 3,5–8 раз.

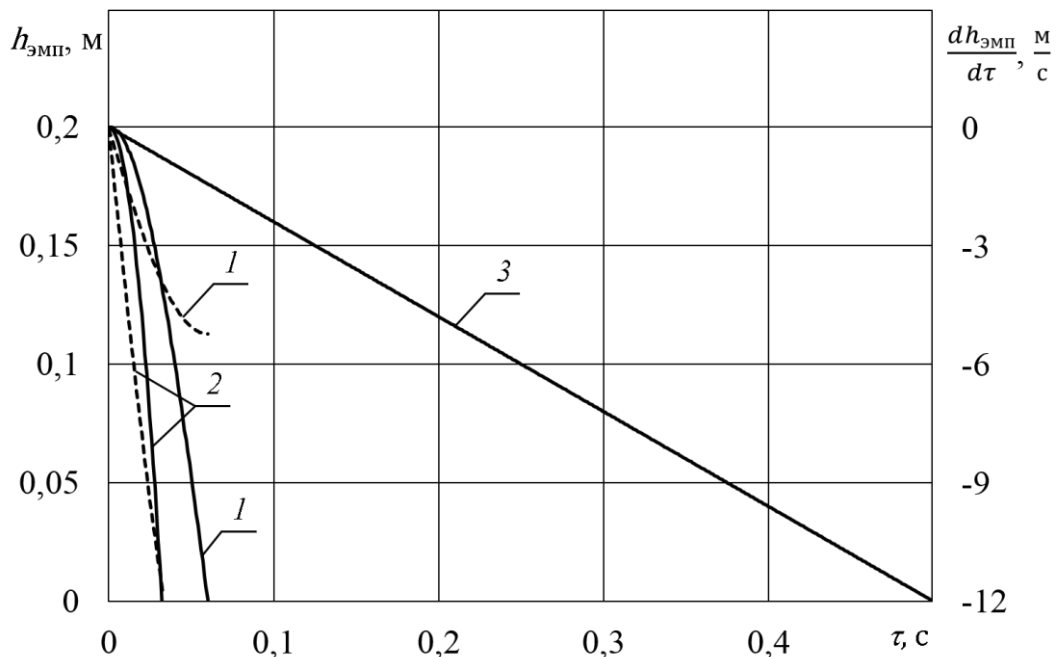


Рисунок 8 — Графики положения (—) и скорости (---) хода ЭМП ЧНД в аварийном режиме без демпфера:

1 — при полной нагрузке, 2 — без паровой нагрузки (вхолостую),
3 — эталонное при скорости 0,4 м/с.

Для снижения конечной скорости штока ЭМП требуется использовать в конструкции демпфер гидравлического типа, так как закрытие ПРД по сигналу защиты или сброса нагрузки возможно из любого произвольного положения, в том числе близкого к закрытому. В последнем случае необходимое давление и, соответственно, сила торможения в пневматическом амортизаторе будут недостаточны.

В качестве гидравлического демпфера для ЭМП ПРД предлагается использовать промышленный противоударный амортизатор. Данное решение отвечает концепции безмасляной САР, так как конструкция демпфера является

герметичной и не требует подвода к нему масляных трубопроводов. Монтаж амортизатора возможен на один с ЭМП ПРД кронштейн (рисунок 9).

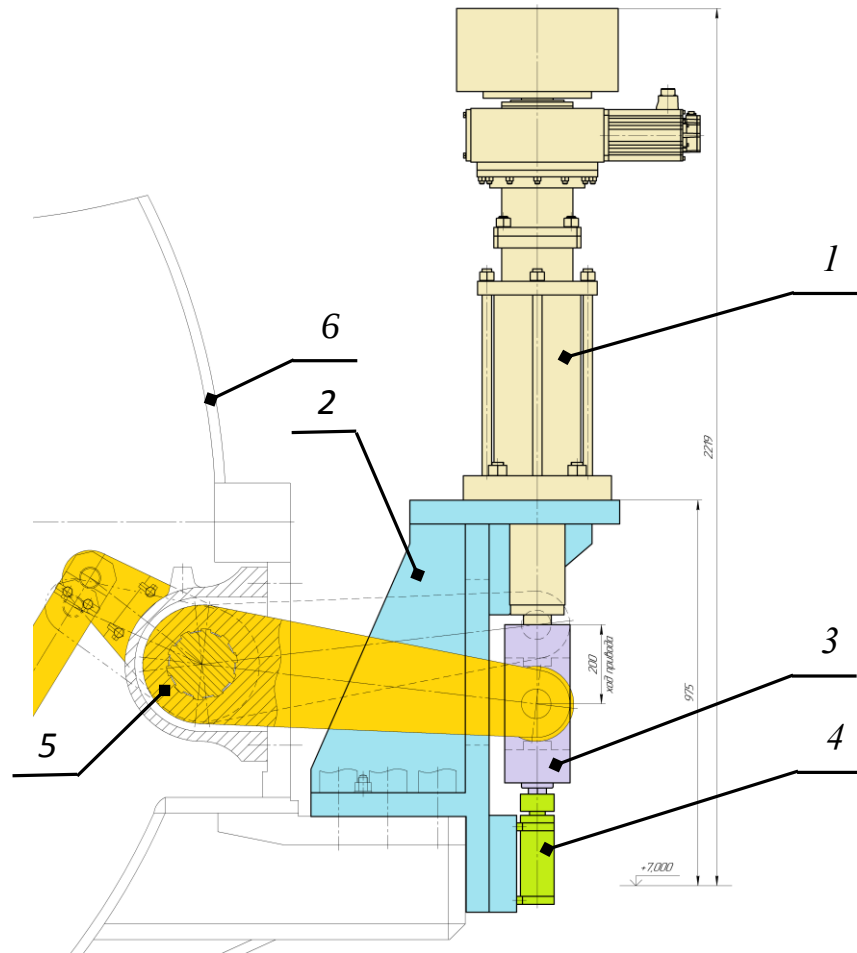


Рисунок 9 — Вариант установки ЭМП ПРД:

1 — ЭМП ПРД, 2 — кронштейн, 3 — серьга, 4 — противоударный амортизатор, 5 — рычажный привод ПРД, 6 — ЦНД турбины

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В работе выполнен критический обзор отечественных и зарубежных литературных источников, затрагивающих технические решения и методы расчёта по системам автоматического регулирования, которые позволяют повысить качество, экономичность и надёжность работы теплофикационных паровых турбин: учёт пролётного пара при сбросах нагрузки турбин с ИПРК, реализация парораспределения с минимальным дросселированием и применение ЭМП для управления ПРД отопительного отбора.

2. Разработана динамическая математическая модель турбины Т-120/130-130-8МО и её парораспределения, учитывающая реальные нелинейные силовые и расходные характеристики РК и расходные характеристики РС. На данной модели исследованы режимы сброса нагрузки с традиционной и индивидуальной схемой управления регулирующими клапанами.

3. На разработанной модели турбины Т-120/130-130-8МО выявлено и количественно оценено влияние различных схем управления РК на повышение частоты вращения при сбросе нагрузки. Показано положительное влияние индивидуальной схемы управления РК при сбросах нагрузки, заключающееся в снижении динамического повышения частоты вращения. Также показано, что при схеме с ИПРК возможно допустить увеличенное время хода привода ПРД при условии сохранения динамического заброса частоты вращения в прежних границах, как у системы с КРУ. Это в перспективе позволяет заменить гидравлический привод ПРД на относительно медленный электромеханический.

4. Предложен и разработан новый способ управления РК и система регулирования для реализации парораспределения с минимальным дросселированием. Для исследования предложенного способа управления и системы регулирования разработана динамическая математическая модель турбины Т-295/335-23,5 и её парораспределения с использованием уравнений тепловых и массовых балансов, а также учитывающая реальные нелинейные расходные характеристики РК и расходные характеристики РС.

5. На разработанной модели турбины Т-295/335-23,5 оценена работа предложенного способа управления и системы регулирования. Показана возможность реализации оптимизированного парораспределения безударным способом, без резких переключений РК. На модели определён прирост мощности ЦВД и показан положительный экономический эффект такого парораспределения.

6. Предложено и разработано устройство возврата выходного звена в исходное положение, на базе которого разработана кинематическая схема ЭМП ПРД с функцией энергонезависимого аварийного закрытия ПРД.

7. Исследованы и определены оптимальные параметры основных компонентов ЭМП ПРД: спиральной пружины, винтовой передачи, приводного электродвигателя. На математической модели ЭМП ПРД проведено исследование его работы в аварийном режиме. Показана принципиальная возможность реализации ЭМП ПРД с функцией энергонезависимого аварийного закрытия ПРД.

8. Дальнейшими перспективами научного исследования являются: исследование динамических напряжений в элементах статора конкретной турбины при реализации оптимизированного парораспределения, исследование расходных характеристик РК и РС путём численного моделирования или натурных опытов, разработка оптимизированных схем парораспределения для других типов турбин, разработка программно-аппаратных решений ЭЧСРиЗ для реализации оптимизированного парораспределения, проведение натурных испытаний оптимизированного парораспределения на контроллерном оборудовании ЭЧСРиЗ и совместных на паровой турбине, разработка и испытания ЭМП ПРД для других различных типов турбин.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Турецов, А. В.** Модельные исследования сбросов нагрузки паровых турбин при разных схемах управления регулирующими клапанами / **А. В. Турецков**, В. Б. Новоселов // Электрические станции. – 2019. – № 4. – С. 15–20 / **Tureckov, A. V.** Model Studies of Load Shedding for Steam Turbines with Different Regulator Valve Control Schemes / **A. V. Tureckov**, V. B. Nowoselov. // Power Technology and Engineering. – 2019. – Vol. 53, Iss. 3. – P. 344–349; 0,75 п.л./0,65 п.л. (Scopus).
2. **Турецов, А. В.** Повышение экономичности работы паровых турбин путём оптимизации режимов работы регулирующей ступени / **А. В. Турецков**, М. В. Шехтер // Теплоэнергетика. – 2020. – № 12. – С. 66–72 / **Turetskov, A. V.** Increasing the Economic Operation of Steam Turbines by Optimizing the Operating Modes of the Control Stage / **A. V. Turetskov**, M. V. Shekhter // Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 67. – P. 916–921 ; 0,81 п.л./0,7 п.л. (Scopus).

Патенты на изобретения и полезные модели:

3. Пат. № 199149 Рос. Федерация, МПК F16K 31/02 (2006.01). Устройство возврата выходного звена исполнительного механизма рабочего органа в исходное положение : № 2020112042 : заявл. 23.03.2020 : опубл. 19.08.2020 / **Турецов А. В.**, Куклин М. Ю. ; заявитель Урал. турбин. з-д. – 7 с.
4. Пат. № 2722680 Рос. Федерация, МПК F01D 17/00 (2006.01), F01D 17/20 (2006.01). Адаптивная цифровая система регулирования турбины : № 2019128319 : заявл. 09.09.2019 : опубл. 03.06.2020 / **Турецов А. В.**, Шехтер М. В. ; заявитель Урал. турбин. з-д. – 8 с.
5. Пат. № 2730088 Рос. Федерация, МПК F01D 17/00 (2006.01). Способ управления турбиной и устройство для его осуществления : № 2019134807 : заявл. 29.10.2019 : опубл. 17.08.2020 / **Турецов А. В.**, Шехтер М. В. ; заявитель Урал. турбин. з-д. – 13 с.

Другие публикации:

6. **Турецов, А. В.** Системы автоматического регулирования АО «УТЗ»: вчера, сегодня, завтра / **А. В. Турецков** // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2019. – № 10. – С. 24–28; 0,63 п.л.
7. **Турецов, А. В.** Разработка алгоритма управления турбиной для систем парораспределения с минимальным дросселированием пара / **А. В. Турецков** // Современные задачи автоматизации : сб. докл. молодёж. науч.-техн. конф. (Москва, 17 сент. 2020 г.) / Всерос. теплотехн. ин-т ; под общ. ред. Н. В. Зорченко. – Москва : ВТИ, 2020. – С. 89–96. – ISBN 978-5-905858-31-4; 0,61 п.л.