

**СБОРНИК ТРУДОВ
XIII НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ ИНЖЕНЕРОВ**

«ЭНЕРГИЯ МОЛОДОСТИ»

**АО «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ»
2025**

Санкт-Петербург, 2025

УДК 620.9
ББК 31я43
С23

**С23 СБОРНИК ТРУДОВ XIII НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ ИНЖЕНЕРОВ «ЭНЕРГИЯ
МОЛОДОСТИ» АО «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ» 2025. — М.:
Издательство «Перо», 2025. — 219 с. – 16 Мбайт. [Электронное издание].**

ISBN 978-5-00258-727-8

Научно-техническая конференция АО «Силовые машины» «Энергия молодости» в 2025 году прошла в 13-й раз. Конференция традиционно была посвящена актуальным вопросам энергетики, гидротурбинного, газотурбинного, парового и котельного оборудования, а также передовым технологиям производства.

Целью конференции стал обмен знаниями, опытом и идеями, которые определяют будущее нашей отрасли. Энергетика — это основа современной цивилизации, и от ее развития зависит не только экономический прогресс, но и качество жизни миллионов людей. Чтобы быть технологическим лидером отрасли, необходимо не просто быть в курсе инноваций, а создавать их.

Исследования и разработки, представленные в рамках конференции, станут важным вкладом в развитие энергетической отрасли. Дискуссии и обсуждения, которые прошли в эти дни, стали основой для новых прорывных проектов и укрепления сотрудничества между научными, производственными и инженерными сообществами.

В этом году участниками стали представители не только группы компаний «Силовые машины», но и ООО «Севергрупп», ОАО «НПО ЦКТИ», Карельский филиал ПАО «Россети Северо-Запад». Университеты были представлены сотрудниками и обучающимися из СПбПУ, Университета ИТМО, БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ"», ГУАП, МАИ, ЛЭТИ и УУниТ.

ISBN 978-5-00258-727-8

УДК 620.9
ББК 31я43

© Авторы, 2025

Оглавление

<i>Разработка диафрагм сборной конструкции для паровых турбин Алексеенко Е.А.</i>	9
<i>Проектирование и изготовление осевого компенсатора Аюпов Р.Т., Аминев Р.Р., Рашитов И.Р.</i>	10
<i>Применение параметрической оптимизации для улучшения массовых характеристик деталей гидротурбины на примере крышки ПЛ 30 Баранова А.А.</i>	12
<i>Разработка многокритериального метода оптимизации для проектирования электрических машин Бекузин В.И.</i>	15
<i>Интегральный и позонный расчет точки котла при работе на дизельном топливе Березина М.Д., Уланов Э.А. , Зайченко М.Н.</i>	17
<i>Разработка концепции ГТУ с силовой турбиной мощностью до 80 МВт Бобрик А.А.</i>	19
<i>Применение PFMEA-анализа потенциальных отказов как метода повышения качества изготовления диска подпятника Богданова Н.А.</i>	21
<i>Модернизация паротурбинных установок ТЭС типа ПТ мощностью свыше 60 МВт Бондаренко Н.Н.</i>	23
<i>Современные принципы проектирования системы маслоснабжения паровых турбин производства ЛМЗ Власенко М.А.</i>	25
<i>Расчетные исследования снижения средней мощности турбины К-300-240 при качаниях частоты и мощности электрического тока в энергосистеме Волков Н.С.¹, Классен А.Д.², Суханов В.А.²</i>	27
<i>Применение защитных покрытий для увеличения надежности котла при сжигании твердого органического топлива Горбачинский А.Д.</i>	28
<i>Разработка блока газообразного топлива газовых турбин ГТЭ-170 и ГТЭ-65.1 Горынцев М.Г.</i> ...	30
<i>Исследование влияния формы периферийного обвода на эффективность отсека реактивных ступеней ЦВД с учетом протечек Градусов А.Д.</i>	34
<i>Возможность форсирования параметров компрессора ГТУ большой мощности Давлетгареева Е.И.</i>	36
<i>Оценка применения роботизированной сборки сердечника статора на примере турбогенератора Доржиева Б.С.</i>	40
<i>Нейросетевая модель контактного теплообмена для решения задач обеспечения теплового состояния сборных узлов энергетических установок Ежов А.Д., Быков Л.В., Киселев В.П.</i>	43
<i>Роботизированная система обработки лопаток колес гидромашин Елисеев Е.И., Ильин И.В., Дмитриев А.</i>	48
<i>Сравнение подходов к расчету параметров насоса при подрезке рабочего колеса Жохов Н.Ю.</i>	52
<i>Технология изготовления керамических изделий методом аддитивных технологий Зарифжонов Ж.Ф.</i>	55
<i>Формирование подхода к многокритериальной оптимизации осевых компрессоров Золотухин А.С.</i>	58
<i>Инновационные решения комбинированных энергоустановок на базе ГТЭ-65 и топливных элементов Золотухина Е.Ю.</i>	62
<i>Разработка и исследование тринарных парогазовых установок на метано-водородных смесях Зуйкин Р.Е. , Островский М.А.</i>	66
<i>Расчетное исследование выбора рациональной длины и оптимального угла седла регулирующего клапана Зырянов И.В.</i>	69

<i>Определение динамических напряжений в лопастях РО РК Иванов А.А.</i>	70
<i>Анализ и оптимизация параметров утилизационного контура на базе отечественной газотурбинной установки ГТЭ-170.1 Исаков А.А.</i>	73
<i>Высокотемпературные сверхпроводниковые электрические машины для транспортных систем Кадеров В.А., Иванов Н.С.</i>	76
<i>Перераспределение нагрузок потребителей между несколькими центрами питания ТП 6/0,4 кВ для повышения качества электроэнергии Калинин Д.И.¹, Петрушин Д.Е.², Луговская Л.А.²</i>	78
<i>Разработка измерительной системы на основе радиолокационного метода для определения амплитудно-частотных характеристик лопатки Карнычев А.В., Шорохова З.Ф.</i>	82
<i>Управление температурным режимом конструкции на основе проектирования анизотропии тепловых свойств изделий, изготовленных с применением аддитивных технологий Киселев В.П., Ежов А.Д., Быков Л.В.</i>	85
<i>Автоматизированное устройство по переработке пластика в филамент для использования в процессах производства Ковалев В.</i>	89
<i>Разработка решателя трехмерных задач механики деформируемого твердого тела методом конечного элемента в кодах C для исследования напряженно деформированного состояния узлов котлоагрегата Колесников А.А.</i>	92
<i>Экспериментальные исследования и отработка конструкции опорно-упорного подшипника с высокой несущей способностью для газовой турбины ГТЭ-65.1 Кондаков А.С.</i>	95
<i>Лазерный удар — инновационная технология повышения усталостной прочности деталей энергетических установок Королев Д.Д., Кожевников Г.Д., Забенько Е.В.</i>	97
<i>Исследование возможности повышения безопасности эксплуатации электрических устройств, систем и электрических машин Крылов Д.М., Сержантова М.В.</i>	99
<i>Внедрение интеллектуальных автоматов защиты электрических машин Кузьменко Ю.П.</i>	101
<i>Экспериментальное определение усилия затяжки в болтовых соединениях Логвинова А.А.¹, Самохвалов А.Э.²</i>	103
<i>Оценка собственных частот компоновки ГТЭ-65.1 на раме для стендовых испытаний Ляшенко В.К.</i>	106
<i>Разработка системы контроля качества технологического оборудования Ляховский А.С., Порохненко К.А.</i>	109
<i>Методика для оценки ресурса корпусной изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением Маннанов Э.Р., Балыков О.С., Баранов В.С.</i>	110
<i>Разработка конструкции сварной втулки подпятника подвешенного гидрогенератора Чарвакской ГЭС Марков М.А., Шестаков А.О.</i>	114
<i>Упрочнение поверхностей нагрева для увеличения срока службы при сжигании высокообразивного топлива Кунец А.В.</i>	117
<i>Анализ генераторов, применяемых в ветроэнергетических установках Михайлов Е.В., Мадея К.Р.</i>	120
<i>Разработка стенда для диагностики форсунок с применением аддитивных технологий Могильников А.В.¹, Климин С.Н.², Липатов И.А.², Мельцын С.А.², Макаров А.А.², Тимофеев К.М.²</i>	123
<i>Применение подхода прямого моделирования в системе Ansys Spaceclaim для разработки расчетных схем поврежденных деталей турбогенератора Молодчиков С.Е.</i>	127
<i>Применение газовых подшипников в ГТЭ-160 Назаргулов А.Р.</i>	129

<i>Экспериментальное и численное исследование расходных и сепарационных характеристик ячеисто-лункового уплотнения для паровых турбин Никитин И.А.</i>	131
<i>Проектирование металлической спиральной камеры с требуемым углом выхода потока Никулин Д.А.</i>	134
<i>Маркетинг и ценообразование энергетического оборудования Овчинников К.А.</i>	136
<i>Анализ существующих подходов к обратному проектированию турбинных лопаток ГТУ и предложение новой методики реверс-инжиниринга Павлов Н.С.</i>	139
<i>Выбор и обоснование тепловой схемы мобильной газотурбинной установки для электромобилей Парфенов К.А., Барсков В.В.</i>	141
<i>Гибка листового проката сплавов титана на прессах. Оптимизация технологического процесса Пегов В.Д.</i>	144
<i>Устройства измерения полных параметров газа Плодистый М.О.</i>	145
<i>Анализ современных устройств утилизации тепла (УУОТ), работающих на высокотемпературном органическом теплоносителе Попп А.А., Чемисов В.В.</i>	148
<i>Улучшения в конструкции клапана срыва вакуума Порунов А.И.</i>	150
<i>Решетчатые теплообменные аппараты, изготовленные с помощью аддитивных технологий для газотурбинных установок Пулин А.Г.</i>	153
<i>Разработка асинхронного двигателя с массивным ротором с применением сплавов с высокой электропроводностью Раднаев А.Б.</i>	157
<i>Разработка технологии выборочного низкотемпературного упрочнения поверхности штока клапана из материала 15X11МФ Родькина Д.Д.</i>	160
<i>Новые применения реактивной синхронной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора на примере системы электродвижения судна Розбицкий Г.Г.</i>	163
<i>Особенности применения реактивных синхронных машин в ветроэлектрических установках Розбицкий Г.Г.</i>	167
<i>Анализ влияния различных факторов на значения крутильных частот и результаты расчета на внезапное короткое замыкание турбины ПТ-60-130/13 Савиковский А.В.</i>	170
<i>Методы машинного обучения для диагностики неисправностей ветряных турбин: сравнительное исследование Семенов Д.В., Демидова Г.Л.</i>	173
<i>Микрогенерация как альтернативный источник энергии Слепец И.А.</i>	179
<i>Изменение газодинамической устойчивости при износе лопаток компрессора ГТД Стрепетков Р.М.</i>	180
<i>Унификация паровых котлов, работающих на твердом топливе с двухтопливными ПГУ Табаков Д.Н.</i>	183
<i>Стандартизация систем искусственного интеллекта и их практическое применение в предиктивной диагностике Тропинова А.А., Кобзарь Е.Н., Маннанов Э.Р.</i>	185
<i>Исследование характеристик работы проектируемого для сжигания донецкого длиннопламенного угля котла e-530-13.8-560кт в зависимости от нагрузки Уланов Э.А., Березина М.Д., Хохлов Д.А.</i>	197
<i>Создание мобильной системы сбора и обработки данных для испытаний насосного оборудования Утин Д.В., Кузнецов Я.И.</i>	200
<i>Исследование тепловой схемы энергетической установки по циклу Аллама Федоров А.А., Барсков В.В.</i>	203

<i>Разработка базы данных физико-механических свойств диэлектрических материалов торцевых зон турбогенераторов Федотов Н.А.¹, Маннанов Э.Р.²</i>	<i>205</i>
<i>Параметрическое моделирование узла коллектора сливного Харитонова Е.А.</i>	<i>208</i>
<i>Повышение технологичности, ремонтпригодности и эксплуатационной надежности паровой турбины с валопоротным устройством Чуважов Д.И.</i>	<i>211</i>
<i>Анализ аэродинамических свойств расчетных моделей компрессоров ГТЭ-170.1 и ГТЭ-170.2 Шипунов В.В.</i>	<i>213</i>
<i>Модернизация конструкции предохранительного клапана рычажно-грузового типа паровой турбины Шубина Т.В.</i>	<i>215</i>

Разработка прикладного программного обеспечения для выпуска технической документации. Программа для автоматизированной подготовки извещений об изменениях
Александров М.А., Коновалов А.В.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: извещения об изменениях, техническая документация, эксплуатационная документация

Key words: change notices, technical documentation, operational documentation

Актуальность

В настоящее время в мире существует и разрабатывается огромное количество программных средств, направленных на упрощение и оптимизацию рабочих процессов. На заводе «Электросила» разработка извещений об изменениях для текстовых документов выполняется вручную с применением MS Office. В АО «Силовые машины» существует встроенный модуль в Team Center для автоматизированного выпуска извещений об изменениях. Однако, упомянутый модуль в Team Center применим только для чертежей общепромышленной продукции.

Цель работы — разработка программы для ЭВМ для автоматизированной подготовки извещений об изменениях.

Гипотеза

В настоящее время процесс разработки извещений об изменениях выполняется вручную путем заполнения шаблона или при подключении к сети в системе Team Center.

Главными требованиями к извещениям об изменениях являются соответствие их требованиям норм стандартизации и качество их исполнения. Опыт подготовки извещений об изменениях (ИИ) говорит о том, что большую часть времени требуется на форматирование документа, а результатом ошибки в определении атрибутов извещения может быть необходимость повторного переподписания документа. Кроме того, в настоящий момент для реализованные в программе MS Word шаблоны могут быть подвержены деформации при заполнении оператором.

Актуальной задачей является разработка программы для ЭВМ, которая позволит избежать распространенных ошибок при составлении ИИ, привести извещения к единому формату оформления, автоматизировать заполнение форм и содержимого извещений без ручного форматирования, тем самым сократив время их подготовки.

Объектом работы являются извещения об изменениях и программа для ЭВМ.

Для достижения цели требуется:

1. Выполнить анализ норм стандартизации и опыта подготовки ИИ.

2. Выявить основные закономерности и взаимосвязи в структуре извещения об изменениях.

3. Подготовить оборудование и разработать текст программы.

4. Выполнить тестирование работоспособности программы при различных исходных данных.

5. Представить в ГИП 2026 на рассмотрение в инвестиционный комитет с целью поиска источника финансирования, регистрации программы для ЭВМ для постановки бухгалтерский учет и ввода в опытно-промышленную эксплуатацию созданного нематериального актива.

Работа выполнялась с применением **методов информационных технологий**.

Результаты работы

Разработана оригинальная программа для ЭВМ «Мастер извещений».

Новизна и оригинальность работы

Аналогом предлагаемой к разработке программы для ЭВМ на заводе «Электросила» АО «Силовые машины» является модуль в системе Team Center.

Предлагаемое техническое решение разрабатывается на базе пакета MS Office, оно позволит автоматизировать процесс разработки извещений об изменении, исключить возникновение неблагоприятных последствий в результате сетевых сбоев при работе в системе Team Center, минимизировать ошибочные заполнения полей шаблона, заполняемого в соответствии с Правилами внесения изменений согласно внутренним регламентам завода.

Преимуществами разрабатываемого технического решения являются его простота в использовании, портативность решения, позволяющая использовать программу при наличии установленного на рабочем компьютере пакета MS Office (программа не требует установки), независимость программы от подключения к сети, модульность реализации программы (возможность расширения функционала путем введения новых модулей).

Программа на разработку извещений об изменениях.

Ценность работы для компании

Область применения программы для ЭВМ распространяется на конструкторские (в том числе ремонтные и эксплуатационные) и технологические документы, выполненные в бумажной форме.

Программа способствует оптимизации трудозатрат инженеров конструкторских и технологических подразделений завода «Электросила» при выпуске извещений об изменениях.

Перспектива использования результатов работы в компании обоснована применимостью разработки не только для продукции общепромышленного назначения, а также на продукцию специального назначения.

Разработка диафрагм сборной конструкции для паровых турбин

Алексеев Е.А.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: диафрагма, паровая турбина, технологичность, ремонтпригодность, эксплуатационная надежность.

Key words: diaphragm, steam turbine, manufacturability, maintainability, operational reliability.

Актуальной задачей паротурбиностроения в настоящее время является проектирование усовершенствованной конструкции диафрагм. В зонах высокого и среднего давлений диафрагмы подвергаются значительным перепадам давлений и температур, а также значительным изгибающим напряжениям. Воздействие указанных эксплуатационных факторов приводит к частым повреждениям составляющих частей диафрагмы и, следовательно, к недостаточной надежности конструкции диафрагмы. Существует также проблема ремонтпригодности диафрагм, вследствие технических сложностей при замене отдельных вышедших из строя элементов, таких как направляющие лопатки.

Целью данной конструкторской работы является разработка и изготовление сборной диафрагмы, конструкция которой позволит упростить процесс сборки и монтажа, сократить расходы на технологические припуски и исключить силовые сварные швы.

Гипотеза работы заключается в разработке конструкции диафрагмы с минимальным количеством сварочных операций.

Объектом работы является диафрагма сборной конструкции для паровой турбины.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) Анализ существующих конструкций диафрагм и выявление их недостатков.
- 2) Разработка новой конструкции диафрагм с улучшенными характеристиками.
- 3) Расчеты на жесткость и прочность.
- 4) Изготовление изделия по разработанной конструкторской документации (далее

КД).

Методы работы включали разработку 3D-модели изделия, прочностной расчет и выпуск КД в одной из CAD систем.

В результате была разработана и утверждена КД на новую конструкцию диафрагм, которая уже находится на этапе изготовления для проекта модернизации паровой турбины ПТ-80/100-130/13 ТЭЦ-21 ст. № 7 ПАО «Мосэнерго».

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1) Конструкция сборной диафрагмы имеет преимущества по сравнению с существующими типами диафрагм.

2) По результатам эксплуатации может быть принято решение о масштабировании данных узлов на паровые турбины большей мощности.

Новизна и оригинальность работы заключаются в уникальных технических решениях, таких как:

1) Сведение к минимуму количества сварочных операций при изготовлении диафрагмы.

2) Сокращение количества материала, затрачиваемого на изготовление диафрагмы, путем уменьшения технологических припусков.

3) Повышение ремонтпригодности диафрагм за счет возможности замены вышедших из строя элементов, таких как направляющие лопатки.

Ценность работы для компании «Силовые машины» заключается в том, что сборные диафрагмы применены в проект модернизации паровой турбины ПТ-80/100-130/13 ТЭЦ-21 ст. № 7 ПАО «Мосэнерго».

Перспектива использования результатов работы заключается в том, что по результатам эксплуатации может быть принято решение о масштабировании данных узлов на паровые турбины большей мощности. Новая конструкция предполагает сокращение цикла производства, что позволит увеличить количество выпускаемых диафрагм.

Проектирование и изготовление осевого компенсатора

Аюпов Р.Т., Аминев Р.Р., Рашитов И.Р.

АО «Силовые машины», Уфа

Ключевые слова: осевой компенсатор, температурное расширение, стенд для испытаний камер сгорания, телескопическое соединение.

Key words: axial compensator, thermal expansion, combustion chamber test bench, telescopic connection.

В рамках проекта по созданию испытательной станции камер сгорания ГТУ в настоящее время ведутся масштабные работы по проектированию и изготовлению новых узлов отсека для испытаний. Осевой компенсатор является одним из таких узлов, который необходим для обеспечения работоспособности испытательной станции. Осевой компенсатор

предназначен для компенсации температурных расширений узлов отсека для испытаний при сохранении герметичности в подвижной проточной части.

Одной из проблем проектирования осевого компенсатора и любого другого узла отсека для испытаний камер сгорания является температура эксплуатации. Так как объектом испытаний отсека является камера сгорания газотурбинной установки, а температура газов при сгорании топлива превышает 1300°C , то необходимо разрабатывать мероприятия по преодолению ограничения максимальной температуры эксплуатации материалов, из которых изготавливаются узлы отсека. Примером таких мероприятий является внедрение водяной или воздушной систем охлаждения или обеих систем одновременно, как это и было выполнено в осевом компенсаторе. Кроме того, осевой компенсатор подвергается воздействию избыточного давления в 1,6 МПа. Такие условия эксплуатации, в дополнение с подвижными соединениями, исключают возможность покупки готового изделия и открывают возможность специалистам спроектировать новое. При всех прочих условиях необходимо избегать сложных технических решений для сокращения сроков проектирования и изготовления, а также минимизировать производственный брак.

Проектирование осевого компенсатора затронуло широкий спектр конструкторских и технологических направлений, и в ходе работы были выполнены тепловой, гидравлический, прочностной и газодинамический расчеты. Детали осевого компенсатора выполнены из различных видов заготовок: поковки и кольца, тонкий и толстый листовой прокат, трубы и прутки. А наличие сварных соединений деталей из различных материалов и термозащитных покрытий некоторых поверхностей осевого компенсатора привлекло сварщиков и металлургов.

Таким образом, симбиоз специалистов позволил спроектировать, изготовить и испытать осевой компенсатор менее чем за 1 год. На сегодняшний день осевой компенсатор (рис. 1) установлен и работает в составе стенда для испытаний камер сгорания.

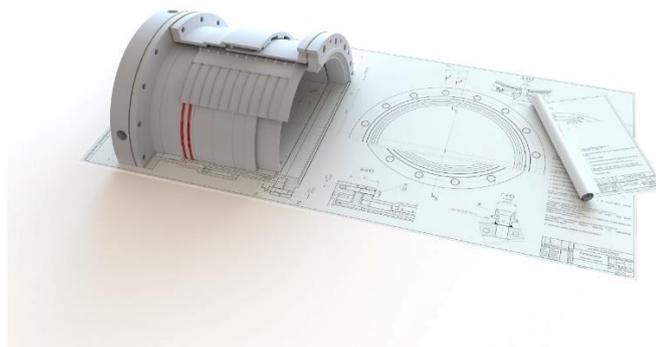


Рис. 1. Осевой компенсатор

После введения в эксплуатацию осевого компенсатора в составе испытательной станции стало понятно наличие зарубежного аналога, который также имеет подвижное телескопическое соединение и воздушную и водяную системы охлаждения. Это значит, что спроектированный осевой компенсатор является верным решением проблемы температурного расширения узлов отсека для испытаний камер сгорания и может стать полезным для тех компаний, которые занимаются испытаниями горячих частей энергетических машин.

В связи с тем, что испытательная станция подобного рода является единственной в России, каждый разработанный, изготовленный и испытанный узел является шагом к лидерству АО «Силовые машины» на рынке.

Считаю, что разработки подобного рода, помимо решения производственных задач, дают возможность почувствовать себя причастным к делу и цели, ради которой хочется приходить на работу.

Применение параметрической оптимизации для улучшения массовых характеристик деталей гидротурбины на примере крышки ПЛ 30

Баранова А.А.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, крышка гидротурбины, оптимизация по поверхности отклика, ANSYS DesignXplorer.

Keywords: parametric optimization, turbine headcover, response surface optimization, ANSYS DesignXplorer.

В последние годы при создании различных конструкций, механизмов, агрегатов, в том числе и гидротурбин, большое внимание уделяется их проектированию с оптимальными характеристиками. Под оптимальным проектированием подразумевается такое назначение характеристик конструкции, несущей заданные нагрузки, при котором она в определенном смысле будет наилучшей из всех конструкций рассматриваемого типа. Для таких задач проектирования с целью экономии времени и получения эффективных решений часто используются методы оптимизации [2], [3]. Гипотезой работы является то, что изменение изначальных размеров и толщин некоторых частей конструкции может снизить ее вес, сохраняя требования по прочности. В качестве объекта исследования выбрана крышка гидротурбины ПЛ 30.

Целью работы является снижение массы крышки гидротурбины с верхним кольцом НА с сохранением показателей прочности. Таким образом, требуется определить структурные (проектные) параметры модели, при которых обеспечивается минимум целевой функции (в

данном случае массы) и выполняется ограничение по прочности — максимальные допускаемые эквивалентные напряжения по Мизесу не превышают 160 МПа [1].

Задачами исследования являются:

- а) проведение расчета с исходными параметрами, определение исходного НДС;
- б) построение упрощенной модели крышки турбины в ПО ANSYS;
- в) выбор входных и выходных параметров и критериев для проведения оптимизации;
- г) проведение оптимизации;
- д) проведение расчета на прочность с новыми подобранными параметрами, анализ полученных напряжений.

Создание геометрической параметрической модели крышки гидротурбины ПЛ 30 с верхним кольцом осуществлялось в SpaceClaim. На рис.1 показана геометрическая модель с указанием параметров, являющимися входными для процесса оптимизации.

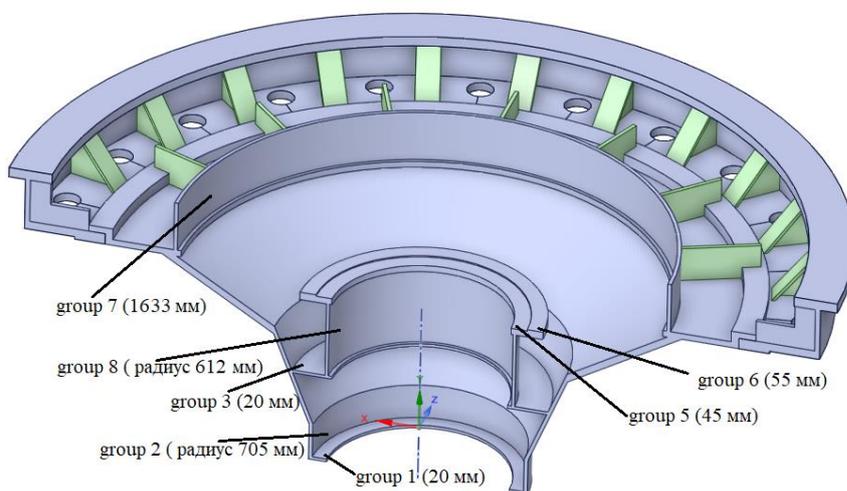


Рис. 1. Исходная геометрическая модель и группы параметров крышки турбины с верхним кольцом НА

Выходными параметрами (т. е. параметрами, которые получаются после решения статической задачи) были масса (в начале 8592.6 кг) и максимальные значения напряжений по Мизесу (в начале 147.9 МПа). При помощи системы DesignXplorer и модуля Response surface optimization выбраны точки с определенными наборами входных параметров и определен план проведения экспериментов, составлена поверхность отклика для дальнейшей оптимизации.

Следующим шагом происходил поиск «наилучшего» возможного варианта конструкции с учетом ограничений на набор параметров. Оптимизация проводилась с помощью трех различных методов: screening, MISQP, MOGA. Встроенные методы оптимизации ПО ANSYS для уменьшения масс основных деталей гидротурбин были применены впервые в СКБ «Гидротурбомаш» в данной работе.

ПК ANSYS, используя поверхность отклика, сгенерировал наборы вариантов конструкции и отобрал наиболее перспективные варианты-кандидаты. После завершения

оптимизационного процесса были получены наборы кандидатов для каждого метода. Далее, сравнивая все точки — претенденты между собой по выходному параметру «масса», была выбрана точка с минимальным значением по данному параметру. Затем модель с выбранными параметрами верифицировалась методом конечных элементов. Полученные максимальные напряжения равны 147.34 МПа, а масса — 8257 кг. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в крышке турбины с верхним кольцом НА после процедуры оптимизации показано на рис. 2.

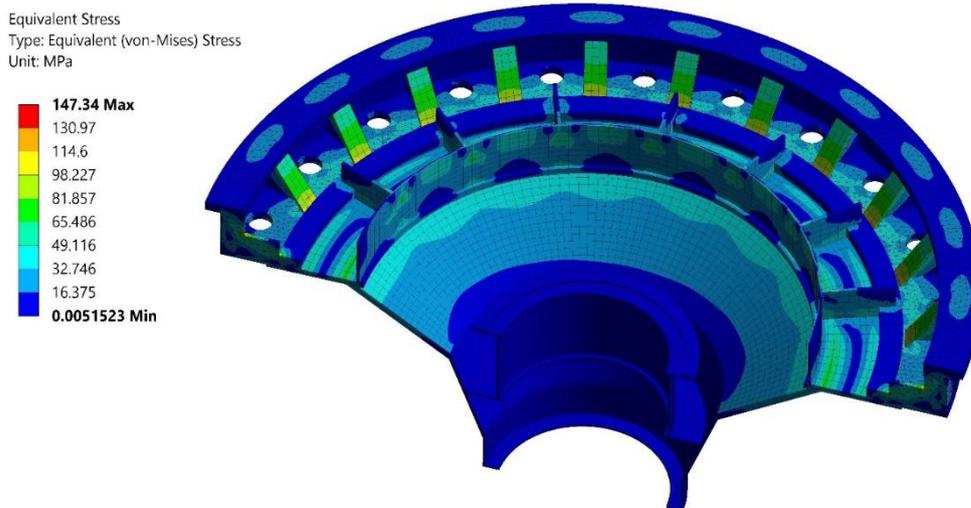


Рис. 2. Поле эквивалентных напряжений в крышке турбины после процесса оптимизации

В ходе работы была проведена оптимизация геометрических параметров крышки с верхним кольцом гидротурбины ПЛ 30. Результатом проведенной работы стала конструкция с улучшенной массовой характеристикой при сохранении норм допускаемых напряжений.

Таким образом, проектирование различных узлов гидротурбин может осуществляться с учетом решения задач оптимизации, что в будущем представит материальную выгоду для компании.

Список использованных источников:

1. РД 108.023.115-87. Нормы допускаемых напряжений в основных деталях вертикальных гидравлических турбинах. Методические указания.
2. Кренин А.В., Куликова Е.Е., Булыгин К.Д. Оптимизация конструкции теплообменного аппарата методами вычислительной гидромеханики // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2015. — 64 с.
3. Jin Xiangjie, Zhang Cai, Wang Chong. Response surface optimization of machine tool column based on Ansys Workbench// Academic journal of manufacturing engineering, vol.18, 2020.

**Разработка многокритериального метода оптимизации
для проектирования электрических машин**

Бекузин В.И.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, множество Парето, попарная группировка, целевая функция, электрические машины.

Key words: multicriteria optimization, Pareto set, pairwise grouping, objective function, electrical machines.

Основная задача любого расчетного-конструкторского бюро — быстрое и корректное выполнение расчетных технических заданий. Любая расчетная методика с математической точки зрения является массивной системой уравнений с множеством входных и выходных параметров. При решении на выходе может получиться множество различных конструкций, в частности, конструкций электрических машин, отвечающих требованиям технического задания. Как правило, выбор конечной конструкции после проведения расчетов остается за инженерами конструкторского бюро, которые, используя опыт проектирования и учитывая экономические, технологические, массогабаритные показатели разрабатываемого изделия, принимают проектные решения. Данный выбор не всегда наилучший в силу ограниченного количества сравниваемых вариантов.

Целью данной работы является разработка многокритериального метода оптимизации для проектирования электрических машин. В качестве объекта исследования был выбран ударный генератор (УГ), который по типу является турбогенератором с косвенным воздушным охлаждением. При расчете были использованы известные расчетные методики турбогенераторов [1, 2, 3], применимые для расчета УГ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: разработка многокритериального метода оптимизации (что является новизной данной работы), использующего теорему Сужения множества Парето на основе взаимозависимой информации [4], выборку предпочтений в цикле и попарную группировку для сужения множества Парето при большом количестве целевых функций; определение требований и граничных условий, предъявляемых к УГ, на основании которых определены целевые функции; проведение расчета УГ с помощью разработанного многокритериального метода оптимизации.

Для определения оптимальных параметров УГ использована теорема Сужения множества Парето на основе взаимозависимой информации [4], суть которой состоит «в построении оценки сверху для множества выбираемых решений за счет последовательного сужения множества Парето».

Затем введена попарная группировка целевых функций, после которой выбрана главная оптимизационная пара, образующая фронт Парето. Затем целевые функции были разделены на две группы: группа A , которую необходимо минимизировать; группа B , которую можно максимизировать (увеличивать) ради уменьшения значений целевых функций группы A .

Далее описанный метод был использован для оптимального проектирования УГ. На основании работ [1, 2, 3] можно выделить следующие требования, предъявляемые к УГ: максимальная возможная ударная мощность короткого замыкания (КЗ), минимальные масса, габариты и минимальные тепловыделения УГ. Для повышения ударной мощности КЗ необходимо минимизировать индуктивное сверхпереходное сопротивление x_d'' , которое обратно пропорционально объему V_a активной части. Объем активной части в свою очередь, определяется ее геометрией.

Был произведен выбор целевых функций и оптимизационный расчет методом ГА. В результате работы ГА было получено 175 расчетных точек.

Дальнейшее использование предлагаемого метода позволило сузить количество расчетных точек до четырех оптимальных, удовлетворяющих вышеописанным условиям.

В таблице 1 представлены сводные параметров УГ для найденных четырех расчетных точек, откуда видно, что оптимальной точкой будет являться точка № 2, т. к. она имеет наименьшие значения x_d'' и V_a . За 1 о. е. принята референсная машина УГ.

Таблица 1. Результаты сужения множества Парето

Параметры	Значение после сужения множества Парето			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Индуктивное сверхпереходное сопротивление x_d'' , о. е.	1,044	0,952	0,925	0,937
Объем активной части (V_a), о. е.	0,812	0,861	0,876	0,872
Активная длина (L_a), о. е.	0,998	1,033	1,051	1,046
Воздушный зазор, о. е.	1,200	1,200	1,200	1,200
Внутренний диаметр статора, о. е.	0,914	0,957	0,957	0,941
Внешний диаметр статора ($D_{вн}$), о. е.	0,902	0,913	0,913	0,913
Высота паза статора, о. е.	1,029	0,912	0,912	0,970
Ширина паза статора, о. е.	0,853	0,971	0,971	0,912
Высота паза ротора, о. е.	1,044	1,079	1,072	1,092
Ширина паза ротора, о. е.	1,024	1,034	1,062	1,026
Плотность тока обмотки статора ($j_{ст}$), о. е.	1,024	1,011	1,011	1,004
Плотность тока обмотки возбуждения, о. е.	0,837	0,862	0,805	0,742
Количество пазов статора, о. е.	1,167	1,167	1,167	1,167
Количество пазов ротора, о. е.	1,2	1,1	1,1	1,2
Количество пазовых делений ротора, о. е.	1	0,941	0,941	1

Таким образом, предложенный многокритериальный метод оптимизации, использующий теорему Сужения множества Парето на основе взаимозависимой информации [4], выборку предпочтений в цикле и попарную группировку для сужения множества Парето

при большом количестве целевых функций, позволяет быстро и математически точно сузить область Парето и найти оптимальные конструкции электрических машин. Метод был апробирован на примере УГ, где из 175 расчетных точек были найдены 4 оптимальные, параметры которых заметно превосходят референсный УГ. Метод имеет высокий потенциал для внедрения в расчетных отделах конструкторских бюро.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю — д.т.н. Коровкину Н.В. — за помощь в написании работы.

Автор выражает благодарность за помощь в написании работы начальнику СКБПТ Железняку В.Н.

Список использованных источников:

1. Железняк В.Н., Коровкин Н.В. Повышение мощности ударных генераторов для обеспечения эксплуатационных режимов // Электричество. — 2022. — № 11. — С. 46–55.
2. Савченко Е.В. Ток в демпферном контуре турбогенератора в режиме ударного возбуждения. // Электричество. — 2017. — № 12. — С. 18–25.
3. Антонюк О.В., Арсеньев И.А., Кади-Оглы И.А., Сидельников А.В., Сидельников Б.В. Методика проектирования турбогенераторов с продольно-поперечным возбуждением, основанная на использовании магнитных схем замещения // Электричество. — 2013. — № 7. — С. 36–40.
4. Климова О.Н. Сужение множества Парето на основе взаимозависимой информации с использованием нелинейных функций // Экономика. Информатика. — 2009. — № 9 (64). — С. 152–159.

Интегральный и позонный расчет топки котла при работе на дизельном топливе

Березина М.Д., Уланов Э.А., Зайченко М.Н.

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Ключевые слова: паровой котел, топка, дизель, позонный расчет топки.

Использование дизельного хозяйства в качестве резервного топлива на сегодняшний день является актуальным и эффективным решением. Данный вид топлива требует малых затрат на его содержание, является более экологически чистым по сравнению с мазутом.

На сегодняшний день при расчете процессов теплообмена топок паровых котлов по нормативной методике [1] рассматриваются только уголь, газ и мазут. Несмотря на то, что дизель также является жидким топливом, он все же отличается своими свойствами (теплотворная способность, плотность, вязкость) от мазута. Основная задача — исследовать работу топочной камеры при сжигании дизельного топлива.

Объектом исследования был выбран башенный паровой котел Еп-620/553.4-13.8/3.25-545/545ГД. Основным топливом является природный газ, резервным — дизельное топливо.

При интегральном и позонном расчетах топки выбираются коэффициент тепловой эффективности экранов ψ_i и коэффициент усреднения m . Изменение последнего значительно влияет на результаты расчетов в отличие от ψ_i . Поэтому для определения характеристик работы топки при сжигании дизеля в соответствии с рекомендациями [1] было проведено два расчета со значениями m , соответствующим значениям при сжигании газа и мазута.

На рисунке 1 отображены графики распределения тепловых напряжений и температур на выходе из зон по высоте топки. Проведенные расчеты показали, что разница температур на выходе из топки может достигать 50°C . Это может привести к пережогу труб первых поверхностей нагрева по ходу газов. Следует отметить, что в современных котлах применяются различные внутритопочные мероприятия, направленные на снижение выбросов вредных веществ. Их внедрение сопровождается затягиванием процесса горения и, как следствие, увеличением температуры газов на выходе из топки. Таким образом, следует провести углубленные исследования топочного процесса при сжигании дизельного топлива, в том числе с применением трехмерного моделирования.

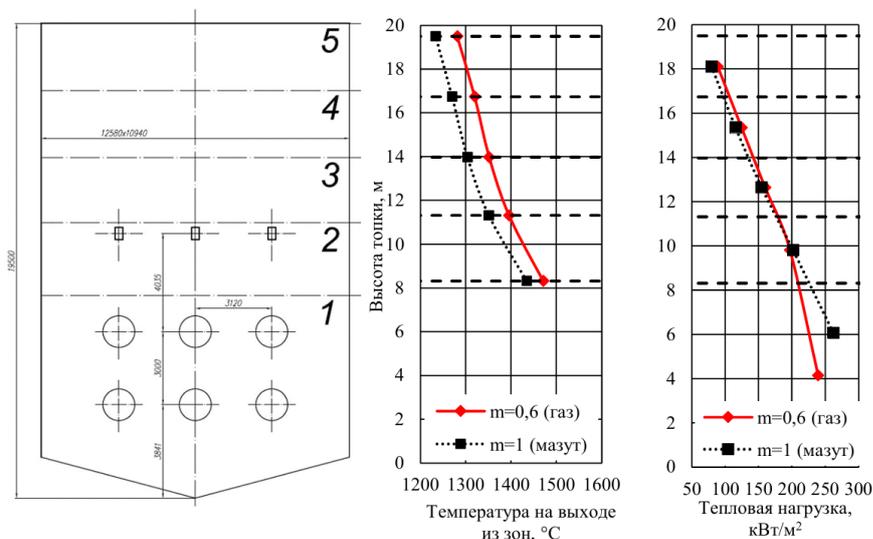


Рис. 1. Результаты позонного расчета топки

Список использованных источников:

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973.

Разработка концепции ГТУ с силовой турбиной мощностью до 80 МВт Бобрик А.А.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: газотурбинная установка, силовая турбина, эффективность
Key words: gas turbine propulsion, power turbine, efficiency

В АО «Силовые машины» на данный момент проектируются газотурбинные установки одновальной схемы с приводом электрического генератора от мощности, вырабатываемой на валу. В диапазоне мощности до 80 МВт на предприятии реализуется изделие ГТЭ-65.1, где используется редуктор, понижающий частоту вращения вала до частоты сети, на которой работает электрогенератор. Применение ГТУ с силовой турбиной (ГТУ СТ) может обеспечить необходимую для электрогенератора частоту вращения без редуктора, что является одним из преимуществ применения ГТУ данной схемы по сравнению с одновальной. Также ГТУ СТ можно использовать и для других потребителей энергии за счет широкого диапазона изменения частоты вращения силовой турбины.

Среди вариантов применения ГТУ СТ в исследовании рассматриваются следующие:

- привод электрогенератора с постоянной частотой вращения и изменяющейся мощностью;
- работа на нагнетатель при изменяющихся частотах вращения и мощностях;
- применение на заводах СПГ с выработкой постоянной мощности при изменяющейся частоте вращения.

Цель исследования — разработка концепции и оценка термодинамических параметров ГТУ со свободной (силовой) турбиной и унифицированным газогенератором на основе наработок по ГТЭ-65.1.

Унификация газогенератора подразумевает, что компрессор и камера сгорания остаются идентичными ГТЭ-65.1, а узлы турбины изменяются — вместо одной турбины ГТЭ-65.1 проектируется две турбины, газогенератора и силовая. Также в газовоздушный тракт добавляются канал между турбинами и выходной патрубком за силовой турбиной.

Гипотеза исследования заключается в том, что использование ГТУ СТ при общей эффективности не менее, чем у ГТЭ-65.1, может оказаться более выгодным с точки зрения количества возможных потребителей (нагнетатель, генератор, СПГ).

Объект исследования — ГТУ со свободной (силовой) турбиной.

Методы исследования — построение математической модели ГТУ СТ в программном комплексе ThermoGTE и проведение ряда термодинамических исследований для определения основных параметров ГТУ и показателей эффективности.

На основе ГТЭ-65.1 создана математическая модель ГТУ СТ и увязана таким образом, что положение рабочей точки на характеристике компрессора и температура перед турбиной соответствуют параметрам номинального режима ГТЭ-65.1 в условиях ИСО, а мощность силовой турбины равна избыточной мощности на валу ГТЭ-65.1, что обеспечивается подбором потребных КПД турбин.

По результатам увязки получено, что при идентичных параметрах компрессора, камеры сгорания, уровне отборов воздуха на охлаждение турбин и с учетом дополнительных потерь давления в тракте между турбинами и выходном патрубке для обеспечения идентичной валовой мощности и уровня эффективности ГТУ СТ КПД обеих турбин должны быть увеличены не более, чем на 0,5% от уровня КПД турбины ГТЭ-65.1. В случае применения ГТУ СТ для привода электрогенератора недостаток КПД турбин компенсируется отсутствием редуктора, соответственно, отсутствием потерь энергии в его трансмиссии.

Также в работе рассчитаны предварительные климатические характеристики работы ГТУ СТ для различных типов потребителей.

Основные выводы по исследованию:

- ГТУ СТ с приводом электрогенератора обеспечивает уровень валовой эффективности ГТЭ-65.1 при повышении КПД турбин до 0,5% от уровня КПД турбины ГТЭ-65.1;

- уровни вышеуказанных КПД для обеих турбин достижимы, а для силовой возможно добиться и большей эффективности за счет того, что она работает на более низких температурах;

- для определения закона регулирования ГТУ СТ необходимо уточнение характеристики силовой турбины, которая значительно отличается от характеристики турбины газогенератора (в первом приближении характеристика силовой турбины была получена масштабированием характеристики турбины ГТЭ-65.1);

- на дальнейших этапах проработки будет уточнен конструктивный облик ГТУ СТ (в том числе, проточной части канала между турбинами, силовой турбины и ее опоры).

Новизна работы заключается в освоении и проработке ГТУ по схеме, которая на АО «Силловые машины» ранее не реализовывалась.

Ценность и перспективы использования в компании — возможность разработки конкурентно способного изделия широкого применения в классе мощности, не имеющем аналогов на внутреннем рынке.

Применение PFMEA-анализа потенциальных отказов как метода повышения качества изготовления диска подпятника

Богданова Н.А.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: диск подпятника, PFMEA-процесс, качество, гидрогенератор

Key words: podpyatnik disk, PFMEA-process, quality, hydrogenerator

Деталь гидрогенератора вместе с сегментами образует узел трения подпятника. Диск подпятника закреплен на втулке подпятника. Для предотвращения возникновения токов в подшипниках между втулкой подпятника и диском применяется изолирующий материал.

«Зеркальная» сторона диска называется поверхностью трения.

Основная трудность заключается в обеспечении требуемой шероховатости Ra 0,32 мкм, контроле толщины диска и требования к допускам формы, расположения и суммарные допуски формы и расположения (плоскостности, параллельности и биения).

На основе полученных АИК-отчетов была создана команда (в составе — главный специалист ОТПП, руководитель группы ГТК, начальник отдела по обеспечению надежности, конструктор, зам. главного технолога и технолога ОГТ) для уменьшения количества несоответствий примерно на 50 % по сравнению с 2024 годом, а также снижения затрат на их устранение. Это планируется достичь путем использования метода FMEA на этапе конструкторско-технологической подготовки производства всего ассортимента продукции АО «Силовые машины». Была составлена дорожная карта и определены основные параметры, проведен анализ PFMEA, разработан план управления на основе результатов PFMEA.

Цель работы заключается в уменьшении количества несоответствий примерно на 50% по сравнению с 2024 годом, а также снижении затрат на их устранение. Это планируется достичь путем использования метода FMEA на этапе конструкторско-технологической подготовки производства всего ассортимента продукции АО «Силовые машины».

Гипотеза работы заключается в предположении, что использование метода FMEA на этапе конструкторско-технологической подготовки производства позволит уменьшить количество несоответствий примерно на 50% по сравнению с 2024 годом.

Объект работы — диск подпятника.

Задачи работы:

1. Анализ существующих методов и подходов к обеспечению качества и снижению количества несоответствий на производстве.

2. Изучение опыта применения метода FMEA для улучшения процессов конструкторско-технологической подготовки и управления качеством продукции на примере АО «Силовые машины».

3. Определение основных проблем и трудностей, связанных с обеспечением требуемой шероховатости Ra 0,32 мкм, контролем толщины диска и его допусков.

4. Разработка рекомендаций по улучшению процесса контроля качества и устранению несоответствий на этапе конструкторско-технологической подготовки производства.

5. Оценка эффективности применения метода FMEA для уменьшения количества несоответствий, а также снижения затрат на их устранение.

Методы работы — PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis) — систематический подход к выявлению и оценке потенциальных неудач в технологических процессах, а также к определению мер по их минимизации. Основные методы и этапы, применяемые при проведении PFMEA, включают:

- сбор команды,
- определение границ процесса,
- создание блок-схемы процесса,
- идентификацию потенциальных отказов,
- анализ последствий и причин,
- рекомендации по улучшению и контролю,
- документирование,
- мониторинг и пересмотр.

Эти методы помогают повысить надежность процессов и снизить вероятность возникновения проблем, улучшая общее качество продукции и удовлетворенность клиентов.

Результаты работы — использование метода FMEA на этапе конструкторско-технологической подготовки производства позволяет уменьшить количество несоответствий примерно на 50 % по сравнению с 2024 годом и снизить затраты на их устранение.

Основные выводы по проделанной работе — для достижения целей по сокращению несоответствий необходимо составить дорожную карту, определить основные параметры, провести анализ PFMEA и разработать план управления на основе результатов PFMEA.

Новизна и оригинальность работы заключаются в использовании нового подхода к производству и уменьшения количества несоответствий.

Ценность работы заключается в оптимизации процесса конструкторско-технологической подготовки производства и снижении затрат на устранение несоответствий.

Использование метода FMEA позволяет выявить потенциальные проблемы и принять меры для их предотвращения.

Перспектива использования результатов работы:

- 1) оптимизация процесса конструкторско-технологической подготовки производства;
- 2) снижение затрат на устранение несоответствий;
- 3) снижение количества несоответствий при изготовлении продукции.

Список использованных источников:

1. ГОСТ Р 27.303-2021 Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. - М.: Российский институт стандартизации, 2021. — 66 с.
2. Назаревич С.А. Проблемы применения показателей результативности и ключевых показателей эффективности для организационной системы // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2. № 4. С. 16–22.
3. Павленко Н.А. Совершенствование процессов управления качеством с использованием цифровых технологий // Профессиональная ориентация. 2024. № 4–1. С. 72–74.

Модернизация паротурбинных установок ТЭС типа ПТ мощностью свыше 60 МВт

Бондаренко Н.Н.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Актуальность. В связи с ростом населения и увеличением производственных мощностей города возникает необходимость в увеличении количественного показателя выработки электроэнергии [1]. Для увеличения номинальной и максимально-возможной электрической мощности паротурбинной установки (ПТУ) типа ПТ, существующей в населенном пункте, предлагается комплекс мероприятий по ее модернизации с минимальными капитальными затратами.

Методы исследования. Определение расчетных значений для проектирования проточной части (ПЧ) увеличенной пропускной способности с помощью методики расчета, применяемой на ЛМЗ [2]. Расчет ПЧ ведется по среднему диаметру с определением распределения параметров вдоль радиуса в соответствии с выполненными углами выхода из лопаточного аппарата. Газодинамические и прочностные расчеты ПЧ, выхлопного патрубка паровой турбины, коллектора, соединяющего патрубков с дополнительным конденсатором и

дополнительный конденсатор, производится в коммерческой комплексной программной системе ANSYS.

Цель модернизации. Увеличение показателя номинальной и максимальной мощности ПТУ и повышение ее надежности.

Для увеличения мощности на клеммах генератора паровой турбины ПТ-80/100-130/13 с двухступенчатым теплофикационным отбором (ТО) был проведен комплекс мероприятий:

- увеличение пропускной способности цилиндра среднего и низкого давления (ЦСНД) паровой турбины за счет модернизации ПЧ без замены наружного корпуса [3];
- замена регулирующих клапанов ЦСНД с возможностью пропуска большего массового расхода пара;
- перевод существующего подогревателя сетевой воды с верхнего ТО на конденсацию отработавшего пара с помощью соединения выхлопного патрубка паровой турбины специальным коллектором малого сопротивления и включение в тепловую схему дополнительного эжектора.

На рис. 1 представлены зависимости максимальной мощности на клеммах генератора от давления в производственном отборе. В результате модернизации максимальная мощность ПТУ выросла на 15,8%. Рост максимальной мощности относительно аналогичной модернизации без дополнительного конденсатора составил 1,8%.

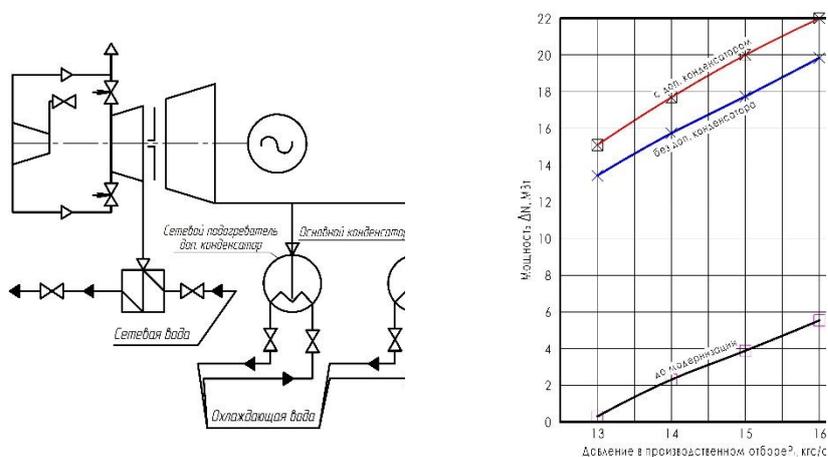


Рис. 1. Тепловая схема ПТУ с двухступенчатым ТО после модернизации (слева) и зависимости максимальной мощности от давления в производственном отборе (справа)

Для турбин типа ПТ-60/70-130/13 с одноступенчатым ТО [4] также предлагается применить модернизацию с увеличением максимального массового расхода через ПЧ ЦСНД и переводом сетевого подогревателя на конденсацию с возможностью работы ТО на стационарный коллектор пара.

На рис. 2 представлены зависимости максимальной мощности на клеммах генератора от давления в производственном отборе. В результате модернизации максимальная мощность паротурбинной установки вырастет на 10,7%. Рост максимальной мощности относительно аналогичной модернизации без дополнительного конденсатора составит 1,2%.

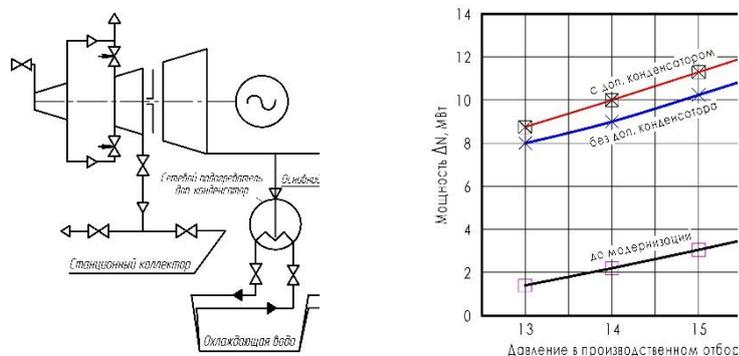


Рис. 2. Тепловая схема ПТУ с одноступенчатым ТО после модернизации (слева) и зависимости максимальной мощности от давления в производственном отборе (справа)

Список использованных источников:

1. Проект энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс]: энергетическая стратегия. — Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1920>
2. Гаев В.Д. Повышение экономичности паровых турбин за счет оптимального проектирования проточных частей/ Дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1984. — 184 с.
3. Осипов, С. Е. Расчетно-экспериментальное исследование вариантов проточных частей ЦНД с целью повышения их пропускной способности [Текст]: дис... канд. тех. наук. — Москва, 2019. — 200 с.
4. Турбины тепловых и атомных электрических станций: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. И доп./А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, 276 А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. М.: Издательство МЭИ. 2001. — 488 с.

Современные принципы проектирования системы маслоснабжения паровых турбин производства ЛМЗ Власенко М.А.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: система маслоснабжения, проектирование узлов, разработка схем и принципов маслоснабжения паровых турбин производства ЛМЗ.

На примере системы маслоснабжения паровых турбин ЛМЗ рассмотрен широкий круг вопросов проектирования и эксплуатации систем регулирования и смазки, динамики этих систем, возможностей их совершенствования и модернизации, в том числе путем расширения

доли электроники. Приводится анализ элементов системы маслоснабжения, что может быть использовано как при проектировании, так и модернизации турбин различного типа.

Имеющаяся в докладе информация позволяет более подробно ознакомиться со специальными вопросами системы маслоснабжения паровых турбин ЛМЗ.

Система маслоснабжения играет большую роль в работе турбоустановки. Она предназначена для подачи масла на смазку подшипников турбины и генератора во всех режимах работы турбоустановки, включая режимы пуска и останова турбины и режимы нарушения нормальной эксплуатации, если эти нарушения не приводят к потере работоспособности системы.

Проектируемая система должна обеспечивать:

- подачу необходимого количества масла к опорным подшипникам турбины и генератора, а также к упорному подшипнику;
- подачу масла к подшипникам турбоагрегата при аварийном останове турбины в случае потери напряжения собственных нужд;
- поддержание давления и температуры масла, подаваемого к подшипникам и на регулирование, в требуемых пределах;
- поддержание требуемого качества масла, включая механическую очистку масла, удаление воздуха, растворенного в масле;
- предотвращение выхода масляных паров в машинный зал.

На основании изложенного, можно сделать вывод о том, что тема работы является актуальной.

Разработка рекомендаций по повышению надежности работы системы маслоснабжения паровых турбин производства ЛМЗ. В рекомендациях реализованы принципы проектирования узлов системы маслоснабжения с учетом импортозамещения, собственных разработок и схемного подхода, с учетом прямых и обратных связей между элементами системы. Учитываются данные по динамическим характеристикам подшипников, турбулентности в смазочном слое, пожароопасности масляных систем, старению масла и эксплуатации различных масел в системе.

Вышеуказанные рекомендации и подход успешно реализуются в проектировании узлов системы маслоснабжения паровых турбин производства ЛМЗ.

Список использованных источников:

1. Казанский В.Н. Система смазывания паровых турбин. / В.Н. Казанский. — Москва.: «Издательство Энергоатомиздат», 1986 г. — 152 с.: ил.

2. Фрагин М.С. Регулирование и маслоснабжение паровых турбин. Вопросы проектирования, наладки и эксплуатации. / М.С. Фрагин. — СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания «Коста», 2011. — 400 с.: ил.

Расчетные исследования снижения средней мощности турбины К-300-240 при качаниях частоты и мощности электрического тока в энергосистеме

Волков Н.С.¹, Классен А.Д.², Суханов В.А.²

¹АО «Силовые машины», ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: система автоматического регулирования, несимметрия САР, качания частоты и мощности в энергосистеме

Keywords: automatic control system, asymmetry of automatic control system, frequency and power fluctuations in the power system

Среди требований, предъявляемых к системам автоматического регулирования (САР) турбин, важное место занимает группа требований, обусловленных работой этих турбин в энергосистеме. В эту группу входят требования, регламентирующие поведение САР при качаниях частоты и мощности в энергосистеме.

Исходя из наличия в САР различных временных несимметрий такие качания частоты и мощности приводят к снижению средней мощности турбин. В частности, к таким несимметриям относится различие в скоростях закрытия и открытия регулирующих клапанов (РК) части высокого давления (ЧВД). При этом, согласно правилам функционирования энергетических систем, средняя мощность турбины не должна выходить из диапазона 75–105% от номинальной мощности [1]. На основании изложенного, можно сделать вывод о том, что тема работы является актуальной.

Цель исследования. Определение рациональных значений времени открытия клапанов ЧВД, соответствующих границе перехода к более значительному снижению средней мощности при различных параметрах качаний частоты электрического тока в энергосистеме. Объектом исследования является САР турбины К-300-240 производства ЛМЗ, а предметом исследования — снижение средней мощности турбины. Расчетные исследования проводились в программном пакете MATLAB Simulink.

На разработанной S-модели системы автоматического регулирования были проведены расчетные исследования снижения средней мощности турбины, при которых параметры качаний частоты имели следующие значения: базовая частота — 50 Гц; амплитуда колебаний частоты — 0,1 Гц, 0,2 Гц и 0,3 Гц [2]; период колебаний — 3,14 с, 6,28 с, 9,42 с [3]. Вместе с тем, время закрытия РК ЧВД оставалось постоянным и равнялось 0,15 с; время открытия изменялось от 0,15 с до 1,5 с с дискретностью 0,1 с.

Выводы. Разработана S-модель САР паровой турбины К-300-240 ЛМЗ, которая может быть использована для оценки запасов устойчивости рассматриваемой системы. Получены значения скорости открытия регулирующего клапана, при которых скорость падения средней мощности турбины К-300-240 ЛМЗ уменьшается, ее рекомендуемые значения менее 1 секунды.

Список использованных источников:

1. Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 № 937 (ред. от 30.12.2022) «Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации». — М.: Стандартинформ, 2018. — 166 с.

2. ГОСТ Р 55890-2013 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования. – М.: Стандартинформ, 2014. — 23 с.

3. Фрагин М. С. Регулирование и маслоснабжение паровых турбин. Вопросы проектирования, наладки и эксплуатации. / М. С. Фрагин. – СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания «Коста», 2011. — 400 с.: ил.

**Применение защитных покрытий для увеличения надежности котла
при сжигании твердого органического топлива**

Горбачинский А.Д.

ПАО ТКЗ «Красный котельщик», Таганрог

Ключевые слова: защитные покрытия, надежность, методы нанесения защитных покрытий.

Key word: protective coatings, reliability, methods of applying protective.

Во многих случаях процесс сжигания сопровождается высоким уровнем износа элементов конструкций котла. Надежность котлов, работающих на органическом топливе, является одной из ключевых проблем. Одним из перспективных направлений в решении этой проблемы является применение защитных покрытий.

Котлы, работающие на твердом органическом топливе, подвергаются значительным физическим и химическим воздействиям в процессе своей эксплуатации. Высокие температуры, агрессивные продукты сгорания и механические нагрузки способствуют образованию коррозионных и абразивных повреждений на внутренних и наружных поверхностях нагрева котла. Эти факторы негативно влияют на его эффективность и срок службы, что подтверждает необходимость поиска эффективных методов защиты.

Защитные покрытия представляют собой один из способов увеличения надежности котлов. Они могут обеспечивать защиту от механического износа. Разнообразие материалов и технологий, используемых при нанесении покрытий, открывает новые перспективы для проведения экспериментальных исследований и практического применения. Существует множество материалов для защитных покрытий, именно поэтому к ним выдвигаются особые требования: сохранение свойств покрытий во время эксплуатации, отсутствие химического воздействия на границе подложка-покрытие, близость коэффициентов термического расширения покрытия и основы, высокая термостойкость, высокая стойкость к окислению, сохранять адгезию к основному материалу.

Исходя из требований к защитным материалам на сегодняшний день вызывает интерес материалы и покрытия на основе композиционных материалов. В АлтГТУ им. И.И. Ползунова проводятся исследования методов получения МАХ-фаз в системе Ti-Al-C [2].

Полученный материал является керамикой, имеющей пластичность более соответствующей свойствам металла. так и. подойдут для защиты узлов котлов и высокотемпературной фурнитуры.

Как металлы обладают высокими теплопроводностью, стойкостью к резким сменам температур без ухудшения свойств и разрушению, пластичностью при высоких температурах, возможностью механической обработки. Как керамические материалы стойки к окислению, усталостным нагрузкам, жаростойкие, сохраняют прочность при высоких температурах, имеют низкий удельный вес и характеризуются низким коэффициентом трения.

В настоящее время получение данного материала еще не производится в промышленных масштабах. Но является актуальным направлением для исследования.

В перспективе применение защитных покрытий может улучшить общие показатели эффективности энергетических систем, так же повысить надежность котельного оборудования, работающего на органическом топливе.

Целью работы является увеличение надежности котельного оборудования.

Гипотеза. Применение защитного покрытия позволит увеличить надежность и эффективность оборудования.

Объект. Защитные покрытия на основе МАХ-фазы Ti-Al-C.

Задача. Проанализировать актуальные данные по современным защитным покрытиям.

Метод исследования. Литературный обзор.

Результат. Использование защитного покрытия позволит повысить надежность и эффективность

Основной вывод. Материал является крайне перспективным и сейчас идут активные исследования по его применению.

Новизна. Данная технология еще не получила распространения, но является перспективной для дальнейшего изучения.

Ценность. Возможность обеспечить эффективность, надежность и конкурентоспособность изделий завода при уменьшении издержек на закупку более дорогих сталей.

Перспективы. Возможное переоборудование существующих производств или создание нового производства с последующем выводом на рынок более эффективного и надежного продукта.

Список использованных источников:

1. Ситников А.А. особенности формирования различных функциональных покрытий из СВС-механокомпозитов с помощью технологии газодетонационного напыления / А.А. Ситников, А.В. Собачкин, А.М. Марков // Научные технологии в машиностроении. — 2020. — № 2. — С. 22–28.

2. А.В. Собачкин, А.Ю. Мясников, А.А. Ситников. ВЛИЯНИЕ ТЕМПА НАГРЕВА НА ПРОЦЕСС ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В СИСТЕМЕ TI-AL-C / А.В. Собачкин, А.Ю. Мясников, А.А. Ситников // XII Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении». — Томск: изд. Томского политехнического университета, 2021. — С. 35–38.

3. Горбачинский А.Д., Гладких, А.А. Разработка комплекса мер по улучшению показателей горелочных устройств для твердого топлива/ А.Д. Горбачинский, А.А. Гладких [Текст] // Сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции (08 февраля 2024 г., г. Москва). — Москва: Изд. АНО ДПО «ЦРОН», Изд. АЛЕФ, 2024. — С. 139.

Разработка блока газообразного топлива газовых турбин ГТЭ-170 и ГТЭ-65.1 Горынцев М.Г.

АО «Силловые машины», Санкт-Петербург

В настоящее время АО «Силловые машины» разрабатывает и изготавливает газовые турбины ГТЭ-170 и ГТЭ-65.1. В объем поставки газотурбинных установок (ГТУ) входит необходимое для обеспечения нормального функционирования (работы) газовых турбин вспомогательное оборудование: системы, блоки, устройства, приспособления, а именно: воздухозаборный тракт, включая комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ) и

воздуховоды; блоки газообразного и аварийного жидкого топлива; система продувочная антипомпажная; система маслоснабжения, блок маслоснабжения системы регулирования; система промывки осевого компрессора; устройство осушающее; каркасы для размещения трубопроводов рабочих сред (топлива, масла); теплоакустическая изоляция.

При разработке вспомогательного оборудования ГТЭ-170.1 использовались прототипы оборудования ГТУ V94.2, которые были освоены Ленинградским металлическим заводом в период 1991–2000 гг. в рамках соглашения между компанией «Сименс» и Министерством энергетического машиностроения СССР.

При проектировании ГТЭ-65.1 за основу был принят прототип газотурбинной установки ГТЭ-65, разработанной и изготовленной на ЛМЗ в период 2003–2008 гг. Поскольку ГТЭ-65.1 превосходит ГТЭ-65 по мощности и еще ряду ключевых параметров, такое вспомогательное оборудование как приводы ВНА и топливных клапанов, система продувочная антипомпажная, блок газообразного топлива, кожух шумозащитный, редуктор были существенно переработаны и усовершенствованы.

Система подачи газообразного топлива предназначена для подачи и регулирования расхода природного газа к камере сгорания (КС) ГТУ в соответствии с режимами пуска, работы и останова, а также для быстрого отсечения потока природного газа к газовой турбине.

Блок газообразного топлива (БГТ) представляет собой отдельно стоящую раму (основание) с размещенными на ней системой трубопроводов и комплектом стопорных и регулирующих клапанов, сбросных свечей и контрольно-измерительных приборов автоматики.

Одним из основных клапанов в БГТ является быстродействующий запорный клапан (БЗК) для быстрого прекращения подачи топлива, устанавливаемый до регулирующего клапана по ходу течения газа. Время закрытия быстрозапорного клапана составляет не более 0,3 сек, что обеспечивает предотвращение разгона ротора ГТУ в случаях аварийного останова.

Для регулирования мощности и частоты вращения ГТУ применяется регулирующий клапан (РК), который принимает сигналы от системы автоматического управления (САУ) ГТУ и, соответственно, регулирует (увеличивает или уменьшает) подачу газообразного топлива в КС ГТУ. В случае нештатной работы ГТУ регулирующий клапан обеспечивает быстрое прекращение подачи газообразного топлива в камеры сгорания с целью останова ГТУ.

Для обеспечения перехода с диффузионного режима работы камеры сгорания в режим предварительного смешивания служит регулирующий клапан пилотного газа.

Процесс плавного регулирования расхода газообразного топлива, а также быстрого перекрытия подачи топлива обеспечивается за счет применения гидравлических приводов.

Усилие зажатия пружин приводов и процесс регулирования создается за счет подачи гидравлического масла с давлением порядка 160 кгс/см². В аварийных режимах прекращение подачи гидравлического масла побуждает к быстрому разжатию пружин и моментальному закрытию клапанов.

Для удаления газа с участков трубопроводов от запорного клапана до регулирующих клапанов и после них на БГТ установлены врезки трубопроводов с выходом в атмосферу, которые оборудованы соленоидными клапанами.

Датчики давления (реле давления), установленные на БГТ, участвуют в алгоритмах работы ГТУ и не позволяют произвести пуск и дальнейшую работу, если на реле давления не подтверждается наличие газообразного топлива требуемого давления. Установленный по месту показывающий манометр позволяет фиксировать величину давления топлива непосредственно у БГТ.

Основная задача при проектировании БГТ — это замена топливных клапанов с приводами зарубежных производителей отечественными аналогами.

Конструкция золотников клапанов должна быть аналогична конструкции прототипа клапана типа «стакан с перфорированными отверстиями» (см. рисунок 1) для обеспечения требуемой расходной характеристики регулирующего клапана: от 0–30% хода штока — равнопроцентная, 30–100% хода штока — линейная (см. рисунок 2).

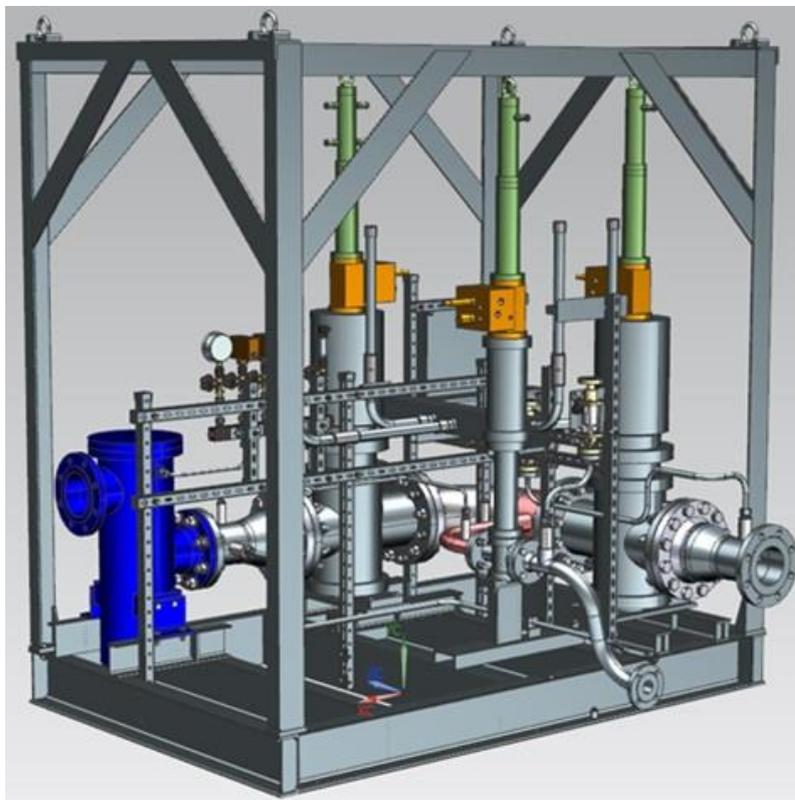


Рис. 1. Блок газообразного топлива для ГТЭ-170

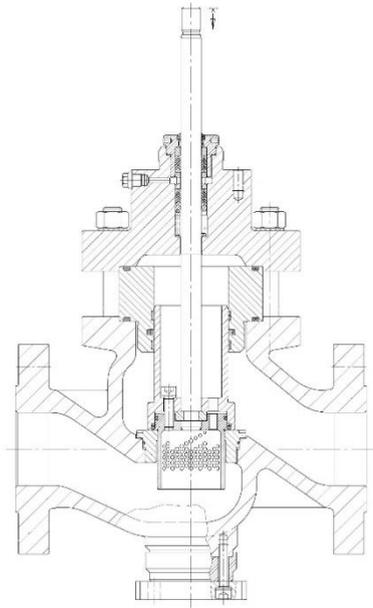


Рис. 2. Продольный разрез топливного клапана

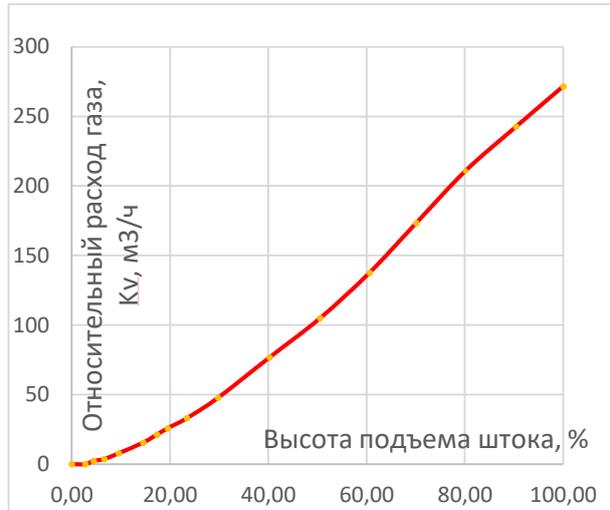


Рис. 3. Расходная характеристика

Одно из новшеств БГТ для ГТЭ-65.1 — применение электромеханических приводов взамен гидравлических приводов для управления топливными клапанами для привода входного направляющего аппарата. Отказ от гидравлической схемы позволил применять 100% российские комплектующие, исключил применение дополнительного оборудования — блока маслоснабжения системы регулирования. Существенными преимуществами данного решения являются низкая стоимость, более высокая точность позиционирования, легкость и доступность подключения, наиболее полный информационный контроль за параметрами работы, низкий уровень шума и экологическая безопасность.

В 2024 г. изготовлены головные образцы БГТ-170, разработанные ранее в рамках НИОКР, проведены их испытания. Созданы испытательные стенды для проведения испытаний со снятием характеристик и записи на цифровые носители. В ходе испытаний были внесены необходимые изменения в конструкции блоков и систем для повышения надежности, осуществлена приемка для включения в общую поставку с целью последующей наладки в составе ГТУ и дальнейшей эксплуатации.

В настоящее время продолжают работы над совершенствованием и повышением качества производимого оборудования, а также предпринимаются шаги по организации изготовления БГТ на производственных площадках АО «СМ».

Исследование влияния формы периферийного обвода на эффективность отсека реактивных ступеней ЦВД с учетом протечек

Градусов А.Д.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Для обеспечения надежной работы турбины необходимо наличие зазора между вращающимися рабочими лопатками и неподвижной поверхностью корпуса. Вследствие этого неизбежно возникают потери из-за протечки рабочего тела над рабочими и под направляющими лопатками. В работе [1] в качестве дальнейшего пути повышения эффективности паровых турбин обозначено управление потоком протечки так, чтобы минимизировать аэродинамические потери, связанные с отбором и последующим подмешиванием протечки в основной поток. Отмечена важность понимания структуры трехмерного потока в области бандажа. В статье [2–3] описана основная причина потерь при смешивании потока протечки с основным потоком — различие в компонентах скорости. Предложено несколько вариантов периферийного обвода, направленных на снижение потерь.

Геометрическая модель отсека

Для исследования влияния формы меридионального обвода на потери при смещении потока утечки с основным потоком рассматривается отсек реактивных ступеней высокого давления. Все лопатки имеют профиль постоянного сечения и расположены на постоянном корневом диаметре. При этом учитывается наличие надбандажных уплотнений рабочих лопаток и галтелей.

На рисунке 1 представлена рассматриваемая геометрия меридионального обвода. Рисунок 1(а) представляет собой исходную форму меридионального обвода. На рисунках 1(б-в) представлены варианты оптимизации меридионального обвода.

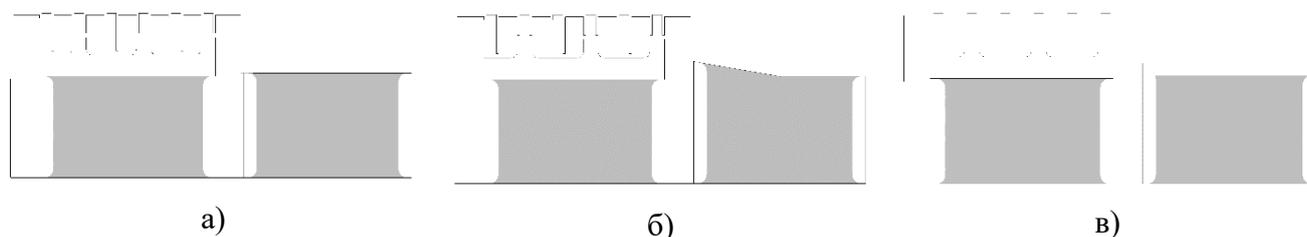


Рис. 1. Варианты формы меридионального обвода

Результаты

Для моделирования потока рабочего тела используется RANS-подход, реализованный в коммерческом пакете ANSYS CFX. Результаты расчета на примере линий тока рабочего тела из надбандажного зазора первой ступени представлены на рисунках 2.

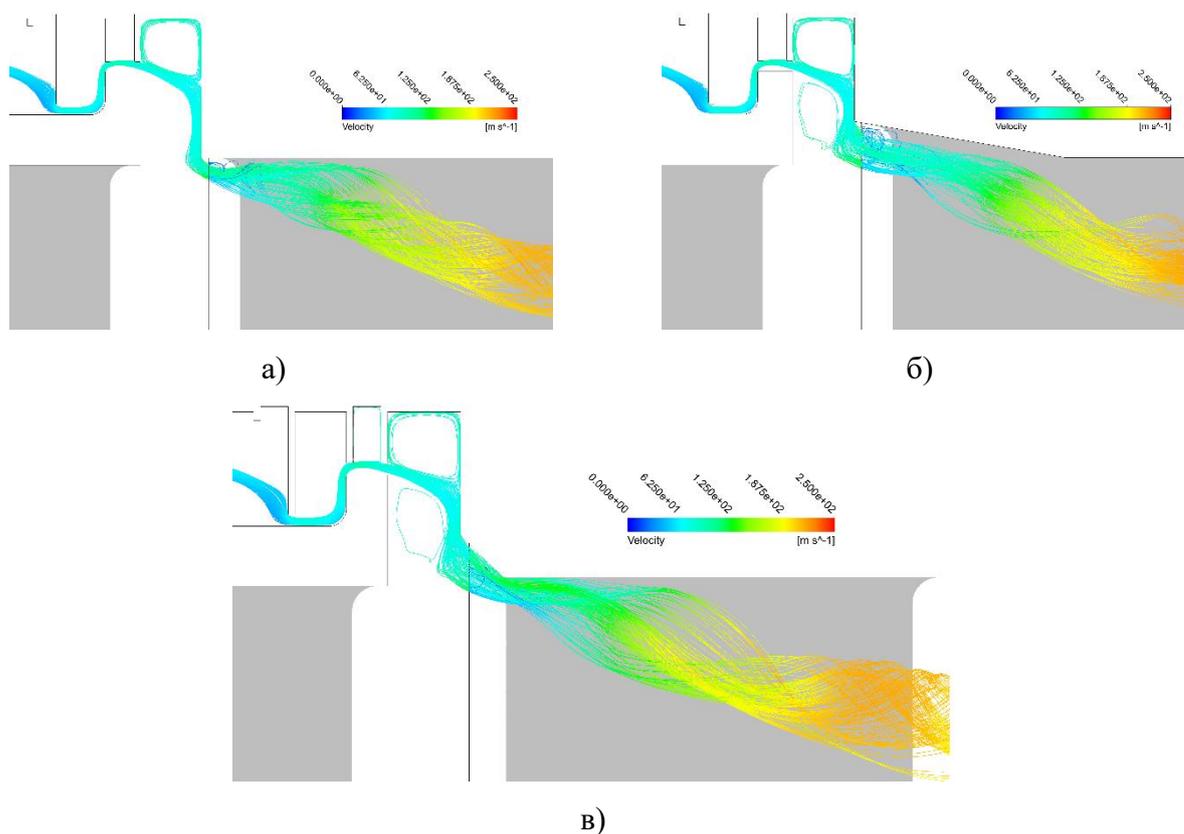


Рис. 2. Линии тока рабочего тела из надбандажного зазора рабочей лопатки первой ступени для различных вариантов задней стенки

Эффективность ступени определяется по формуле:

$$\eta = \frac{2\pi Mn}{G(i_0^* - i_{tt})} \quad (1),$$

где M — суммарный крутящий момент на рабочей лопатке;

n — частота вращения;

G — массовый расход через ступень;

i_0^* — полная энтальпия на входе в первую ступень;

i_t — изоэнтропийная энтальпия на выходе из последней ступени отсека.

Изменение эффективности отсека ступеней относительно исходной конструкции представлено в таблице 1. Наибольший прирост эффективности относительно базового варианта наблюдается для варианта в.

Таблица 1 – Значения эффективности отсека ступеней

Вариант	$\Delta\eta, \%$
а	-
б	0.20
в	0.41

Заключение

В данной работе исследована возможность оптимизации периферийного обвода с целью снижения потерь на смещение потока утечки с основным потоком. Для исследования сложной структуры течения использованы методы численного моделирования. Показано, что изменение формы периферийного обвода позволяет повысить эффективность отсека ступеней. Предложенная форма периферийного обвода может быть использована при проектировании или модернизации цилиндров высокого давления паровых турбин.

Список использованных источников:

1. Wallis, A. M. The Control of Shroud Leakage Flows to Reduce Aerodynamic Losses in a Low Aspect Ratio, Shrouded Axial Flow Turbine / A. M. Wallis, J. D. Denton, A. A. J. Demargne, // ASME. J. Turbomach. – 2001. – PP. 334–341.
2. The Influence of Shroud and Cavity Geometry on Turbine Performance: An Experimental and Computational Study– Part II: Exit Cavity Geometry / B. Rosic, J. D. Denton, E. M. Curtis, A. T. Peterson, // ASME. J. Turbomach. –2008.
3. Control of shroud leakage flows to reduce mixing losses in a shrouded axial turbine / J. Gao, Q. Zheng, G. Yue, L. Sun // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2012. –PP. 1263–1277

Возможность форсирования параметров компрессора ГТУ большой мощности Давлетгареева Е.И.

АО «Силловые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: газотурбинная установка, осевой компрессор, модернизация
Key words: gas turbine unit, axial compressor, modernization.

В области энергетики разработано и используется большое количество ГТУ. Для увеличения мощности, надежности, эффективности турбомашин и расширения диапазона их газодинамических параметров непрерывно происходит модернизация конструкции и технологическое совершенствование ГТУ.

В АО «Силловые машины» [1] рассматривалась возможность реализации проекта высокоэффективной ГТУ большой мощности. Для выполнения высоких требований проводились поисковые работы с компрессором-прототипом, 16-ступенчатым осевым компрессором установки ГТЭ-170.2. В ходе исследовательских расчетов необходимо определить возможность получения параметров, а также глубину модернизации профильной части компрессора-прототипа с целью:

- увеличения расхода;

- увеличения степени сжатия;
- обеспечения запасов не ниже компрессора-прототипа;
- обеспечения уровня КПД не ниже ГТЭ-170.1/ не ниже ГТЭ-170.2.

Достижение данных требований планировалось выполнить за счет модернизации входного блока ступней. Расчеты выполнялись для номинального режима работы ГТУ. Кроме того, проверялась работа компрессора на частичных режимах, соответствующих повышенной нагрузке на входную группу ступней.

Модернизация компрессора ГТЭ-170.2 с целью достижения газодинамических параметров проходила в несколько этапов:

- 1) изменение углов установки лопаток входного блока с целью увеличения расхода воздуха;
- 2) при увеличении расхода воздуха было принято решение изменить периферийный обвод проточной части входной группы ступней, сохраняя значения осевой составляющей скорости, чтобы избежать падения КПД.

Чтобы обеспечить выполнение заданных требований с минимальными изменениями проточной части прототипа-компрессора, количество лопаток не изменялось и было аналогично компрессору ГТЭ-170.2.

Для аэродинамического перепроектирования входной группы ступней в качестве расчетного инструмента использовался NX10, Autogrid5 [2] и Ansys CFX [3].

Первый вариант модернизации компрессора ГТЭ-170.2.

Для повышения расхода воздуха и степени сжатия при сохранении уровня КПД как у ГТЭ-170.1 были разработаны две расчетные модели «А» и «В» (таблица 1).

Первый вариант модернизации	изменение периферийного обвода	изменение углов установки лопаток				
		ВНА	1РК	1НА	2РК	2НА
Модель «А»	+6 мм ВНА-1РК	+1°	+1°	+2°	+1°	-
Модель «В»	-	+1°	+2°	+2°	+1°	-

Таблица 1. Изменения геометрии входного блока компрессора ГТЭ-170.2 (1 вариант модернизации)

Обе модели модернизации обеспечивают требуемое повышение расхода воздуха и степени сжатия компрессора при сохранении КПД уровня ГТЭ-170.1 (рис.1).

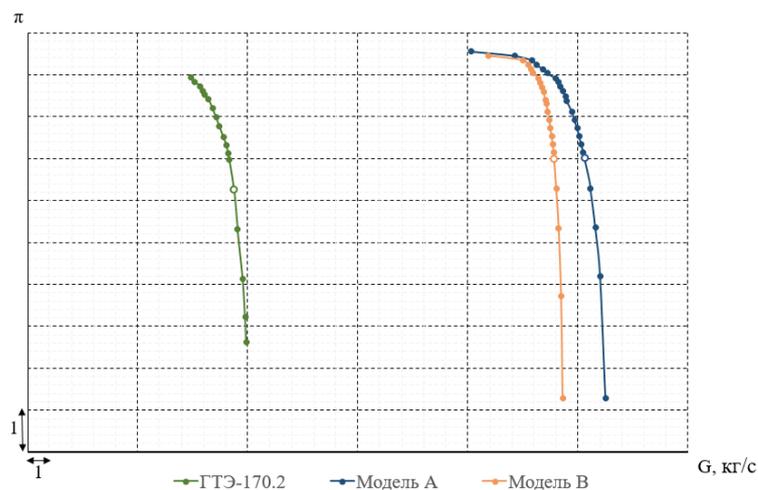


Рис. 1. Напорные характеристики моделей 1-го варианта модернизации ГТЭ-170.2

В условиях повышенной нагрузки на входной блок ступеней модель «В» показала меньшие запасы устойчивости, чем модель «А» (рис. 2).

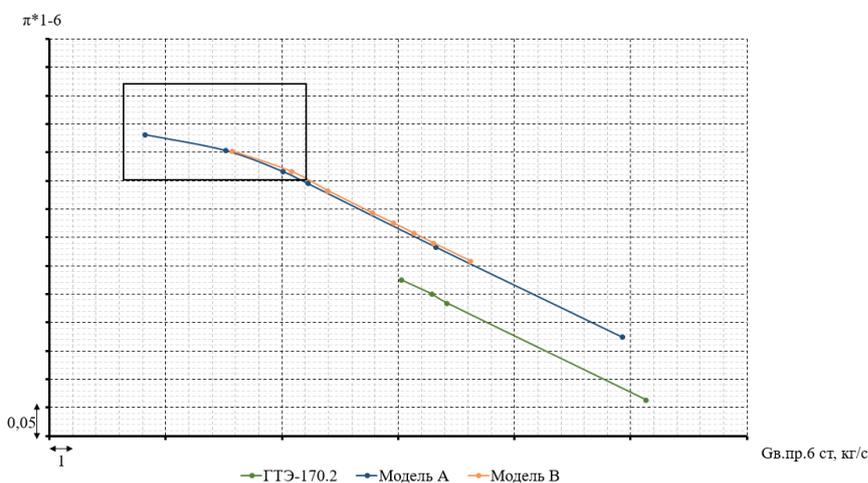


Рис. 2 Напорные характеристики входного блока ступеней моделей 1-го варианта модернизации ГТЭ-170.2

Второй вариант модернизации компрессора ГТЭ-170.2.

Для увеличения расхода воздуха совместно с корректировкой профильной части было принято решение повысить диаметр периферийного обвода первых трех ступеней компрессора ГТЭ-170.2, чтобы сохранить значение осевой составляющей скорости, предотвращая падение КПД, — модели «С» и «D» (таблица 2).

Второй вариант модернизации	изменение периферийного обвода	изменение углов установки лопаток						
		ВНА	1РК	1НА	2РК	2НА	3РК	3НА
Модель «С»	ВНА-3РК	+2°	+1°	+2°	+1°	-	-	-
Модель «D»	ВНА-3ст	+2°	+1°	+2°	+1°	-	-	-1°

Таблица 2. Изменения геометрии входного блока компрессора ГТЭ-170.2 (2 вариант модернизации)

Рассмотренные модели 2-го варианта модернизации входного блока ступеней компрессора ГТЭ-170.2 обеспечивают требуемые параметры (рис. 3). Напорная характеристика модели «D» повторяет характеристику модели «С», но имеет меньший запас газодинамической устойчивости.

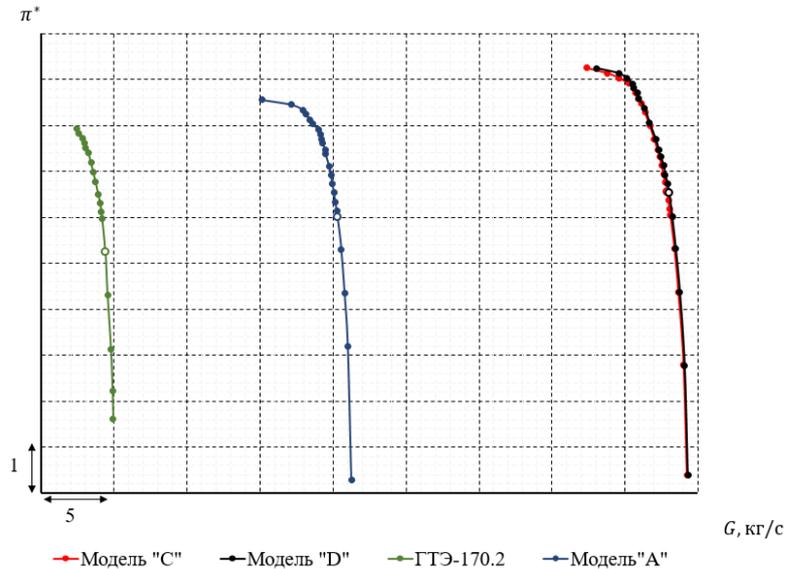


Рис. 3. Напорные характеристики моделей 2-го варианта модернизации ГТЭ-170.2

Выводы

Изменение периферийного обвода и угла установки лопаток (модель «А») позволило нагрузить ступени входного блока, увеличив расход компрессора и степень сжатия по сравнению с компрессором-прототипом, сохраняя уровень КПД компрессора ГТЭ-170.1, а также высокий запас газодинамической устойчивости более 20%.

Изменение периферийного обвода над ВНА-ЗРК и углов установки лопаток ВНА, 1РК, 1НА, 2РК позволило существенно увеличить расход компрессора и степень сжатия по сравнению с компрессором ГТЭ-170.2 — модель «С». Уровень КПД модели «С» соответствует КПД компрессора ГТЭ-170.2, а запас газодинамической устойчивости — более 20%.

В результате модернизации входного блока ступеней ГТЭ-170.2 получены два варианта геометрии проточной части компрессора для ГТУ большой мощности, удовлетворяющие заявленным требованиям в части повышения расхода воздуха, степени сжатия, КПД и обеспечения запасов газодинамической устойчивости.

Исследуемые модели после проверочных расчетов на прочность и конструкторской проработки могут быть использованы в качестве базовых вариантов для дальнейшего

увеличения газодинамических параметров при проектировании компрессора для ГТУ большой мощности.

Список использованных источников:

1. АО «Силовые машины»: [сайт]. URL: <https://power-m.ru/>
2. Numeca: [сайт]. URL: <http://www.numeca.com/home/>
3. ANSYS: [сайт]. URL: <http://www.ansys.com/>

Оценка применения роботизированной сборки сердечника статора на примере турбогенератора Доржиева Б.С.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: электрические машины, синхронный генератор, роботизированная сборка сердечника, шихтованный сердечник

Key words: electric machines, synchronous generator, robotic core assembly, laminated core

В данной работе приведены результаты оценки возможности перехода к роботизированной сборке сердечника статора турбогенератора с воздушным охлаждением. Для роботизированной сборки сердечника статора необходима соответствующая доработка конструкции. Оценка проводится по электромагнитным параметрам и тепловому состоянию генератора.

При переходе на роботизированную сборку сердечника статора были поставлены следующие задачи: сохранение существующих габаритов генератора, параметров возбуждения и КПД в пределах допустимых нормативной документацией отклонений [1, 2].

В работе планируется произвести оценку возможности перехода со стандартной технологии сборки шихтованного сердечника статора на роботизированную сборку с соответствующими конструктивными изменениями.

Объектом исследования является синхронный генератор с шихтованным сердечником статора. Сердечник статора собирается из сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Вдоль оси сердечник делится на пакеты, между которыми имеются вентиляционные каналы [3]. Спрессованный сердечник статора стягивается стальными ребрами и нажимными кольцами из немагнитной стали.

Задачей является расчет турбогенератора с учетом конструктивных особенностей при роботизированной сборке сердечника статора для определения возможности перехода на роботизированную сборку с точки зрения электромагнитных характеристик. При этом

требовалось сохранение размеров корпуса, ротора и других узлов генератора — минимальная доработка документации в случае перехода к роботизированной сборке.

Электромагнитный и тепловой расчеты выполнялись по заводским методикам и с помощью численных моделей.

Были выполнены электромагнитный и тепловой расчет турбогенератора с сегментом (рис. 1). Конструкция сердечника статора должна предусматривать отверстия под специальные немагнитные шпильки, в данном случае отверстия расположены по среднему диаметру спинки.

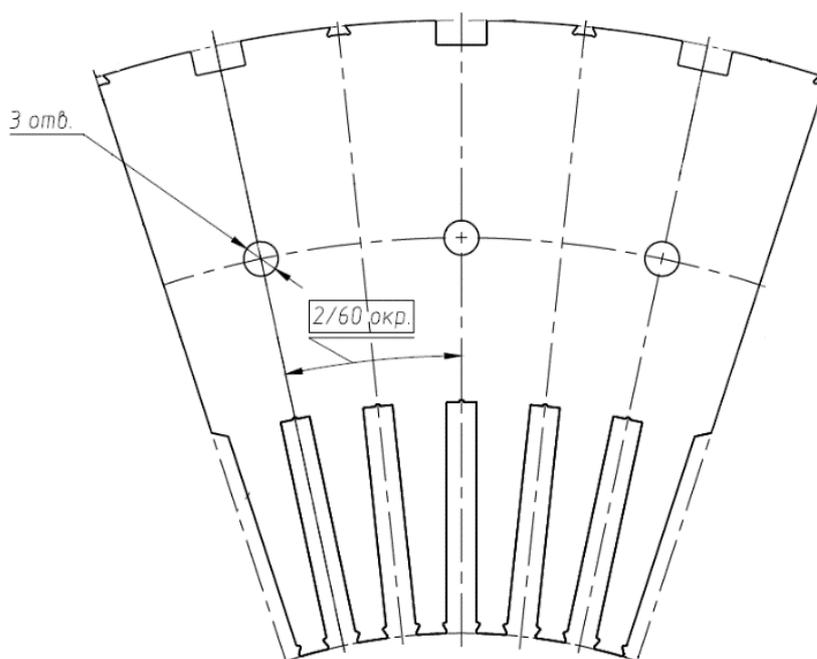


Рис. 1. Сегмент для роботизированной сборки

На основе полученных результатов приведено сравнение основных расчетных параметров генератора со стандартной конструкцией сегмента и конструкцией сегмента для роботизированной сборки (табл. 1).

Параметр	Стандартная конструкция сегмента	Сегмент для роботизированной сборки (рисунок 1)	Сравнение расчетных параметров (относительно стандартного сегмента), %
Индукция: в ярме, Тл в зубце, Тл	1,66 1,73	1,72 1,73	3,5 0
Параметры возбуждения: ток, А возбуждение, В	2620 230	2636 231	0,6 0,4
Масса стали (расчетная), кг	105274	102094	-3,1

Сумма потерь при XX, кВт	407,8	415	1,7
КПД, %	98,67	98,66	-0,01

Таблица 1 – Сравнение расчетных параметров

Завод «Электросила» выпускает широкую номенклатуру электрических машин — это генераторы для гидравлических, паровых и газовых турбин, тяговые двигатели и крупные электрические машины. Роботизация и автоматизация процесса изготовления шихтованных сердечников электрических машин позволяют повысить производительность и снизить трудозатраты.

В перспективе роботизированные линии для укладки сердечников в сравнении с традиционным методом могут обеспечить: повышенную точность при укладке, что минимизирует ошибки и улучшает качество продукции; скорость и эффективность — автоматизация этого процесса позволит значительно увеличить скорость укладки сердечников, что сокращает время производства; снижение трудозатрат — использование роботизированных систем снижает трудозатраты; гибкость — роботизированные линии могут быть адаптированы под различные типы электрических машин, что увеличит универсальность производственных линий.

Результаты работы могут быть использованы при изготовлении шихтованных сердечников статоров и роторов электрических машин. Снизить трудоемкость операций на сборку сердечников.

Список использованных источников:

1. ГОСТ ИЕС 60034-1-2014.
2. ГОСТ Р 70940-2023.
3. Турбогенераторы: монография / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная и др. — Ленинград: Ленинградское отделение издательства «Энергия», 1967. — 894 с.
3. Турбогенераторы: монография / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная и др. — Ленинград: Ленинградское отделение издательства «Энергия», 1967. —894 с.

Нейросетевая модель контактного теплообмена для решения задач обеспечения теплового состояния сборных узлов энергетических установок

Ежов А.Д., Быков Л.В., Киселев В.П.

МАИ, Москва

Ключевые слова: конечно-элементный анализ, моделирование шероховатости, контактное термическое сопротивление, регрессионная модель.

Цель работы заключается в проведении исследований и разработке регрессионной модели контактного теплообмена, основанной на результатах численного моделирования порядка 10000 вариантов контактных пар с изменяемыми механическими и теплофизическими параметрами, а также на результатах натуральных экспериментов отечественных и зарубежных исследователей.

Одна из основных проблем моделирования тепловых режимов различных технологических систем в энергетике, электронике, аппаратах космической техники и др. сводится к корректности предсказания контактного теплового сопротивления в различных диапазонах температур — от криогенных до тысяч градусов, реализующихся в газотурбинных и плазменных технологиях. Прямые тепловые измерения являются крайне дорогостоящими, трудоемкими и зачастую имеют недостаточную точность. В этой связи разрабатываемые методы предсказания на основе математического моделирования имеют крайне высокую значимость.

В последние десятилетия вопросам передачи тепла через контактные поверхности было уделено значительное внимание как зарубежными, так и отечественными исследователями. Однако стоит подчеркнуть, что многие специалисты работают в различных, хотя и взаимосвязанных направлениях этой обширной темы. Проведя анализ доступной литературы и материалов научных конференций, можно убедиться, что лишь немногие авторы занимаются комплексным термомеханическим расчетом контакта шероховатых поверхностей. В то же время значительная часть исследований сосредоточена на моделировании контактных взаимодействий таких поверхностей, оценке реальной площади касания и объема между контактирующими элементами. Тем не менее, в публикациях, посвященных расчетам и прогнозированию контактного теплового сопротивления (КТС), эти важные аспекты часто остаются без должного внимания или вовсе игнорируются. В задачах теплового проектирования пластинчатых теплообменных аппаратов, сверхпроводящих магнитов, разнообразных конструкций космических аппаратов практически всегда теплопроводность через зону контакта является основным механизмом передачи теплового

потока [1–4]. Количество публикаций по данному направлению также подтверждает актуальность затрагиваемой тематики.

Публикации по теме контактного теплообмена можно условно классифицировать следующим образом:

1. Физические исследования — работы, рассматривающие контактное термическое опротивление с точки зрения фундаментальных физических принципов.

2. Экспериментальные исследования — публикации, ориентированные на изучение новых видов контактных соединений и разработку методов измерения тепловой проводимости контакта.

3. Специализированные вопросы — статьи, посвященные проблемам, связанным с геометрией контакта, циклическими нагрузками и сопутствующими явлениями в зонах сопряжения разнородных материалов.

4. Прикладные разработки — исследования, направленные на внедрение инновационных решений в промышленность с целью минимизации тепловых потерь в конструкционных соединениях.

Следует отметить, что природа контактной тепловой проводимости заключается в концентрации тепловых потоков вблизи реальных площадей контакта, образуемых микронеровностями под действием внешних сил. Поэтому многие методики прогнозирования контактного термического сопротивления основаны на аналогиях с электрическими контактами. Некоторые из этих подходов развивают теорию, предложенную Рагнармом Хольмом [5, 6], которая изначально была разработана для анализа электрических контактов, а затем адаптирована для тепловых соединений. Однако важно учитывать существенные различия между процессами теплопереноса и электропереноса через контактные зоны [7].

Отличие процессов теплопроводности от электропроводности состоит в трудности управления распространением теплоты. Применяемые в ракетном двигателестроении материалы допускают изменение электрической проводимости до 14 порядков, в то время как теплопроводность меняется лишь на 4 порядка [8]. Также существует ряд различий между электрической емкостью и теплоемкостью [9].

Шероховатость контактирующих поверхностей является одним из ключевых факторов, влияющих на уровень тепловой проводимости контакта. Первые шаги в развитии теории контакта реальных поверхностей были сделаны с использованием дискретной модели шероховатости [2, 10, 11], особенностью которой является наличие параметров распределения, определяемых экспериментальным путем на основании обработки профилограмм.

В подавляющем числе исследований микроструктура контактной поверхности моделируется аналитически, с применением разнообразных предположений и упрощающих гипотез [2, 10–16]. При этом микрорельеф обычно аппроксимируют различными геометрическими формами, предполагая, что поведение одной пары контактирующих микровыступов может быть экстраполировано на все взаимодействующие поверхности.

Перемещение контактирующих поверхностей относительно друг друга (как правило, сближение) и, как следствие, фактическая площадь касания во многом определяют такие характеристики контакта, как прочность, жесткость, термическое и электрическое сопротивление. Силы трения и износа, характерные для контактного взаимодействия, зависят от перечисленных выше факторов и также определяют эксплуатационные свойства соединений.

Точное определение фактической площади контакта имеет критическое значение для множества инженерных задач в области контактной механики [17]. Именно в этих зонах происходят ключевые физические процессы, такие как адгезия, трение, локальная деформация и разрушение поверхностей, передача электрического заряда и тепловой энергии. Экспериментальные методы оценки площади контакта и степени сближения поверхностей представляют собой сложную задачу, зачастую не обеспечивающую достаточной точности в определении параметров, таких как величина сближения, плотность контакта и объем зазора в месте соединения. В ряде исследований для решения данной задачи предлагаются подходы, основанные на использовании метода опорных кривых [2, 18–21].

Очевидно, что одним из важнейших параметров, влияющих на характеристики контактного соединения, является шероховатость контактирующих поверхностей. Некоторые авторы [22–24] полагают, что профилограмма поверхности в оригинальном виде сложна для дискретизации в виде конечно-элементной сеточной модели из-за непредсказуемости рельефа и трудностей его математического описания. В то же время, в большинстве известных работ существует допущение, которое может оказывать заметное влияние на результаты расчета КТС, а именно выбор характерного размера для исследования шероховатости: выбираются площадки для исследования с характерным размером 100 мкм, а в некоторых случаях и 0,1 мкм [25, 26], что явно недостаточно для корректного определения характеристик контактного взаимодействия реальных объектов.

Рассматривая существующие подходы, необходимо признать, что они не всегда удобны для применения в инженерной практике, поскольку либо не гарантируют требуемую точность расчетов контактных площадей, либо требуют сложного математического аппарата. Задача определения взаимного положения двух контактирующих поверхностей и нахождения

фактической площади их соприкосновения наиболее эффективно решается в трехмерном пространстве. Авторами работы разработана и успешно применяется инженерная методика по определению КТС, основанная на конечно-элементном анализе механического и теплового взаимодействия соприкасающихся поверхностей [27] и нейросетевого прогнозирования тепловых свойств [28]. В качестве примера на рисунке 1. представлен результат численного моделирования температурного поля по упомянутой методике для контактной пары 12X18H10T-12X18H10T с шероховатостью поверхностей $Ra = 1,9$ мкм, при температуре «горячей» стороны $T = 500$ °С.

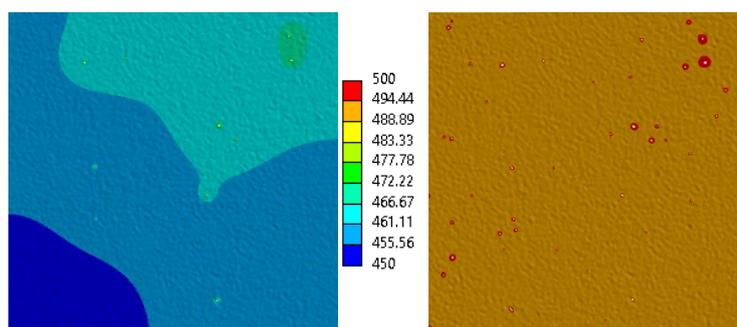


Рис. 1. Распределение полей температур контактирующей поверхности при сжимающей нагрузке 1 МПа (слева) и 6 МПа (справа)

Шероховатость поверхности играет ключевую роль в решении широкого спектра задач контактной механики. Эксплуатационные свойства контактирующих элементов конструкции непосредственно связаны со структурой и характеристиками их сопряженных поверхностей. Процессы трения и износа происходят именно на фактической площади контакта и зависят не только от свойств материала, но также от уровня давления в этой зоне, поскольку величина контактного давления влияет на разрушение поверхностных пленок и образование адгезионных связей.

Обширная литература, посвященная прогнозированию контактной проводимости и интерпретации микрогеометрии поверхности, свидетельствует о высокой актуальности данного вопроса, а также о том, что существующие публикации пока не предоставляют полного набора инструментов для решения задач контактного теплообмена. В представленной работе решается задача контактного теплообмена в сборочных узлах энергетических установок с помощью цифрового двойника поверхности и нейросетевой модели, основанной на результатах численного моделирования около 10000 вариантов контактных пар с варьируемыми механическими и теплофизическими параметрами, а также на данных

натурных экспериментов, проведенных как отечественными, так и зарубежными исследователями.

Список использованных источников:

1. Tengfei C., Qiang L., Yimin X. Characterization and application of engineered regular rough surfaces in thermal contact resistance // *Applied Thermal Engineering*. — 2014.— Vol.71. — № 1. — pp. 400– 409.
2. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. — М.: Наука, 1970. — 228 с.
3. Bykov L.V., Ezhov A D., Martynyuk L A., Afanas'ev D.B., Mezentsev M.A. Thermal Analysis of a Composite Centrifugal Compressor Impeller // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2022. — Vol. 95. — №. 3. — pp. 625–635.
4. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю., Богачев Е.А., Разина А.С. Доработка и оптимизация элементов конструкции с учетом тепловых деформаций // *Тепловые процессы в технике*. — 2015. — № 11. — С. 510–516.
5. Holm R. *Electric Contacts: Theory and Applications*. New York: Springer — Verlag. 1967. 486 p.
6. Holm R. Contact resistance especially at carbon contact // *Zeitschrift fur Technische Physik*. 1922. Vol. 3. no. 9. P. 290–294.
7. Мурашов М.В., Панин С.Д., Климов С.М. Численное моделирование электрической проводимости контактов шероховатых тел // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015. № 1. С.189–200.
8. Carrete J. Gallego L.J., Varela L.M. Surface roughness and thermal conductivity of semiconductor nanowires: Going below the Casimir limit // *Physical Review B*. 2011. Vol. 84. no. 24.
9. Maxwell J.C. *A treatise on electricity and magnetism*. Vol. 1. Oxford: Clarendon press. 1873. 453 p.
10. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. *Качество поверхности и контакт деталей машин*. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.
11. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. *Механика дискретного трения при контакте*. Минск: Наука и техника, 1990. 272 с.
12. Витенберг Ю.Р. *Шероховатость поверхности и методы ее оценки*. — Л.: Судостроение, 1971. — 108 с.
13. Nayak P.R. Random Process Model of Rough Surfaces // *Journal of Lubrication Technology*. 1971. P. 398–407.
14. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля. // *Трение и износ*. 1980. Т. 1. № 6. С. 1010–1020.
15. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. *Шероховатость поверхностей, теоретико-вероятностный подход*. М.: Наука, 1971. 340 с.
16. Суслов А.Г. *Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений*. М.: Наука, 1977. 102 с.
17. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О фактической и физической площадях дискретного контакта. // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2015. № 8. С. 4–10.
18. Огар П.М., Корсак И.И. *Влияние характеристик тяжело нагруженного стыка шероховатых поверхностей на герметичность*. Братск: БРИИ, 1989. 100 с. Деп. в ВИНТИ, № 6109 — В89.
19. Рыжов Э. В. *Контактная жесткость деталей машин*. М.: Машиностроение, 1966. 352 с.

20. Осипов А.П. Моделирование шероховатой поверхности методом суперпозиции относительных опорных кривых. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2002. № 16. С. 168–174.
21. Пашовкин С.А. Модель контакта шероховатых поверхностей с учетом маслостойкости в зоне контакта. // Известия ВУЗ. Машиностроение. 2008. № 12. С. 67–72.
22. Bhushan B. Principles and applications of tribology. ~ A Wiley — Interscience Publication, 1999. 1020 p.
23. Peng, W. and Bhushan, B. A numerical three— dimensional model for the contact of layered elastic/plastic solids with rough surfaces by variational principle. // Translate ASME Journal Tribology. 2001. № 123. P. 330–342.
24. Лазарев В.Е., Грамм М.И., Лазарев Е.А., Лаврик А.Н., Франек Ф., Паушитц А., Форлауфер Г., Джейза Р. Математическая модель шероховатой поверхности контактного трибосопряжения. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2006. № 11 (66). С. 54–58.
25. Мешков В.В., Зоренко Д.А. САЕ-моделирование температурных полей поверхности трения с учетом экспериментально определенной субмикрорегии. // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2014. № 7. С. 25–29.
26. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О фактической и физической площадях дискретного контакта. // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2015. № 8. С. 4–10.
27. Ezhov A. D., Bykov L. V., Kiselev V. P., Talalaeva P. I., Kotovich I. V., Platonov I. M., Prediction of Thermal Properties of Solid Contact, Rus. J. Nonlin. Dyn., 2024, Vol. 20, no. 4, pp. 601–617.
28. Molchanov A.M., Yanyshv D.S., Ezhov A.D., Bykov L.V., Solution Of The Inverse Problem Of Heat Conduction Using Neural Networks // Heat Transfer Research. 2025. Volume 56, Issue 7, P. 1–12.

Роботизированная система обработки лопаток колес гидромашин

Елисеев Е.И., Ильин И.В., Дмитриев А.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

Ключевые слова: робот-манипулятор; фрезерная обработка; ПЛК; САМ системы; турбины гидромашин; лазерный дальномер; Raspberry Pi; Python; K-IDE; Codesys; Kawasaki.

В наше время значительное количество электроэнергии вырабатывается ГЭС. Это экологичный и возобновляемый источник электроэнергии. В России более 100 гидроэлектростанций и все они не могут обойтись без главного элемента – турбины. Однако, на данный момент обработка крупногабаритных литых изделий производится вручную и имеет массу недостатков: невысокая точность, длительность обработки, влияние человеческого фактора и вред здоровью рабочих. Поэтому данный проект направлен на разработку автоматизированного интеллектуального комплекса, который увеличит качество и скорость обработки, заменит ручной труд и будет экономически выгоден предприятию.

Промышленные роботы находят все более широкое применение, заменяя человека на участках с опасными, вредными для здоровья, тяжелыми или монотонными условиями труда.^[1]

Заказчиком была поставлена задача (в формате технического задания) (далее ТЗ) создать автоматизированный робототехнический комплекс по обработке литых лопаток колес гидромашин с заданными свойствами. На момент постановки ТЗ обработка производилась ручным трудом, что имело множество недостатков: невысокая точность (допуски $\pm 0,5\text{мм}$), длительность обработки, влияние человеческого фактора и плохие условия для рабочих. Поэтому возникала необходимость улучшения этого этапа производства. Предприятие уже рассматривало создание робототехнического комплекса. В нем использовались 3d сканер и робот-манипулятор с фрезерующим инструментом. Стоимость внедрения данного решения превышала 65 млн. рублей. Точность также была на высоте (допуски $\pm 0,1\text{мм}$). Но, несмотря на хорошую точность, время обработки было неудовлетворительным из-за его потери на сканирование детали. Поэтому задача заключалась в получении точности в $0,1\text{мм}$ при минимальном времени обработки и затратах менее 65 млн руб.

Робот-манипулятор с фрезерующим инструментом. Методы обработки литых заготовок.

В ходе решения поставленной задачи были рассмотрены 3 метода обработки литых деталей:

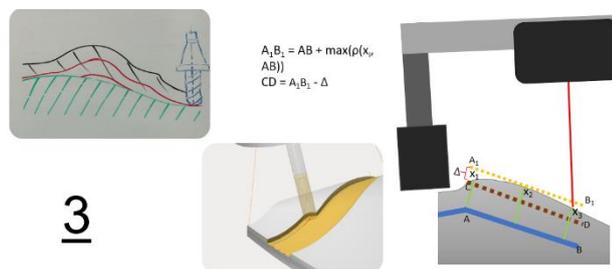


Рис. 1. Проектный метод

Прохождение параллельно идеальной траектории. В этом методе робот несколько раз производит обработку, каждый цикл приближаясь к идеальной траектории (траектории, при которой робот не будет срезать с идеальной расчетной детали материал) (далее ИТ) и двигаясь со скоростью, удовлетворяющей технологиям фрезерной (шлифовальной) обработки металлических изделий. Данный метод при своей простоте реализации занимает много времени, потому что до 90% траектории робот работает в холостую, не производя обработку.

Предварительное 3d-сканирование — метод, разработанный предприятием. Основу данного метода составляет процесс 3d-сканирования литой детали. После этой операции оператор получает цифровую копию реальной детали и в специальной САМ системе, например, SprutCam, задает траекторию обработки. В данном способе большую по продолжительности часть занимает сканирование. Также для сканирования необходимы квалифицированный персонал и обслуживание.

Разработанный метод. В ходе работы над проектом был разработан метод обработки, использующий компоненты: робот-манипулятор с фрезерным инструментом и лазерный дальномер. Получение данных об отклонении поверхности реальной детали от ИТ происходит во время обработки. Комплекс за несколько обработочных тактов знает о количестве лишнего материала и производит смещение траектории, исходя из этих данных (рис. 1).

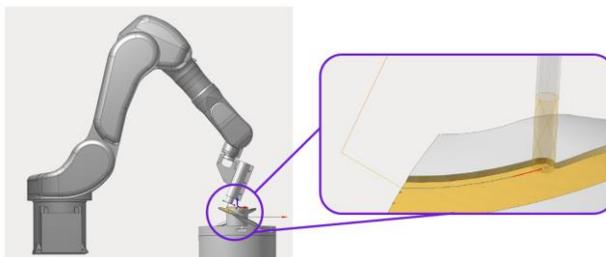


Рис.1 Роботизированный комплекс

Аналоги. Патентный поиск.

В ходе работы над проектом был проведен патентный поиск. Среди аналогичных задач по обработке деталей роботом-манипулятором был выделен патент от Boeing.^[2] Было определено, что данное изобретение относится к области абразивной обработки и может быть использовано при шлифовании поверхностей объектов в аэрокосмической, автомобильной и др. отраслях промышленности, но не подходит для обработки лопастей колес гидромашин.

Разработка стенда. Моделирование.

На данной стадии работы над проектом разрабатывались и моделировались элементы комплекса: кронштейн крепления имитации фрезерного оборудования (бормашины) и лазерного дальномера; 3d-модель поворотного стола и тестовой детали; крепление шагового двигателя, отвечающего за позиционирование детали. После изготовления этих деталей с помощью 3d-принтера и сборки стендового комплекса, комплекс был оцифрован в программе SprutCam, где была написана программа ИТ (рис. 2).

Разработка стенда. Программирование ПЛК и робота-манипулятора.

Для получения данных с лазерного дальномера, их обработки и передачи роботу-манипулятору использовался ПЛК на Raspberry Pi 4. Программа для ПЛК была написана в среде программирования Codesys. Алгоритмы работы ПЛК и робота приведены на рис. 3. Во время написания программы для Raspberry Pi были решены следующие задачи: изучение и написание дешифратора протокола обмена данными между лазерным дальномером и ПЛК по RS-232, подключенным физически к COM-порту Raspberry; математическое описание входных данных, их обработка и передача роботу по протоколу Ethernet. В робот-манипулятор

загружалась программа, имеющая в себе перемещение по ИТ и команды изменения траектории, в зависимости от полученных с ПЛК данных.

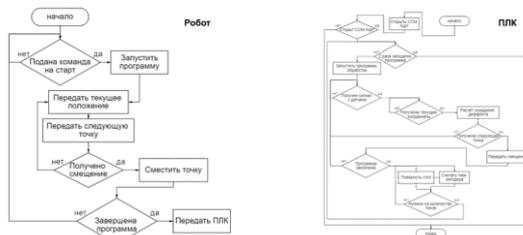


Рис. 2 Алгоритмы работы робота-манипулятора и ПЛК

Разработка стенда. Вспомогательная программа ASconverter.

Для упрощения переноса программы следования по ИТ из SprutCam в среду программирования робота-манипулятора Kawasaki K-IDE была написана на языке программирования Python программа ASconverter. Она позволяет преобразовать программу из SprutCam в K-IDE, при этом добавляя необходимые команды, необходимые для принятия и исполнения команд с ПЛК.

Экономическая оценка

Табл. 1 Экономический расчет

	Текущий вариант	Робот и 3d-сканер	Разработанный метод
Допуски, мм	0,5	0,1	0,1
Стоимость внедрения, млн руб.	—	65	35
Время работы/шт., чел. час.	128	190	~78

В табл. 1. приведены результаты экономического расчета, исходящего из данных, полученных от производства, а также в результате экономической оценки нашего решения. Как можно заметить, разработанный нами комплекс является экономически более выгодным.

Будущее проекта

Возможные способы дальнейшего развития проекта:

1. Добавление функции смены инструмента.
2. Режим наплавления материала в местах с дефектами отливки.
3. Разработка программы для норма-контроля.

Также была рассмотрена возможность предложения данного проекта предприятиям, занимающимся производством турбин гидромашин с помощью литья.

Заключение

В результате проделанной работы была разработана и протестирована автоматизированная интеллектуальная система обработки гидротурбинных лопаток. Данное решение отвечает всем требованиям ТЗ заказчика, является конкурентно способным и встраиваемым в текущий технологический процесс.

Данный проект был выполнен в образовательном центре «Сириус» на программе «Большие вызовы» при партнерстве ФГАОУ ВО «УрФУ» и АО «Уралгидромаш».

Список использованных источников:

1. Козырев Ю.Г. // Промышленные роботы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1983. — 376 с.
2. Патент № 2509681 — Способ выполнения синхронизированной роботизированной технологической операции на конструкции, имеющей ограниченное пространство, в частности на кессоне крыла летательного аппарата, соответствующее компьютерное устройство и роботизированная установка, <http://allpatents.ru/patent/2509681.html> (дата обращения 28.11.2024) — Текст: электронный

Сравнение подходов к расчету параметров насоса при подрезке рабочего колеса Жохов Н.Ю.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: центробежный насос, подрезка рабочего колеса, гидродинамический расчет

Key words: centrifugal pump, impeller trimming, CFD analysis

Разработанный в компании насос КсВ 320-160 не удовлетворяет техническим требованиям (ТТ) Нерюнгринской ГРЭС. При номинальном расходе напор насоса 166,6 м превышает требуемый напор 150 м на 11%. Для снижения напора до величины, удовлетворяющей ТТ, решено выполнить подрезку рабочих колес (РК). Одной из целей данной работы является определение необходимой подрезки РК насоса для конкретной станции. Помимо этого, работа также преследует более глобальные цели, а именно сравнение результатов, полученных аналитическим путем и методом вычислительной гидродинамики. Несмотря на, вероятно, более точные результаты моделирования течения жидкости в насосе, аналитический метод позволяет провести пересчет характеристик насоса в сжатые сроки и с минимальными трудозатратами, что актуально при подготовке технико-коммерческих предложений (ТКП), предварительной оценке принципиальной возможности достижения заданных параметров методом подрезки, не выходя за рекомендованные пределы (5% от

диаметра РК для насосов с лопаточными и канальными направляющими аппаратами, 20% для насосов со спиральным отводом).

Расчет проводился в CFD решателе Ansys CFX, в котором решаются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Расчетная область включает в себя подвод, шнек, первую ступень с направляющим аппаратом (НА), промежуточную ступень с НА, последнюю ступень с НА последней ступени и отвод.

Проводимый в первую очередь расчет в стационарной постановке используется в качестве первого приближения для расчета в нестационарной постановке. Для нестационарного расчета выбрана модель турбулентности SST. Временной шаг переменный с самым малым шагом, соответствующим повороту колес на 2,5 градуса. Расчет проведен для 10 оборотов РК.

Для аналитического метода определения параметров насоса после подрезки использовались формулы из пособия [1, С.200]. Напор и подача насоса определяются из соотношений (1).

$$\frac{H'}{H} = \left(\frac{d_2'}{d_2}\right)^m = \frac{Q'}{Q}, \quad (1)$$

где H — напор до подрезки, м; d_2 — диаметр РК до подрезки, м; m — экспонента, лежащая в диапазоне от 2 до 3; Q — подача до подрезки, м³/ч; ' — обозначение параметров после подрезки РК.

При заданном соотношении диаметров РК до и после подрезки экспоненту m можно определить по формуле (2). Для достижения требуемого снижения напора можно использовать формулу (3) определения экспоненты. По результатам испытаний экспоненту можно определить по формуле (4).

$$m = 2,08 + 1,1 \text{EXP} \left(15 \left\{ \frac{d_2'}{d_2} - 1 \right\} \right). \quad (2)$$

$$m = 2,08 + 1,2 \text{EXP} \left(7,5 \left\{ \frac{H'}{H} - 1 \right\} \right). \quad (3)$$

$$m = \frac{\ln \frac{H'}{H}}{\ln \frac{d_2'}{d_2}}, \quad (4)$$

Расчетная сетка состоит из 18,3 млн. элементов. Подоменное распределение количества элементов и безразмерного параметра Y^+ сведены в таблицу 2.

Таблица 2 — Параметры расчетной сетки

Домен	Параметр		
	Число элементов	Y+ average	Y+ max
Подвод	1,2 млн	13	134
Шнек	1,0 млн	71	210
РК	1,6 млн	25	1862
НА	3,6 млн	82	274
НА последний	1,0 млн	85	275
Отвод	2,7 млн	62	113

В качестве граничных условий на входе задано нулевое полное давление, на выходе — массовый расход. Рабочей жидкостью задавалась вода с температурой 125 °С. Твердые стенки заданы гидравлически гладкими с условием прилипания жидкости. Учет взаимодействия ротора и статора в стационарной постановке обеспечивался интерфейсом «Stage», в нестационарной постановке — «Transient Rotor Stator».

Искомое значение напора насоса было достигнуто подрезкой РК второй и третьей ступеней на 4,5%, что соответствует рекомендованному 5% ограничению для насосов с канальным направляющим аппаратом вниз по потоку за РК. Многоступенчатая конструкция насоса позволяет выполнить подрезку РК, оставляя всасывающее колесо первой ступени необрезанным, что способствует понижению риска ухудшения кавитационного запаса насоса. Поскольку при подрезке подача насоса уменьшается пропорционально напору в заданной точке на характеристике, номинальная точка насоса смещается в сторону меньших расходов. Поэтому, чтобы получить результат аналитическим методом случая уменьшения напора на номинальном режиме, т. е. с неизменной подачей при меньшем напоре, необходимо подставлять в формулу (1) параметры насоса, соответствующие режиму перегрузки насоса. Ввиду отсутствия таких данных о насосе, для сравнения аналитического метода и компьютерного моделирования использована точка на характеристике, соответствующая режиму недогрузки насоса, с расходом 93% от номинального.

Из гидродинамического анализа получен напор 167,4 м, аналитическим методом — 164,1 м. Разница составила 2%. Также возможно применение комбинированного метода: определение экспоненты m на номинальном режиме по формуле (4), используя данные из компьютерного моделирования одного режима, и построение характеристики насоса по соотношениям (1). Такой подход позволяет, с одной стороны, учесть изменение конкретных лопастей при и подрезке, и сэкономить время на пересчете всей характеристики с другой. По формуле (4) получено значение экспоненты $m = 2,415$. Характеристики насоса до и после

подрезки показаны на рисунке 1. В данном насосе разница подходов к расчету подрезки оказалась невелика, однако лопасти других насосов могут претерпевать большие изменения при подрезке, если изменения ширины РК на выходе и выходных углов лопастей более выражены по длине лопасти. Также большее расхождение в результатах ожидается при больших величинах подрезки, применяющиеся на практике для насосов со спиральным отводом. Проведенное исследование показало, что применение аналитических формул для расчета параметров насоса при подрезке дает результаты, близкие к гидродинамическому расчету. Основное применение аналитического подхода — это подготовка характеристик насосов для ТКП с близкими к требуемым параметрам с минимальными временными затратами.

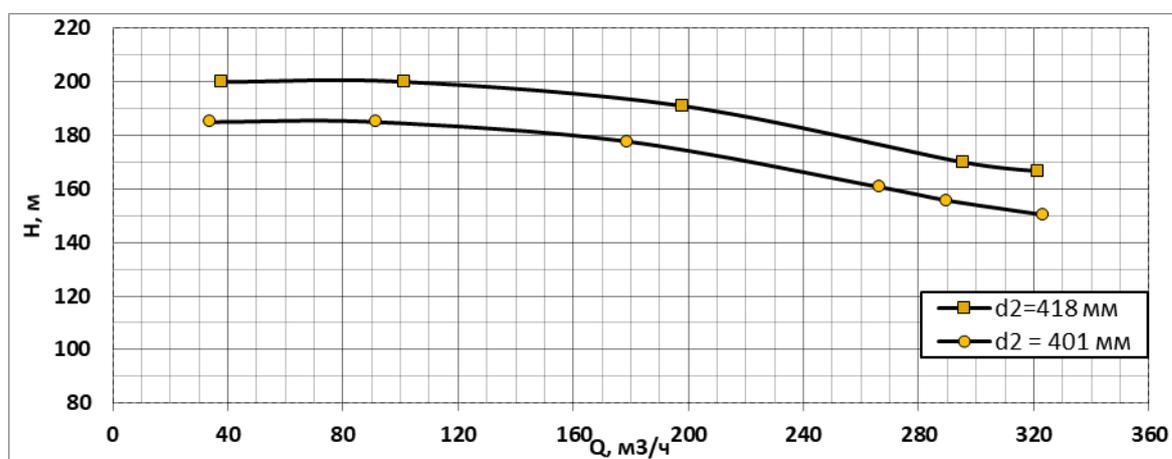


Рис. 1. Напорные характеристики насоса до и после подрезки

Список использованных источников:

1. Gülich, J.F. Centrifugal Pumps, 4th ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; 1264 p.

Технология изготовления керамических изделий методом аддитивных технологий Зарифжонов Ж.Ф.

АО «Силовые машины», Уфа

Ключевые слова: аддитивные технологии, фотополимеризация, 3D-печать, линейная усадка

Key words: additive manufacturing, ceramic, photopolymerization, 3D printing, linear shrinkage

Данное исследование выполнено в УУНиТ в рамках магистерской научной работы и является продолжением изысканий, отраженных в патентной заявке № 2024133654 от 29.11.2024.

В современном мире технологии развиваются с невероятной скоростью, и литейное производство не является исключением. Одним из перспективных направлений в этой области является использование аддитивных технологий для изготовления керамических изделий.

Цель данной работы — разработка технологии изготовления керамических изделий методом аддитивных технологий.

Гипотеза работы состоит в том, что использование аддитивных технологий позволит создавать керамические изделия с улучшенными характеристиками, такими как повышенная прочность и низкая линейная усадка.

Задачи работы:

1. Описать технологию изготовления керамических изделий методом аддитивных технологий.
2. Изготовить образцы по предложенной технологии.
3. Провести исследование полученных образцов.

Технология изготовления керамических изделий методом аддитивных технологий

Процесс изготовления керамического изделия начинается с создания трехмерной модели оболочки, точно повторяющей геометрию изделия. Затем модель загружается в программное обеспечение 3D-принтера для разделения на слои.

Файл импортируется в программу для подготовки управляющей команды, после чего запускается цикл послойного построения изделия. Цикл изготовления одного керамического слоя включает следующие этапы:

1. Формирование фрагмента оболочки, состоящего из нескольких слоев, с использованием растворимого термопластика HIPS (рис. 1 а).
2. Нанесение смеси керамического материала и фотополимера Anycubic во внутреннюю полость сформированного фрагмента оболочки с помощью рекоутера.
3. Фильтрация керамической смеси.
4. Фотополимеризация керамического слоя.

После завершения процесса построения изделие вместе с платформой извлекается из рабочей камеры принтера. Затем изделие подвергается процессу дополимеризации и удалению оболочкового слоя с использованием растворителя D-Limonene.

После этого изделие проходит внешний контроль качества и направляется на обжиг. По завершении обжига керамический образец подвергается заключительным контрольным операциям для подтверждения соответствия заданным характеристикам.

Требования, предъявляемые к керамическим образцам:

1. Высокая прочность при изгибе (> 15 МПа).
2. Высокая точность размеров (линейная усадка $< 2\%$).
3. Отсутствие внешних дефектов.

В ходе эксперимента применялись следующие материалы: керамическая масса со связующим фотополимером Anycubic, термопласт HIPS и растворитель термопласта D-Limonene.



Рис. 1. Формы для керамических стержней
а) растворяемая оболочка; б) оболочка, установленная на инфильтрационную подложку

Изготовление керамических образцов по предложенной технологии методом аддитивных технологий

В подготовленную пластиковую форму заливается керамическая смесь. Процесс формирования образцов-сырцов проходит в два этапа: сначала смесь заливают в растворяемую оболочку на инфильтрационной подложке (рис. 1б) и выдерживают 1–2 минуты для фильтрации и усадки слоя. Затем внешние контуры полимеризуют УФ-излучением (360–405 нм) за 3–5 минут. Форму удаляют растворителем D-Limonene.

Образцы проходят визуальный и геометрический контроль, размеры соответствуют исходным, усадка отсутствовала. Внешние дефекты не обнаружены. Обжиг проводят в газовых печах при 1350–1420 °С в течение 72 ч. После обжига образцы проверяют визуально (рис. 2), измеряют геометрию, прочность и шероховатость.



Рис. 2. Образец после спекания

Исследование полученных образцов

Результаты контроля геометрии и испытания керамических образцов на трехточечный изгиб приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний керамических образцов на трехточечный на изгиб

№	Образец	Температура испытаний	Ширина образца, м	Высота образца, м	Глубина образца, м	Прочность ($\sigma_{изг}$), МПа
1	Обжиг	20	0,0198	0,07562	0,005	19,2
2			0,0197	0,07562	0,005	19,3
3			0,0198	0,07564	0,0049	19,28
4			0,0198	0,07563	0,005	18,52
5			0,0198	0,07562	0,0049	19,35
1	Сырые	20	0,0205	0,07606	0,005	38,9
2			0,02	0,07604	0,005	38,63
3			0,02	0,07606	0,005	38,7
4			0,0203	0,07605	0,005	38
5			0,0202	0,07604	0,005	39,1

Данная технология изготовления керамических образцов соответствует всем предъявляемым требованиям. Прочность – 19,13 МПа; линейная усадка – 1,5%.

Заключение

В результате проведенного исследования была описана технология изготовления керамических изделий методом аддитивных технологий. Преимущество данной методики заключается в возможности получения изделий с высокой точностью геометрии, низкой линейной усадкой (1,5%), высокой прочностью (19,13 МПа) при изгибе и гладкой поверхностью. Кроме того, время, затраченное на изготовление партии образцов, составило ~3 дня, что отвечает поставленной задаче по сокращению трудоемкости подготовки производства керамических форм и стержней.

На основании полученных данных можно заключить, что предложенная технология может использоваться для изготовления лопаток турбины и в дальнейшем стать частью производства «Силовые машины».

Формирование подхода к многокритериальной оптимизации осевых компрессоров Золотухин А.С.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, ГТЭ-65, CFD, осевой компрессор, NASA Stage 37

Key words: multi-objective optimization, GTE-65, CFD, axial-compressor, NASA Stage 37

Результатами доводки формы пера лопаток компрессора с применением современных алгоритмов оптимизации в СКБГУ являются лопатки компрессора ГТЭ-170.2 [1]. Ввиду оперативности стоящей задачи и требований технического задания не рассмотрены

альтернативные варианты целевых функций и ограничений или же возможности постановки задачи многокритериальной оптимизации.

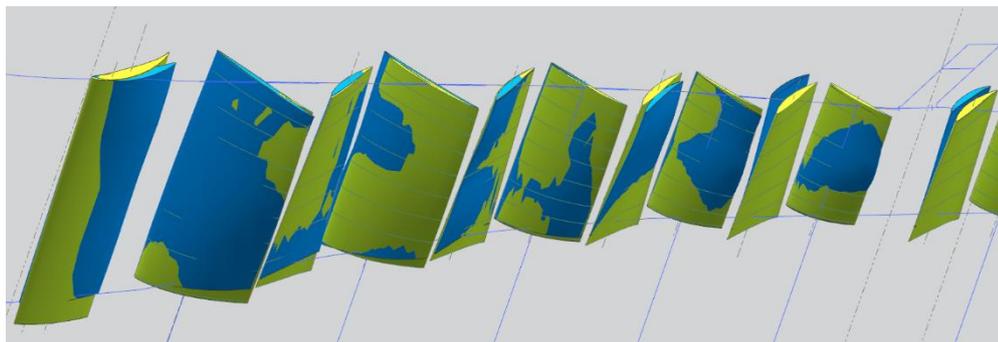


Рис. 1. Вариант геометрии лопаток компрессора ГТЭ-170.2 после оптимизации [1]

Целью работы является формирование и апробация альтернативных подходов к постановке задачи оптимизации лопаток осевых компрессорных ступеней с применением многокритериальной оптимизации и альтернативных методов обработки данных. Предлагается рассмотреть перспективу оптимизации венцов компрессора ГТЭ-65.1 [2], которые имеют потенциал для дальнейшего форсирования параметров узла.

В качестве объектов исследования в данной работе рассматриваются: модельная трансзвуковая осевая компрессорная ступень NASA Stage 37 [3], модельный шестиступенчатый отсек осевого компрессора ГТЭ-65.0; осевой многоступенчатый компрессор ГТЭ-65.1.

Поставленную цель предлагается выполнять с применением следующих методов: генетический алгоритм непрямой оптимизации IOSO; система численного моделирования ANSYS, а конкретно модуль CFX; среда программирования PyCharm для языка программирования Python.

На основе анализа литературных источников [4,5], а также результатов оптимизации компрессора ГТЭ-170.1 [1] был сформулирован подход к задаче многокритериальной оптимизации в виде блок-схемы, представленной на рис. 2.

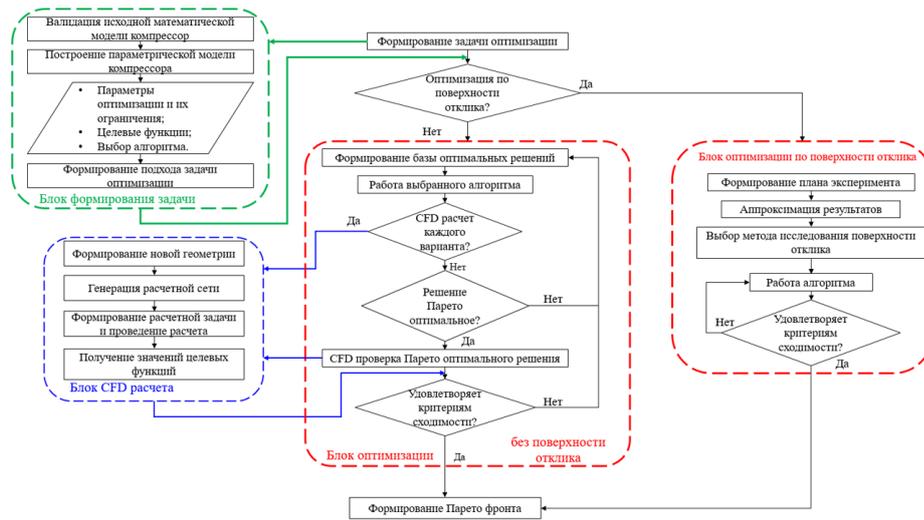


Рис. 2. Сформированная блок схема подхода к задаче оптимизации

Для апробации подхода была проведена многокритериальная оптимизация модельной ступени NASA Stage 37. В качестве целевых функций были выбраны максимизация адиабатического КПД компрессора и минимизация неравномерности эпюры полного давления на выходе из ступени. Проведен анализ выбора модели турбулентности ($k-\epsilon$ или SST) при многокритериальной оптимизации. Прочностной анализ при данной постановке не осуществляется, но его реализация подразумевается на последующих этапах. Сопоставление полученных вариантов геометрии с исходной (Base) приведено на рис. 3.

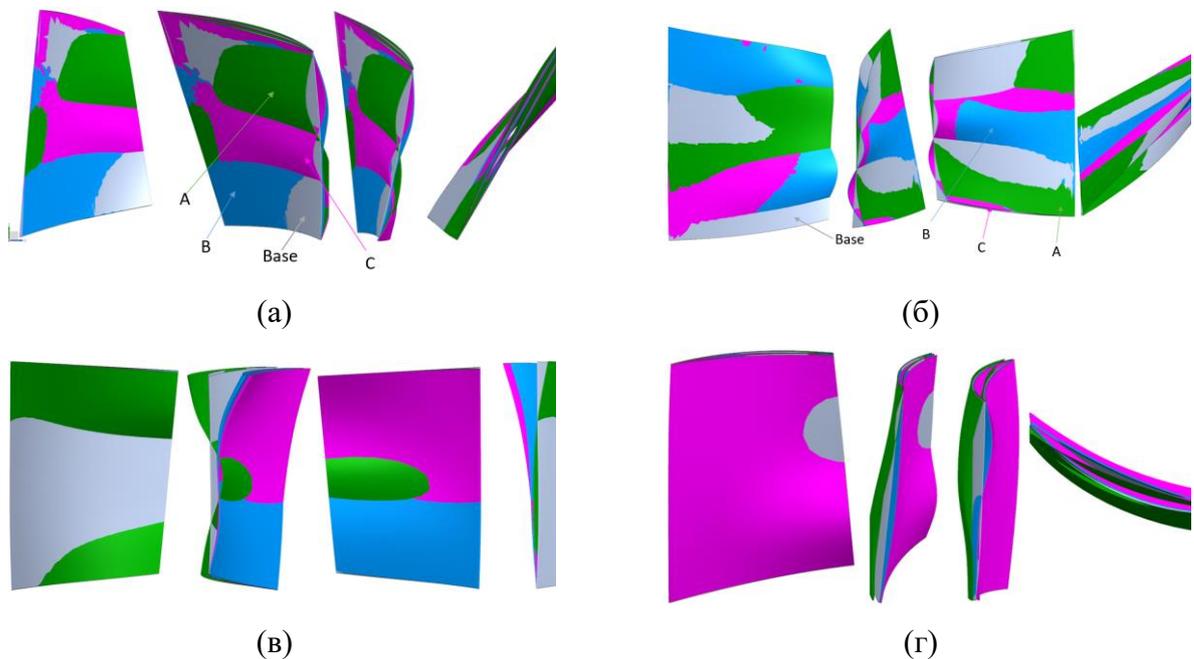


Рис. 3. Результаты оптимизации NASA Stage 37: $k-\epsilon$ — рабочая (а) и направляющая (в) лопатки; SST — рабочая (б) и направляющая (г) лопатки

По результатам оптимизации выбрано три варианта альтернативной геометрии: минимальная неравномерность полного давления на выходе (А), максимальный адиабатический КПД (В) и промежуточный вариант (С). Детальный анализ венцов проведен в

пяти характерных сечениях с помощью программы, написанной на языке Python и критериев, указанных в [6]. Наиболее предпочтительным является вариант (С) совместно с моделью турбулентности $k-\varepsilon$ ввиду значительного сокращения расчетного времени и удовлетворительном переносе результатов на модель SST. Прирост адиабатического КПД ступени в данном случае составляет 0,7%. Постановка самой задачи нуждается в корректировке: смена точки привязки профиля с входной кромки на центр масс для переноса градиента изменения параметров с выходной кромки на весь профиль, уточнить методику определения неравномерности полного давления, рассмотреть альтернативные варианты целевых функций.

Составленную методику, с соответствующими корректировками, предлагается апробировать на модельном шестиступенчатом отсеке компрессора ГТЭ-65.0. На данный момент осуществлена верификация расчетной модели (рис. 4). Ведется подготовка параметрических моделей лопаток, в соответствии с методикой, изложенной в [7], для дальнейшей оптимизации венцов, лимитирующих работу компрессора.

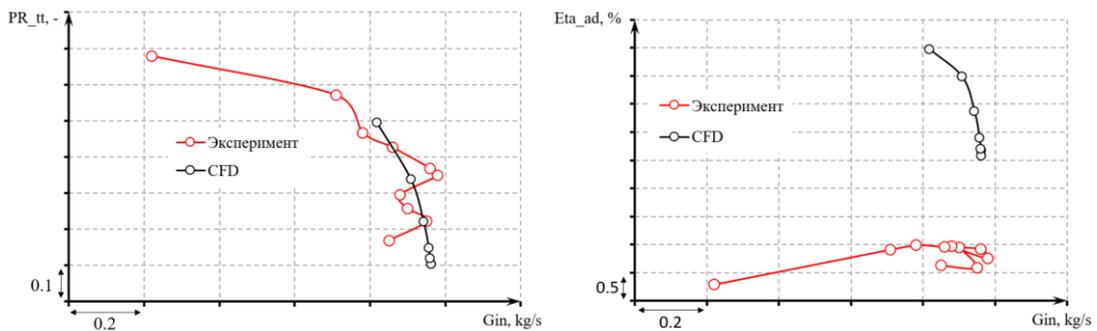


Рис. 4. Результаты верификации модельного отсека компрессора ГТЭ-65.0

В качестве перспективной задачи предлагается рассмотреть применение метода многокритериальной оптимизации к средней группе ступеней осевого компрессора ГТЭ-65.1, которые по результатам проведенного численного эксперимента имеют потенциал для форсирования параметров. Данное мероприятие позволит расширить рабочий диапазон как компрессора в частности, так и всей газотурбинной установки в целом.

В ходе работы был составлен подход к задачам оптимизации осевых компрессоров, а также разработана методика обработки и анализа полученных результатов. Подход апробирован на модельной осевой ступени NASA Stage 37, по результатам оптимизации которой были даны рекомендации по его коррекции для последующей оптимизации модельного шестиступенчатого отсека компрессора ГТЭ-65.0 и многоступенчатого компрессора ГТЭ-65.1.

В случае получения положительных результатов многокритериальной оптимизации на рассмотренных объектах данный подход может быть использован при доводке лопаток

компрессоров как в уже разработанных, так и во вновь проектируемых перспективных газотурбинных установках компании АО «Силовые машины».

Список использованных источников:

1. Воробьев А.К. Модернизация компрессора ГТЭ-170.2. Development of GTE-170.2 compressor / А.К. Воробьев, Ф.А. Малышев // Перспективы развития двигателестроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. им. Н.Д. Кузнецова (21–23 июня 2023 г.) : в 2 т. / Самар. нац. исслед. ун-т им. С.П. Королева (Самар. ун-т); ред. кол.: Е.В. Шахматов, А.И. Ермаков. — Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2023. — Т. 2. — С. 64–65.
2. Газовые турбины средней и большой мощности // «Силовые машины» URL: <https://power-m.ru/customers/thermal-power/gas-turbines/> (дата обращения: 10.12.2024).
3. Reid L., Moore R. D. Performance of Single-Stage Axial-Flow Transonic Compressor With Rotor and Stator Aspect Ratios of 1.19 and 1.26, Respectively, and With Design Pressure Ratio of 2.05 // NASA Technical Paper 1659–1980–105 p.
4. Schwefel, H.-P., “Numerical optimization of computer models”, Chichester: Wiley & Sons, 1981.
5. Liu, W.; Chu, W.; Zhang, H.; Wang, H. An Optimization Study of Circumferential Groove Casing Treatment in a High-Speed Axial Flow Compressor. Aerospace 2024, 11, 541. <https://doi.org/10.3390/aerospace11070541>.
6. Золотухин А.С. Выбор подхода к построению параметрической модели трансзвуковой компрессорной ступени / А.С. Золотухин, А.А. Дроздов, Л.Н. Маренина // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 14-й Международной научно-технической конференции, Омск, 12–15 марта 2024 года. — Омск: Омский государственный технический университет, 2024. — С. 74-75.
7. Lieblein S., Schwenk F.C., Broderick R.L. Diffusion Factor for Estimating Losses and Limiting Blade Loading in Axial-Flow-Compressor Blade Elements // NACA Technical Paper — 1953 — 46 p.

Инновационные решения комбинированных энергоустановок на базе ГТЭ-65 и топливных элементов Золотухина Е.Ю.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: газовая турбина, ГТЭ-65, твердооксидный топливный элемент, газовая турбина с впрыском пара, компрессор, камера сгорания

Key words: gas turbine, GTE-65, solid oxide fuel cell, gas turbine with steam injection, compressor, combustion chamber

Идея применения топливных элементов (ТЭ) в различных сферах промышленности зародилась еще в 20 веке. Свое применение они нашли в автомобильной промышленности, в качестве аккумуляторных батарей для портативных устройств, в теплоэнергетике и других отраслях. Наиболее развитыми являются технологии применения ТЭ в легковых и грузовых автомобилях. Однако, сейчас их начали активно развивать для работы на станциях как самостоятельные установки по выработке электрической энергии и теплоты, так и для работы в качестве гибридных энергетических установок (ГЭУ) [1, 2].

Целью работы является разработка новых решений для повышения энергоэффективности газовых турбин и тепловых электрических станций в целом.

Основной гипотезой данного исследования выдвигалось предположение, что внедрение ТЭ в схему работы газотурбинного двигателя позволит в значительной степени увеличить технические, экологические и экономические показатели всей электрической станции.

В качестве объекта для исследований взяты газовая турбина ГТЭ-65, производства АО «Силовые машины» и твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) для изучения взаимодействия двух систем друг с другой и их влияние на технические параметры ГЭУ.

В ходе выполнения работы был поставлен обширный перечень задач, а именно:

- изучить научную литературу и ознакомиться с аналогами работ, выявить недостатки проводимых исследований и определить пути их решения;
- разработать схемные решения реализации ГЭУ на базе ГТЭ-65 и ТОТЭ;
- выполнить расчет разработанных схем с применением специализированных программных обеспечений;
- с полученными результатами, доказав или опровергнув поставленную ранее гипотезу.

В работе были применены следующие методы:

- эмпирический, в ходе которого проводился анализ применяемых в работе установок, а также проводилось общение с различными исследователями по данной тематике;
- теоретический, основанный на изучении материалов статей и книг различных ученых и исследователей в данной области, а также было произведено первичное моделирование предлагаемого решения;
- количественный метод, основанный на выполнении расчетов разработанных решений и сопоставления полученных данных с реальными установками, на аналогии которых были проведены исследования и расчеты.

В результате исследования было разработано три схематических решения для работы газовых турбин с ТОТЭ. За основу были взяты ранние решения и модификации газовых турбин, а именно метод впрыска пара в различные их узлы [3–5].

Первая схема ГЭУ представляет собой газотурбинную установку (ГТУ) с полностью замещенной камерой сгорания на ТЭ. При таком варианте компоновки необходимо будет полностью пересмотреть строение ГТУ и выполнить ряд инженерных задач для реализации данной установки. Однако, при таком варианте работы вырабатываемая мощность ГЭУ возрастает на 34% до 82,4 МВт, а КПД установки по выработке электрической энергии увеличивается на 23% до 43,3%.

Вторая схема представляет собой ГТУ с впрыском воды, с размерами капель менее 25 мк в промежуточный узел компрессора, увеличивая тем самым степень сжатия и повышения давления, повышая массу воздуха, увеличивая эффективность при повышении температуры окружающего воздуха и экономя топливо. При такой схеме работы мощность установки увеличивается на 9% за счет добавления воды в тракт ГТУ и на 23% за счет работы ТОТЭ. суммарно мощность ГЭУ увеличилась до 89,4 МВт, а электрический КПД вырос суммарно до 48,2%.

Третья схема ГЭУ является аналогией второй схемы, но в данном решении предлагается выполнить впрыск водяного пара в камеру сгорания (КС).

Впрыск водяного пара в КС позволяет оптимизировать следующие характеристики:

- улучшение термодинамической эффективности цикла за счет улучшения смесеобразования и более полного сгорания топлива в КС, что приводит к более высокой теплотворной способности;
- снижение температуры в КС, при снижении рисков перегрева;
- снижение выбросов NOx за счет снижения пиковых температур в КС;
- снижение риска образования углеродных отложений и других, загрязняющих КС отложений.

Впрыск пара в КС ГТУ приводит к снижению эмиссии NOx на 12%, увеличению мощности установки до 75,6 МВт, а также увеличению КПД установки до 43,5%. При этом, за счет включения в схему ТОТЭ суммарная мощность ГЭУ увеличится до 104 МВт, а КПД по выработке электрической энергии до 49,9%.

Согласно полученным расчетным данным можно сделать вывод, что внедрение предложенных ГЭУ позволит увеличить вырабатываемую суммарную мощность установкой и в значительной степени увеличить электрический КПД такой установки. Также внедрение двух последних вариантов ГЭУ позволит сделать установку более вариативной и позволит

выводить ТОТЭ из работы при необходимости их технического обслуживания без остановки всей установки.

Такой принцип работы ГТУ совместно с ТОТЭ не был предложен и тем более не реализован, что дает возможность определенную нишу в данной области исследований и реализовать установки, ранее не разрабатываемые прямыми конкурентами.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в создании принципиально новых технологических решений в области энергетики. Реализация данного исследования в значительной степени позволит повысить конкурентные преимущества, количество и качество предлагаемых заказчику решений, разрабатываемых на предприятии.

Список использованных источников:

1. Кашин А.М., Голодницкий А.Э. Энергетические установки с топливными элементами – перспективы практического использования в электроэнергетике. М.: Вести в электроэнергетике, 2019. № 1. 221 с.

2. Гибридные топливные элементы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energovector.com/energoznanie-gibridnye-toplivnyeelementy.html> (дата обращения: 13.01.2025).

3. Батенин В.М. Парогазовая установка с вводом пара в газовую турбину — перспективное направление развития энергетических установок / Ю.А. Зейгарник, С.З. Копелев и др. М.: Теплоэнергетика, 1993. С. 46–52.

4. Бунькова О.И. Влияние впрыска пара в газовую турбину на эффективность цикла / О.И. Бунькова, Т.Ф. Богатова. Екатеринбург: Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н.И. (1945–2015) — Даниловских чтений (Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г.), 2019. С. 794–797.

5. Шишин А.А. Исследование впрыска воды и подвода пара в проточную часть энергетической газотурбинной установки ГТЭ-65 / А.А. Шишин, А.В. Титов, Б.М. Осипов, В.В. Кривоносова. Казань: Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2012. С. 47–51.

**Разработка и исследование тринарных парогазовых установок
на метано-водородных смесях
Зуйкин Р.Е. , Островский М.А.
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва**

Ключевые слова: *парогазовая установка, органический цикл Ренкина, радиальная турбина, низкокипящее рабочее тело*

Перспективным способом повышения эффективности производства электроэнергии на парогазовых блоках может служить переход от бинарных циклов к тринарным, в которых имеющиеся источники низкопотенциальной теплоты полезно используются для производства электроэнергии [1–3]. Кроме того, частичный или полный переход на водородное топливо также приводит к приросту эффективности и к снижению удельных выбросов вредных веществ в атмосферу.

В данной работе рассмотрено применение органического цикла Ренкина (ОЦР) в качестве дополнительного утилизационного контура в тринарной ПГУ, работающей на метано-водородной смеси, проведена структурно-параметрическая оптимизация ее параметров, даны рекомендации по виду рабочего тела и его характеристикам в паротурбинном и утилизационном контурах, разработана и численно исследована конструкция турбины ОЦР и котла-утилизатора с глубоким охлаждением уходящих газов ГТУ.

По результатам математического моделирования тепловых схем цикла Брайтона-Ренкина и органического цикла Ренкина при постоянной температуре подвода теплоты было установлено: добавление развитой системы регенерации теплоты в паротурбинный блок и добавление утилизационного контура на теплоносителе R245fa позволяет обеспечить прирост мощности двухконтурной ПГУ на 1,98, 2,64 и 3,24 МВт, а КПД на 0,38, 0,43 и 0,50% при температуре острого пара 540°C, 580°C и 620°C соответственно (рис 1).

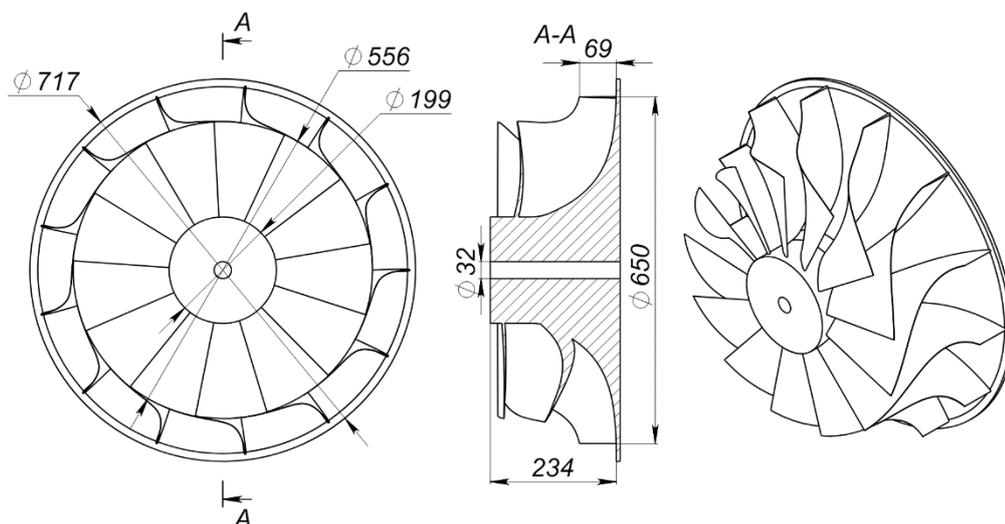


Рис 2. Чертеж радиальной турбины органического цикла Ренкина

Разработана конструкция котла-утилизатора с утилизационным теплообменником для глубокой утилизации теплоты уходящих газов тринарной ПГУ, работающей на метано-водородной смеси (рис. 3).

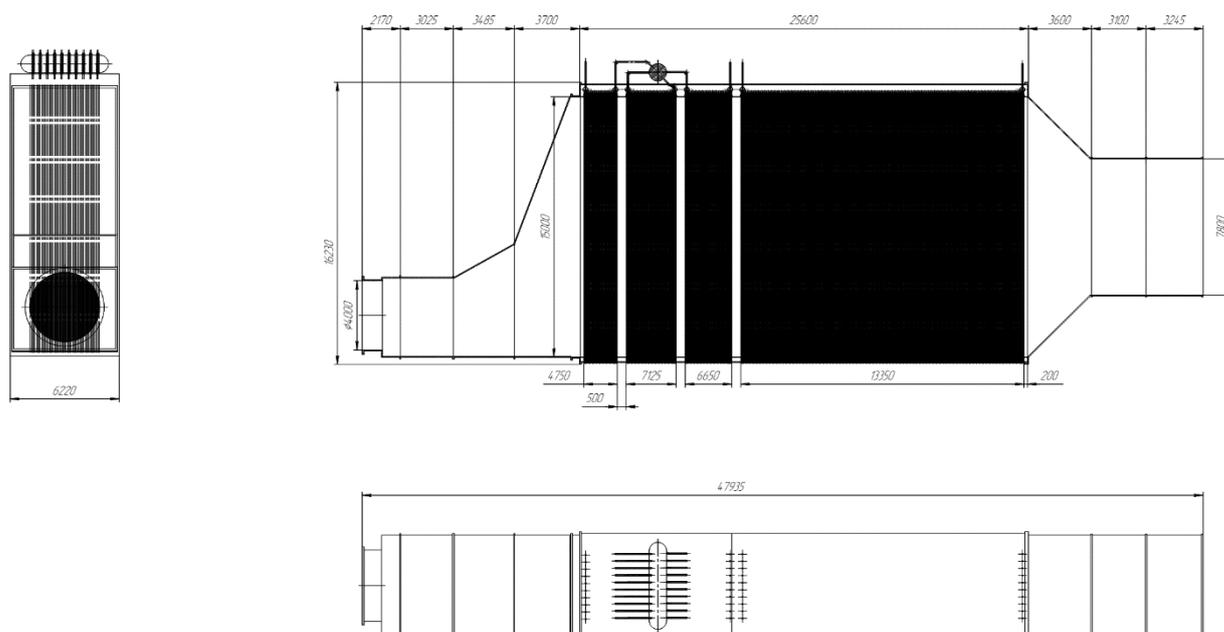


Рис 3. Чертеж котла-утилизатора с утилизационным теплообменником

В результате расчета процессов теплообмена были получены коэффициенты теплоотдачи для двух зон. В зоне охлаждения уходящих газов до температуры точки росы коэффициент теплопередачи составил 48,8, а для зоны с конденсацией водяных паров 134 Вт/м²·К соответственно.

Список использованных источников:

1. Максимов И.А., Зуйкин Р.Е., Островский М.А., Довгий Д.И., Бонадыков Н.М. Исследование способов организации регенеративного подогрева теплоносителя тринарной энергоустановки // Новое в российской электроэнергетике. — 2024. — № 6. — С. 32–44.

2. Киндра В.О., Наумов В.Ю., Скляр Н.С., Львов Д.Д., Максимов И.А. Тринарные энергетические циклы для высокоэффективного производства электроэнергии из ископаемого топлива // Новое в российской электроэнергетике. — 2022. — № 4. — С. 7–25.

3. Каршакова Е.С. Исследование эффективности ПГУ с утилизацией отходящего тепла с использованием органического цикла Ренкина. — Новосибирский государственный технический университет, 2021. — С. 239–242.

Расчетное исследование выбора рациональной длины и оптимального угла седла регулирующего клапана

Зырянов И.В.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: регулирующий клапан, седло регулирующего клапана, длина седла, угол седла, воздушные продувки

Key words: control valve, control valve seat, length of seat, angle of seat, air blow

Выполнен обзор и анализ экспериментальных данных воздушных продувок седел регулирующих клапанов. Сформулирована цель и задачи работы. Построены модели седел для проведения расчетных исследований. Выполнены расчетные исследования в Ansys. Проведено сравнение полученных расчетных данных с результатами экспериментальных продувок. Сделаны выводы о работоспособности расчетной модели.

Регулирующие клапаны высокого давления являются одним из важнейших элементов системы парораспределения. Когда клапан закрыт, чашка регулирующего клапана упирается в седло и препятствует поступлению пара в турбину. Во время работы турбины клапан открывается, и между ним и чашкой возникает так называемый клапанный канал, через который пар поступает в турбину. От степени аэродинамического совершенства клапанного канала зависит величина потерь давления в нем. Уменьшение величины потерь в клапанном канале, приводит к увеличению располагаемого теплоперепада в турбине, что увеличивает ее КПД.

На основании изложенного можно заключить, что тема данной работы, посвященная выбору рациональной длины и оптимального угла седла регулирующего клапана, является актуальной.

Целью работы является создание расчетных моделей конструкции седел регулирующих клапанов на основе экспериментальных данных воздушных продувок.

Указанная цель определила круг задач, подлежащих исследованию в рамках данной работы, а именно:

1. Выполнить обзор и анализ экспериментальных данных воздушных продувок.
2. Построить модели исследуемых вариантов седел регулирующих клапанов.
3. Создать расчетную модель в Ansys.
4. Провести сравнение расчетной модели с экспериментом.
5. Сделать выводы о работоспособности расчетной модели.

Объектом исследования является седло регулирующего клапана паровой турбины.

Предметом исследования являются длина и угол седла.

Метод исследования — расчетный.

Гипотеза работы — длина и угол седла оказывают влияние на величину потерь давления, что подтверждается экспериментальными и расчетными методами.

В результате работы получены расчетные модели различных вариантов конструкции седел регулирующих клапанов, которые в дальнейшем послужат основой для создания математической модели регулирующего клапана усовершенствованной конструкции.

Определение динамических напряжений в лопастях РО РК

Иванов А.А.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова. Рабочее колесо, динамические напряжения, прочностной расчет

Keywords: Runner, dynamic stresses, strength analysis

Аннотация. Целью работы являются расчетные исследования влияния режимов работы турбины на динамические нагрузки в лопасти РО ГТ. Определение динамических напряжений в лопасти рабочего колеса методом конечного элемента. Влияние профиля лопасти колеса на динамические напряжения. Оптимизация геометрии РК в ходе прочностного анализа напряженно-деформированного состояния.

Цель работы в проведении динамического расчета рабочих колес с разными профилями лопастей. Динамический расчет позволяет получить амплитуду напряжений и определить оптимальную форму лопасти как для энергетических показателей, так и для надежности.

Давления получены в ходе гидравлического расчета в динамической постановке в программе Ansys. Графики давлений изначального и оптимизированного колеса приведены на рис. 1–2.

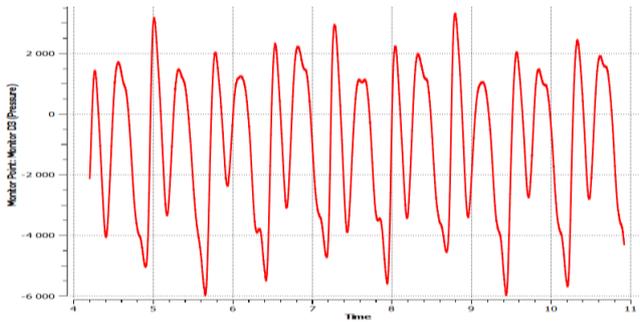


Рис. 1. График давлений изначального колеса

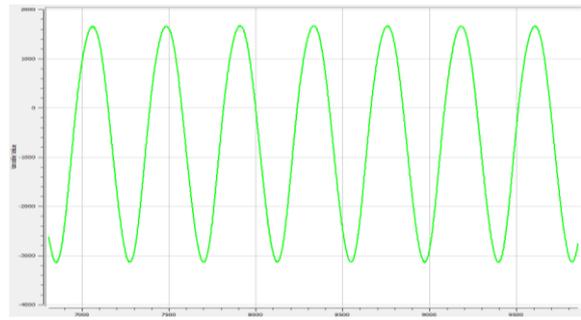


Рис. 2. Оптимизированного колеса

Конечно-элементная модель: рабочее колесо моделируется конечными элементами в виде тетраэдров (рис. 3). В качестве граничных условий задается закрепление рабочего колеса, давление на лопасти по временным шагам, вращение рабочего колеса (рис. 4).

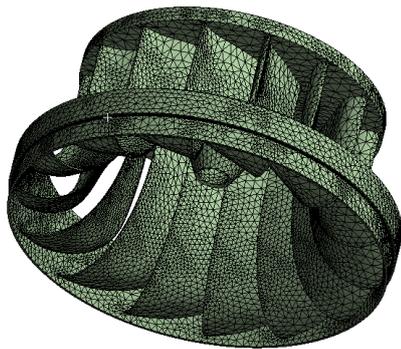


Рис. 3. Сетка конечных элементов

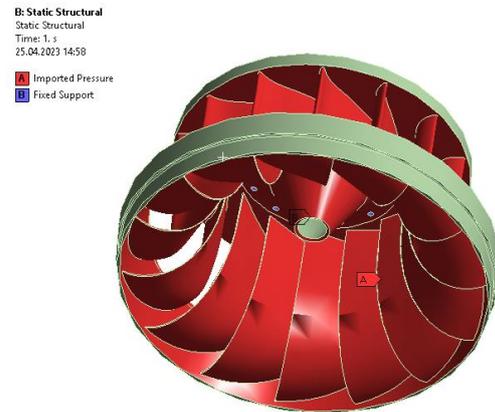
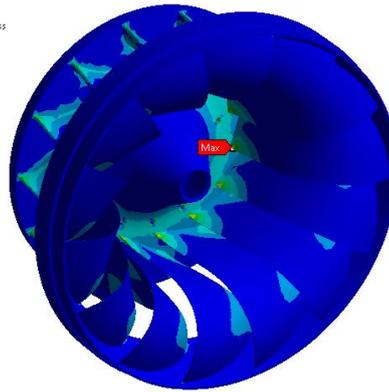


Рис. 4. Граничные условия

По результатам расчета получены поля эквивалентных напряжений лопасти и деформаций рабочего колеса (рис. 5–6).

C: Copy of Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 26
 28.04.2023 8:44

24.559 Max
 21.832
 19.105
 16.378
 13.651
 10.924
 8.1975
 5.4707
 2.7438
 0.016976 Min



B: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 147
 27.04.2023 11:02

0.046118 Max
 0.040993
 0.025969
 0.020745
 0.015621
 0.010497
 0.005373
 0.000248
 0
 Min

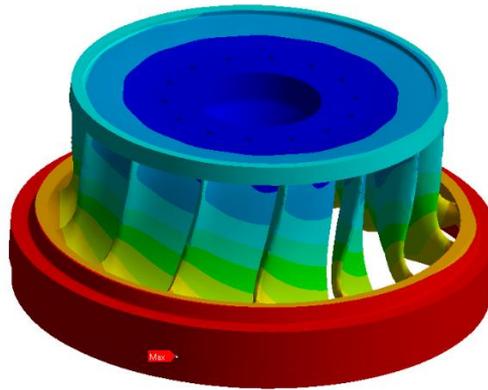


Рис. 5. Эквивалентные напряжения

Рис. 6. Деформации рабочего колеса

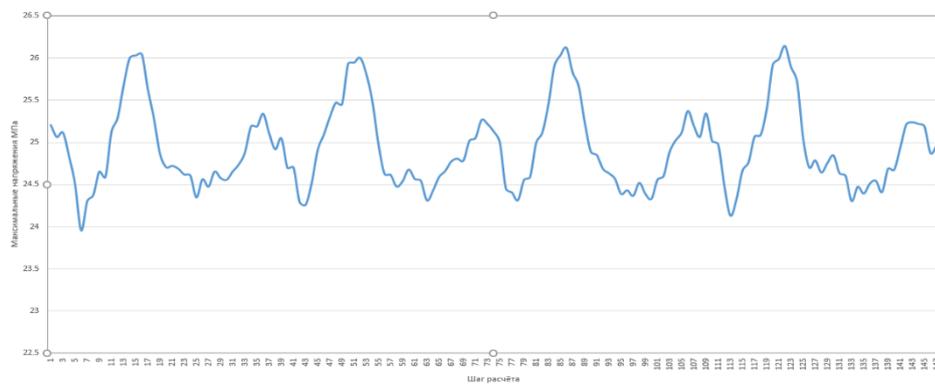


Рис. 7. График динамических напряжений изначального колеса

Сравнительные графики динамических напряжений изначального и оптимизированного колеса приведены на рис. 7–8.

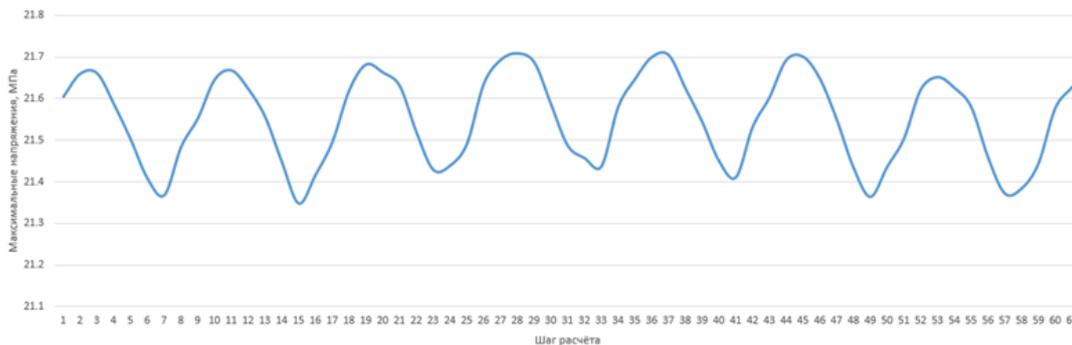


Рис. 8. График динамических напряжений оптимизированного колеса

Заключение. В ходе работы был произведен динамический прочностной расчет двух рабочих колес. Разработана методология динамического прочностного расчета для дальнейшего использования в рабочих проектах. Определен оптимальный профиль лопасти с лучшими энергетическими показателями, минимальными напряжениями и амплитудой динамических напряжений.

Анализ и оптимизация параметров утилизационного контура на базе отечественной газотурбинной установки ГТЭ-170.1

Исаков А.А.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: паровая турбина, газовая турбина, эффективность, котел-утилизатор, ГТЭ-160, ГТЭ-170.1, ПГУ-450

Key words: steam turbine, gas turbine, efficiency, waste heat boiler, GTE-160, GTE-170.1, PGU-450

В настоящее время основу отечественной энергетики составляют паротурбинные установки (ПТУ) тепловых электростанций. Сооружение ПГУ является в последнее время основной тенденцией развития мировой и отечественной теплоэнергетики, использование ПГУ более выгодно с энергетической точки зрения. Поэтому целесообразно развивать данное направление и повышать долю ПГУ на тепловых электростанциях путем модернизации старого оборудования и введением новых мощностей.

В связи с проблемами поставок зарубежного оборудования появилась потребность в производстве российских турбин и снижения доли иностранного оборудования.

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа ПГУ с существующими и вновь разрабатываемыми утилизационными контурами различных компоновок на базе отечественной газотурбинной установки ГТЭ-170.1.

Гипотеза работы заключается в оценке эффективности модернизации существующих блоков отечественной газовой турбиной, а также создание методики, позволяющей спроектировать максимально эффективную ПГУ с исходными паспортными параметрами газовой турбины, превосходящую существующие ПГУ блоки.

Объектом работы является цифровой двойник парогазовой установки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведено моделирование разработанных и вновь разрабатываемых ПГУ блоков в программе «United Cycle».
2. Разработана компоновка и подобраны оптимальные значения параметров перспективного КУ для обеспечения наибольшей эффективности [1, 2].
3. Произведены расчет и сравнение показателей эффективности вышеописанных установок.

Для определения основных характеристик на различных режимах и дальнейшего использования ГТУ в составе ПГУ блоков для формирования показателей эффективности модель была выполнена в «United Cycle». Также в «United Cycle» моделировалась работа ПГУ блока существующая модель ТЭЦ-22 «Южная ТЭЦ» Бл. 4, вновь разрабатываемого блока ПГУ-500 по данным, представленным АО «Силловые Машины» ЛМЗ и ПГУ блока с максимальной эффективностью на базе трехконтурного котла-утилизатора без промпрегрева.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ блока ПГУ-450 с двумя газовыми турбинами. Первый вариант с ГТЭ-160 — при одинаковой теплофикационной нагрузке с ГТЭ-170.1 показывает больший отпуск электроэнергии. Показатели эффективности ПГУ-450 и ПГУ-500 КИТТ — 79,18% и 78,21% соответственно. В условиях ограниченности поставок зарубежных комплектующих на ГТЭ-160 выгодно выделяется ГТЭ-170, однако прослеживается тенденция необходимости создания отечественных газовых турбин, обеспечивающих лучшие показатели эффективности.

2. Выполнен анализ двух вариантов утилизационной двухконтурной и трехконтурной установки в блоке с ГТЭ-170.1 на конденсационном режиме при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = +15^{\circ}\text{C}$. Более высокую эффективность показывает трехконтурная установка КПД КЭС 50,78% и 50,25% соответственно. Методика расчета трехконтурной установки может использоваться для проектирования утилизационного контура, обеспечивающий наибольшую эффективность в зависимости от параметров выхлопных газов за газовой турбиной. Соответствующие hs -диаграмма и tQ -диаграмма позволяют наглядно изучить процессы в КУ и паровой турбине, обнаружить слабые стороны текущего

рассчитываемого варианта, такие как большие температурные напоры в tQ -диаграмме, высокую влажность на последней ступени рабочего колеса ЦНД [3], наличие коррозии последних степеней теплообмена котельного агрегата [4,5], низкий КПД всей установки в сравнении с другими рассчитываемыми вариантами.

Новизна и оригинальность работы заключаются в уникальных решениях, таких как:

1. Сведение к минимуму количества расчетов для анализа эффективности установки и модернизации в целом.
2. Сокращение времени на расчет оптимальной утилизационной установки.

Ценность работы для компании «Силовые машины» заключается в том, что методика дает возможность быстро оценивать эффективность модернизации существующих блоков, что при условии отгрузки первой из четырех моделей ГТЭ-170.1 в рамках модернизации Каширской ГРЭС является актуальной темой.

Перспектива использования результатов работы заключается в том, что по параметрам эффективности, полученных с помощью моделирования, может быть принято решение о модернизации существующих блоков, а также о конструктивном изменении ГТЭ-170.1 с повышением начальных параметров для получения лучшей эффективности ПГУ блока.

Список использованных источников:

1. Ромахова Г.А. Газотурбинные установки электростанций: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 163 с.
2. WSP таблицы для Mathcad [Электронный ресурс] URL: <http://twt.mpei.ru/tthb/H2O.xmcdz> (дата обращения 03.02.2025).
3. Повышение эрозионной надежности входных кромок лопаточного аппарата ЧНД теплофикационных турбин [Электронный ресурс] URL: https://www.vyatsu.ru/uploads/file/1703/vlozh_2_povyshenie_erozionnoy_nadezhnosti.pdf?ysclid=lruck6a40xw202971220 (дата обращения 03.02.2025).
4. РД 34.26.105-84 с изм. 1 1995 года (МУ 34-70-118-84) Методические указания по предупреждению низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева и газоходов котлов.
5. Кузнецов Н.В. Рабочие процессы и вопросы усовершенствования конвективных поверхностей котельных агрегатов. Москва: Государственное энергетическое издательство, 1958.

Высокотемпературные сверхпроводниковые электрические машины для транспортных систем

Кадеров В.А., Иванов Н.С.

МАИ, Москва

Ключевые слова: сверхпроводимость, ВТСП электрические машины, двигатели, генераторы, высокая удельная мощность.

Keywords: superconductivity, HTS machines, engines, generators, high power density.

Электрификация транспорта признана одним из приоритетных направлений развития мировой транспортной отрасли. Это связано с ее значительными преимуществами, такими как снижение вредных выбросов, повышение энергоэффективности и уменьшение зависимости от ископаемых видов топлива. Ключевую роль в этом процессе играют высокоэффективные электрические машины, которые должны обладать высокой удельной мощностью и надежностью. Для их создания требуются инновационные материалы и технологии, среди которых особое место занимают высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП). Электрические машины на основе ВТСП способны превзойти традиционные аналоги по удельной мощности.

Основной целью проекта является разработка методик расчета и проектирования сверхпроводящих электрических машин с повышенной удельной мощностью. Для этого был проведен анализ современных проектов, посвященных сверхпроводниковым машинам, а также собраны и систематизированы исходные данные, необходимые для создания электрических машин под конкретные условия эксплуатации (таблица 1).

Табл. 1 – Актуальные проекты по разработке ВТСП машин

Проект	Тип машины	Частота вращения, мин ⁻¹	Мощность, МВт	Рабочая температура, К	Удельная мощность, кВт/кг
Китай [1]	Генератор	6000	10	20	13.1
Корея [2]	Двигатель	213	5	30	-
США [3]	Двигатель	6800	1.4	60	16
Норвегия [4]	Двигатель	3500	2.5	45	14.7

В результате удалось разработать модели электрических машин, превосходящие по своим характеристикам мировые аналоги.

В рамках исследования разработаны конечно-элементные модели, включающие ключевые компоненты машин: магнитопроводы, обмотки из ВТСП-материалов и конструктивные элементы. Рассмотрены различные конфигурации магнитопроводов и

рабочие температуры в диапазоне от 20 К до 77 К. На основе конечно-элементного анализа получены распределения магнитных полей, которые играют важную роль при проектировании ВТСП-машин, так как напрямую влияют на критические параметры сверхпроводниковых лент (рисунок 1).

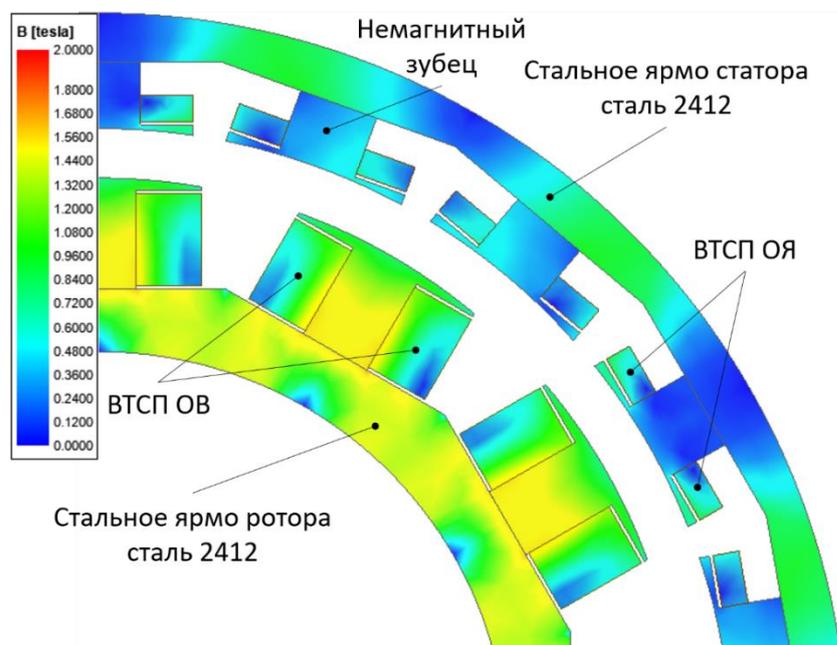


Рис. 1. Картина распределения магнитного поля в активной зоне ВТСП электрической машины

Пример такого распределения представлен на рисунке 1. Особое внимание уделялось анализу магнитного поля в области ВТСП-катушек, поскольку его распределение напрямую влияет на критические параметры сверхпроводниковой ленты, такие как критический ток и критическое магнитное поле. Учет этих параметров является ключевым для обеспечения стабильной работы ВТСП-машин и достижения их максимальной эффективности.

В работе представлены предварительные проекты четырех ВТСП-электрических машин с различными параметрами мощности, частоты вращения и рабочих температур (от 20 К до 77 К). Эти машины предназначены для использования в различных транспортных системах. Результаты исследования подтверждают, что разработанная методика позволяет создавать высокоэффективные ВТСП-машины, которые могут стать основой для дальнейшего развития электрифицированного транспорта.

Список используемых источников:

1. Zhou X. et al. Conceptual design, AC loss calculation, and optimization of an airborne fully high temperature superconducting generator // *Phys. C Supercond. its Appl.* Elsevier B.V., 2023. Vol. 605, № January. P. 1354207.
2. Moon H. et al. Development of a MW-Class 2G HTS Ship Propulsion Motor // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2016. Vol. 26, № 4. P. 6–10

3. Jansen R.H. et al. High efficiency megawatt motor preliminary design // AIAA Propuls. Energy Forum Expo. 2019. 2019.
4. Mellerud R., Nøland J., Hartmann C. Preliminary Design of a 2.5-MW Superconducting Propulsion Motor for Hydrogen-Powered Aviation // 2022 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2022. 2022. P. 1404–1410.

**Перераспределение нагрузок потребителей между несколькими центрами питания ТП 6/0,4 кВ для повышения качества электроэнергии
Калинин Д.И.¹, Петрушин Д.Е.², Луговская Л.А.²**

1 — Карельский филиал ПАО «Россети Северо-Запад», Петрозаводск

2 — Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск

Ключевые слова: *контроль качества электроэнергии, распределение нагрузок, перенос центра нагрузок*

Key words: *power quality control, load distribution, load center shifting*

В настоящей статье проводится анализ эффективности разработанных технических мероприятий для повышения качества электроэнергии, поставляемой жителям п. Новая Вилга Прионежского района Республики Карелия, при кратном увеличении нагрузок потребителей в течение последних нескольких лет. В качестве объекта исследования выбрана ТП 6/0,4 кВ № 3050 (ТП-3050) мощностью 400 кВА и отходящие от нее ВЛ-0,4 кВ Л-1 (560 м), Л-2 (450 м), Л-5 (470 м).

Пониженный уровень напряжения является одним из наиболее частых критериев несоответствия качества электроэнергии, поставляемой потребителям распределительных сетей в сельской местности [1]. Под качеством электрической энергии понимается степень соответствия характеристик электроэнергии в данной точке электрической системы нормативным показателям ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [2]. Обычно приведение показателей качества электроэнергии до значений, нормируемых указанным ГОСТом, осуществляется путем реконструкции существующих электрических сетей и дополнительным строительством, в том числе переносом центра питания в центр нагрузок (установка дополнительных ТП и КТП) и снижением систематической несимметрии напряжения в следствие несимметрии нагрузок путем перераспределения однофазных нагрузок между фазами с учетом равенства сопротивления нагрузок [3].

В настоящей статье проводится анализ эффективности разработанных технических мероприятий (рис. 1) для повышения качества электроэнергии, поставляемой жителям

п. Новая Вилга Прионежского района Республики Карелия, при кратном увеличении нагрузок потребителей в течение последних нескольких лет.

В качестве объекта исследования выбрана ТП 6/0,4 кВ № 3050 (ТП-3050) мощностью 400 кВА и отходящие от нее ВЛ-0,4 кВ Л-1 (560 м), Л-2 (450 м), Л-5 (470 м). В ноябре 2023 года по обращению потребителей, проживающих в п. Новая Вилга, Карельским филиалом ПАО «Россети Северо-Запад» были проведены непрерывные интервальные испытания качества электроэнергии на границе балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности, согласно [4], с одним из наиболее удаленных от ТП-3050 потребителей. По результатам испытаний был установлен пониженный уровень напряжения в ночной период до 162 В (рис. 2), причиной тому служит высокое электропотребление в это время отопительными электродкотлами.

Для улучшения качества электрической энергии, поставляемой в жилые дома в указанном населенном пункте, Карельским филиалом ПАО «Россети Северо-Запад» в срок до февраля 2024 года были произведены работы по разделению питающей линии 0,4 кВ Л-2 на две отдельные линии ВЛ-0,4 кВ Л-2 и ВЛ-0,4 кВ Л-5 (рис. 1 б).

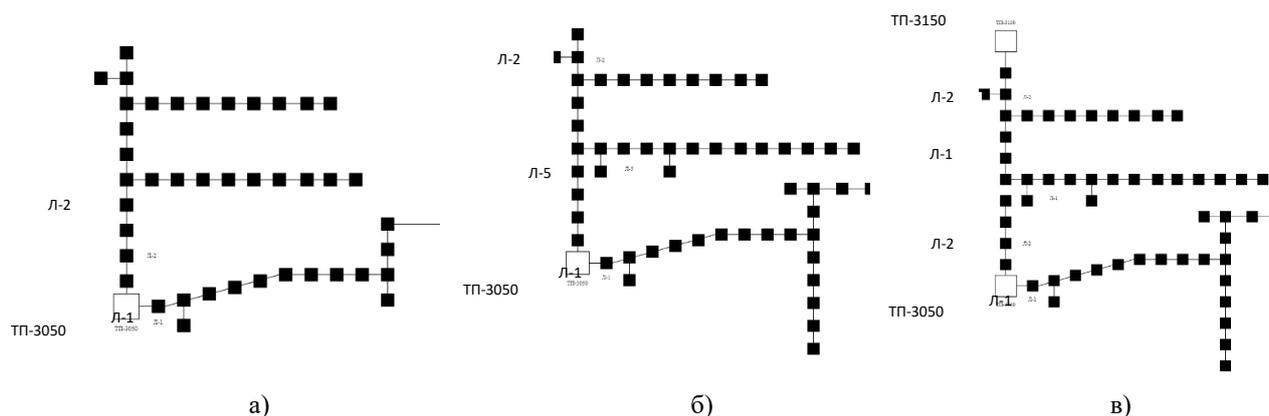


Рис. 1. Этапы изменения схемы линий 0,4 кВ: а — до разделения линии Л-2 от ТП-3050; б — после разделения линии Л-2 от ТП-3050 на Л-2 и Л-5; в — после распределения нагрузок между ТП-3050 и ТП-3150

После этого были проведены повторные испытания качества электроэнергии (рис. 3–5). Сравнительный анализ с предыдущими испытаниями показал, что уровень напряжения после выполнения мероприятий находится в диапазоне значений, регламентируемых ГОСТ 32144-2013. При сохранении уровня верхней границы фазного напряжения по стороне 0,4 кВ ТП-3050 в диапазоне от 231 В до 242 В произошло обновление нижней границы со 162 В до 199 В в период суточного максимума нагрузки.

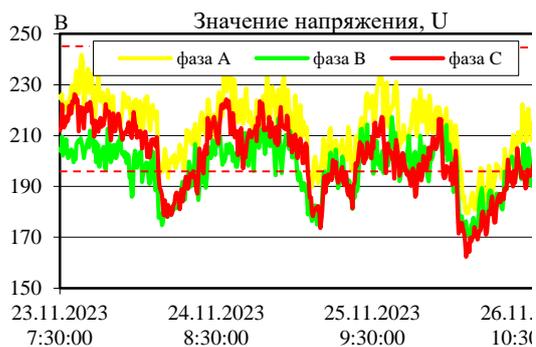


Рис. 2. Уровень напряжения в конце Л-2 (будущей Л-5) до разделения линий

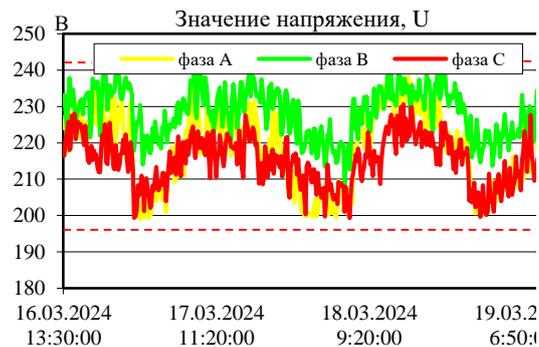


Рис. 3. Уровень напряжения в конце Л-5 после разделения линий

Результаты испытаний в конце уже разделенной линии Л-2 также доказали эффективность выполненных мероприятий (рис. 4), однако при этом уровень напряжения в конце наиболее протяженной линии Л-1 по одной из фаз был ниже требований ГОСТ (рис. 5).

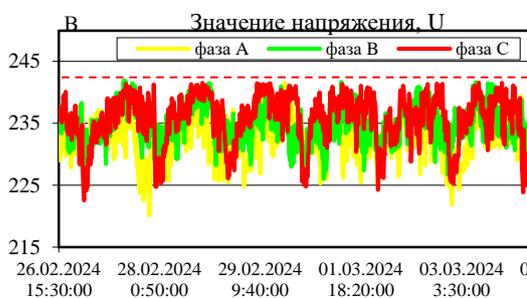


Рис. 4. Уровень напряжения в конце Л-2 после разделения линий

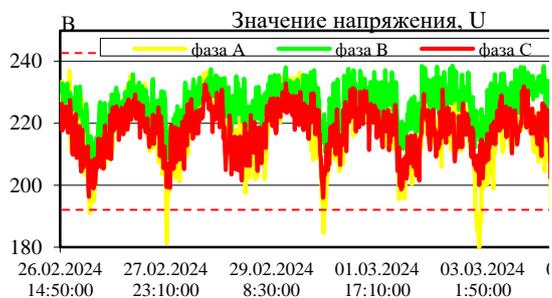


Рис. 5. Уровень напряжения в конце Л-1 после разделения линий

Следующий этап комплекса корректирующих технических мероприятий, выполненный до июля 2024 года, заключался в установке дополнительной ТП 6/0,4 кВ № 3150 (ТП-3150) мощностью 400 кВА с дальнейшим перераспределением части нагрузки от ТП-3050 на новую ТП-3150. После реализации мероприятий нагрузки жилых домов, питание которых ранее осуществлялось по ВЛ-0,4 кВ Л-5 от ТП-3050, были разделены между ТП-3050 (Л-2) и ТП-3150 (Л-1). Наиболее приближенные к ТП-3050 жилые дома сохранили прежнюю схему электроснабжения, а электроснабжение наиболее удаленных жилых домов стало осуществляться по ВЛ-0,4 кВ Л-2 от ТП-3150 (рис.1 в).

В течение второй половины 2024 года Карельским филиалом ПАО «Россети Северо-Запад» были выполнены контрольные непрерывные интервальные испытания (рис. 6–8) в наиболее удаленных точках разделенных между двумя ТП ВЛ-0,4 кВ. Испытания подтверждают эффективность реализованного комплекса мероприятий. На всех отходящих линиях 0,4 кВ соблюдается требование ГОСТ 32144-2013 — уровень напряжения находится в допустимом диапазоне значений от 198 В до 242 В [2]. Учитывалось сезонное дополнительное увеличение нагрузок в осенне-зимний период и строительство новых жилых домов,

подключенных к указанным воздушным линиям 0,4 кВ за 2024 год. В сравнении с сезонным режимом наименьших нагрузок (весенне-летний период) уровень напряжения у потребителей по данным опросов приборов учета может снижаться до 12,5% от среднего за наблюдаемый период значения (до 210 В) (рис. 9).

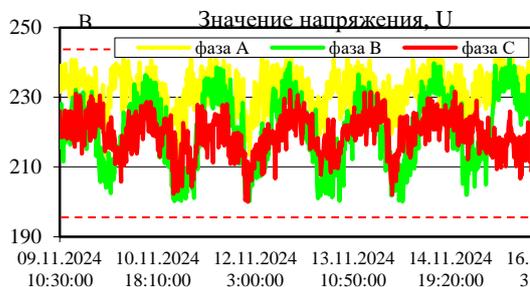


Рис. 6. Уровень напряжения в конце Л-2 от ТП-3050 после распределения нагрузок

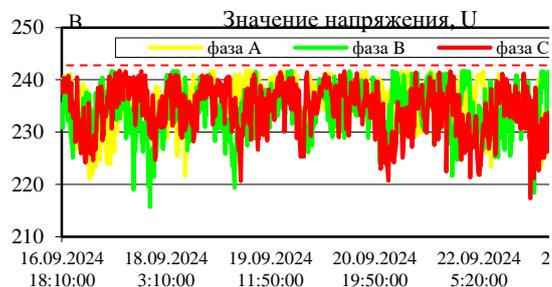


Рис. 7. Уровень напряжения в конце Л-1 от ТП-3150 (ранее Л-5 от ТП-3050) после распределения нагрузок

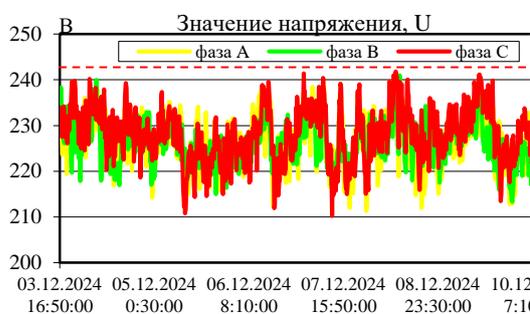


Рис. 8. Уровень напряжения в конце Л-1 от ТП-3050 после распределения нагрузок

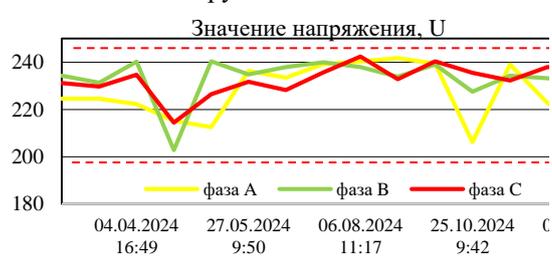


Рис. 9. Динамика изменения уровня напряжения в конце Л-1 от ТП-3150 (ранее Л-5 от ТП-3050) в течение года

Дополнительно по результатам мероприятий средняя загруженность ТП-3050 в течение года уменьшилась с 85% до 55%, что дает возможность дополнительной регулировки уровня напряжения посредством изменения положений регуляторов ПБВ.

Выводы

Анализ графиков динамики изменения уровня напряжения в наиболее удаленных точках воздушных линий 0,4 кВ до и после реализации комплекса мероприятий по повышению качества электроэнергии в п. Новая Вилга Прионежского района Республики Карелия показал, что выделение в качестве отдельных линий ВЛ-0,4 кВ существенной доли нагрузок потребителей и их распределение между несколькими центрами питания обеспечивает дополнительный запас регулирования устройств ПБВ при сезонном регулировании (при сезонном изменении нагрузок электропотребления) для положительной корректировки и дальнейшего сохранения параметров качества электроэнергии в диапазоне значений, регламентированных ГОСТ 32144-2013. Обеспечивается присоединение новых потребителей с неухудшением условий электроснабжения существующих потребителей. Результаты исследования могут быть применены для решения технических задач по

повышению качества электроэнергии в распределительных сетях.

Список использованных источников:

1. Калинин Д. Использование пункта автоматического регулирования напряжения для улучшения показателей качества электроэнергии в период максимальных нагрузок / Д.И. Калинин, Д.Е. Петрушин, Л.А. Луговская // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 22 ноября 2024 года. — Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2024. — С. 428–431.
2. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. — 20 с.
3. Данник Т. Эффективность различных мероприятий по повышению качества электрической энергии / Т. Данник, В. Дубровская // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2022. — № 1(24). — С. 42–48.
4. СТО 01.05.02–2019 Руководство по организации и проведению контроля и мониторинга качества электрической энергии. — СПб.: ПАО «Россети». — 34 л.

Разработка измерительной системы на основе радиолокационного метода для определения амплитудно-частотных характеристик лопатки

Карпычев А.В., Шорохова З.Ф.
ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург

Исследование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) лопаточных устройств в процессе эксплуатации судовых турбин является важной задачей для обеспечения надежности работы турбоустановок [1]. В связи с этим необходимо разработать эффективные и надежные методы их регистрации. Существующие системы часто имеют ряд недостатков, что ограничивает их универсальность и применение в различных условиях. К примеру, индукционные датчики требуют физической переработки лопатки для установки ответной части, особенно если лопатка выполнена не из магнитных материалов. Использование емкостных датчиков также накладывает повышенные требования к точности их установки и диапазону рабочих температур [2].

Многих таких недостатков лишены радиолокационные методы. Принцип действия радиолокационных систем основан на эффекте Доплера, позволяющем фиксировать перемещение участков поверхности в интервале скоростей от нескольких нанометров в секунду до околозвуковых, с регистрацией частотного спектра колебаний от 0,01 герц [3]. Система имеет ряд преимуществ в сравнении с другими системами измерений [4]. Эти методы

обеспечивают регистрацию частотного спектра колебаний от 0,01 герц. Радиолокационные системы предлагают ряд преимуществ по сравнению с другими методами измерения. Системы, использующие индукционные и емкостные датчики, не всегда обеспечивают необходимую субмиллиметровую точность измерения взаимных перемещений конструктивных элементов. Телевизионные системы, хоть и хороши для измерения тангенциальных перемещений, оказываются неэффективными для оценки перемещений вдоль линии визирования. Лазерные системы обеспечивают наибольшую точность измерения, однако имеют ряд серьезных ограничений: сложность инсталляции и эксплуатации, невозможность измерения в условиях повышенной задымленности, запыленности, при сильной вибрации, значительных изменениях температуры и влажности [5].

Цель работы. Разработка измерительной системы на основе радиолокационного метода для определения амплитудно-частотных характеристик лопаток.

Задачи работы. В ходе работы должны быть пройдены следующие этапы:

- 1) Разработка концепции нестандартных средств измерений.
- 2) Проведение прочностных расчетов и доработка конструкции для выполнения требований прочности.
- 3) Разработка метода сборки и монтажа гребенок.

Ход работы. На основе принципа работы радиолокационного блока разработан фазометрический измерительный комплекс (ФМК), представленный на рисунке 1. Принципиальная схема представлена на рисунке 2.

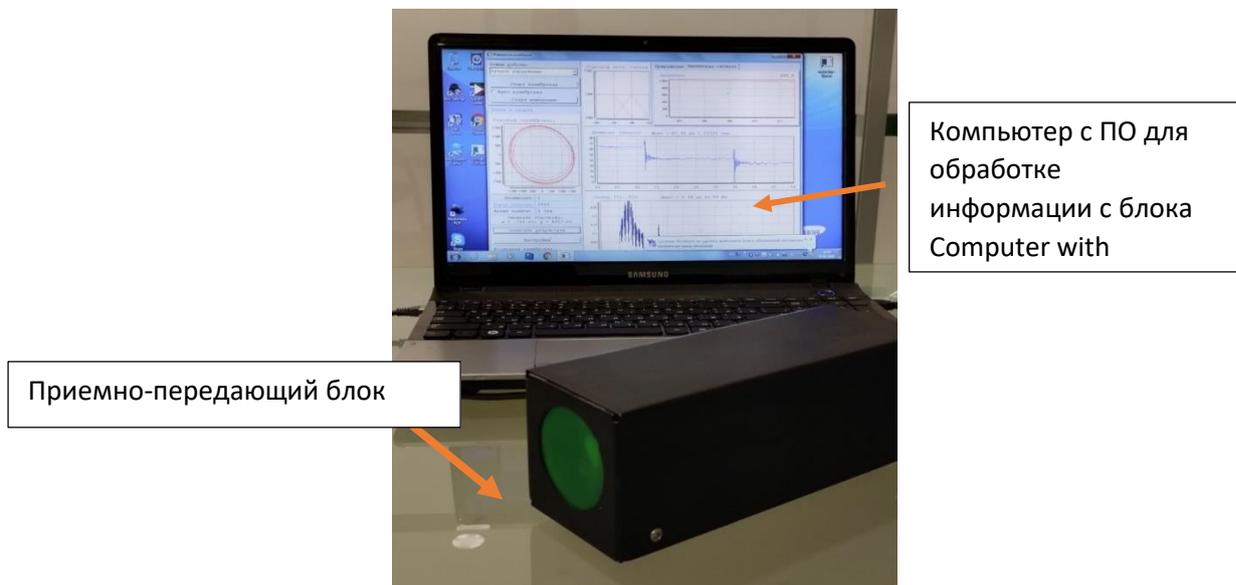


Рис. 1. Измерительная система ФМК на основе радиолокационного зондирования

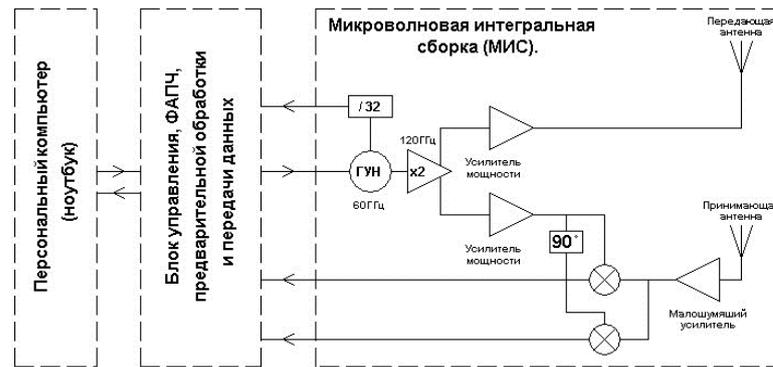


Рис. 2. Принципиальная схема ФМК

При этом необходимо учесть следующее — данные температурные интервалы относятся к приемно-передающему блоку ФМК. При постановке задач, связанных с измерениями внутри турбины, форсунок двигателя или другого объекта с повышенной температурой среды, разработана и апробирована схема, в которой приемно-передающий блок ФМК размещается удаленно, а зондирование в зоне с повышенной температурой проводится посредством волновода и излучателя из высокотемпературной керамики. Такая схема позволяет проводить измерения в зоне с температурой более 1000 °С.

Основные показатели измеряемых характеристик ФМК:

- диапазон измеряемых перемещений (с различными антеннами) — от 10^{-5} м до 1 м;
- диапазон скоростей (с различными регистраторами) — от 10^{-5} м/с до 10^5 м/с;
- диапазон измеряемых частот колебаний — от 10^{-3} Гц до 10^7 Гц;
- дальность действия (с различными антеннами) — от 0,005 м до 1 м;
- минимальная погрешность измерения перемещения — 5×10^{-6} м.

Программное обеспечение позволяет следующее:

- проводить автокалибровку прибора в процессе измерения;
- формировать базу данных испытаний;
- отображать в графическом режиме перемещения контролируемой поверхности;
- определять максимальную амплитуду колебания поверхности;
- строить АЧХ колебаний.

Заключение. Применение радиолокационной системы в качестве инструмента исследования лопаток позволяет упростить процесс анализа формы первого тона колебаний лопаток, а также получать и хранить весь спектр частот при ударном возбуждении лопатки, тем самым повышая надежность и информативность входного контроля качества изделия. Преимущества по сравнению с аналогами и показатели надежности дают возможность для использования в качестве измерительного системы АЧХ лопаточного аппарата во время

эксплуатации турбоагрегата. Также измерительный комплекс может быть использован в методе измерения зазоров турбин, а также в системе с дискретно фазовым методом [6].

Список используемых источников

1. Карпычев А.В., Исследование возможности моделирования спроса со стороны потребителя электроэнергии в электрической сети. Процессы управления и устойчивость. 2024; — № 11. С. 317–322.
2. Заболоцкий И.Е., Коростелев Ю.А., Шипов Р.А. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. // М., Машиностроение, 1977. С. 160.
3. Сандовский и др. Применение радиолокационной системы в качестве метода исследования лопаточного аппарата турбоагрегата // Надежность и безопасность энергетики. 2024, № 4.
4. Данилкин С.Ю. Развитие методов исследования колебаний лопаток рабочих колес турбомашин при стендовых испытаниях. Вестник УГАТУ 2019; (84): С. 17–25.
5. Шонгшен Шен. Анализ и калибровка измерения вибрации лопатки при переменных скоростях вращения 2021, — № 99.
6. Корабейников Д.Н. и др. Современные системы радиолокации. Инновации Наука Образование 2021, № 34: С. 765–777.

Управление температурным режимом конструкции на основе проектирования анизотропии тепловых свойств изделий, изготовленных

с применением аддитивных технологий

Киселев В.П., Ежов А.Д., Быков Л.В.

МАИ, Москва

Ключевые слова: биметаллические материалы, композиты, металлы, аддитивные технологии, прочность, теплопроводность, анизотропия.

В работе описывается возможность использования биметаллических композиционных изделий, изготовленных с применением аддитивных технологий, объединяющих сильные стороны разных металлов, что открывает новые возможности для проектирования и создания сложных деталей с заданными тепловыми и механическими свойствами. В частности, аддитивное производство может быть полезно для создания деталей одновременно с высокой прочностью и направленной теплопроводностью. Производство деталей из двух разных металлов позволяет объединить необходимые механические свойства (прочность, жесткость, коррозионную стойкость) с тепловыми (высокая теплопроводность). Такое сочетание прочности и теплопроводности может быть важным фактором во многих отраслях промышленности. Для оценки влияния полученной таким способом анизотропии

теплопроводности было проведено численное моделирование. Результаты моделирования показывают значительное снижение средней температуры теплонагруженного биметаллического изделия с анизотропией теплопроводности по сравнению с аналогичным монометаллическим изделием.

Биметаллические композиционные материалы достаточно давно применяются в случаях, когда необходимо использовать преимущества каждого из входящих в них металлов. Долгое время такие материалы имели, как правило, слоистую структуру из-за технологических ограничений [1, 2]. Однако с развитием аддитивных технологий появилась возможность изготовления биметаллических изделий более сложной конфигурации. Современные аддитивные технологии представляют собой процесс создания трехмерных объектов путем послойного добавления металлического порошка либо подачи металлического порошка или проволоки непосредственно в место нанесения. Одной из ключевых особенностей этих технологий является возможность печати двумя или более различными материалами одновременно, что позволяет создавать биметаллические и мультиметаллические детали [3, 4, 5]. Это открывает новые возможности для проектирования и производства сложных конструкций, которые сочетают в себе различные механические и физические свойства. В частности, это может быть использовано для создания деталей, требующих сочетания высокой прочности и направленной теплопроводности.

Изготовление изделий, состоящих из двух различных металлов, позволяет сочетать нужные механические свойства, такие как прочность, жесткость и устойчивость к коррозии, с тепловыми характеристиками, такими как высокая теплопроводность [6–10]. Сочетание направленной теплопроводности и высокой прочности конструкции является важным фактором для многих отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая, автомобильная и энергетическая. Это может быть полезно для создания высокоэффективных теплообменников, стенок камер сгорания, лопаток турбин и других деталей, работающих при высоких температурах и нагрузках.

В настоящей работе предложено изготовление изделий с заданным преобладающим направлением теплового потока с помощью аддитивных технологий. В отличие от традиционных слоистых биметаллических материалов здесь предлагается построение металлического композиционного материала с однонаправленным теплопроводящим наполнителем. Данная структура должна позволить иметь существенную анизотропию теплопроводности при умеренном снижении прочностных свойств. В зависимости от теплопроводности исходных материалов коэффициент теплопроводности в направлении

укладки теплопроводящего наполнителя может превышать коэффициент теплопроводности в поперечном направлении.

Для оценки выраженности анизотропии теплопроводности биметаллического композиционного материала было проведено численное моделирование в программном пакете ANSYS кубического образца со стороной 10 мм с матрицей из нержавеющей стали 316L и однонаправленного медного наполнителя (рис. 1). Результаты моделирования в виде значений коэффициентов теплопроводности вдоль ориентации медного наполнителя λ_{\parallel} , в поперечном направлении λ_{\perp} , а также коэффициенты теплопроводности исходных материалов, взятые для расчета, приведены в таблице 1.

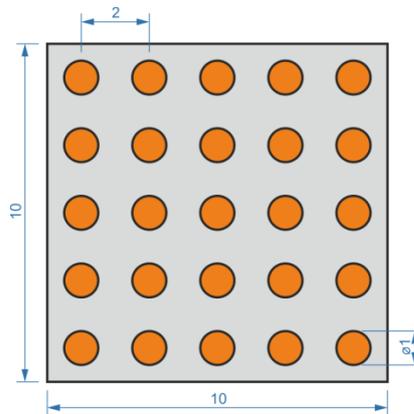


Рис. 1. Схема образца биметаллического материала. Серым цветом обозначена нержавеющая сталь 316L, оранжевым цветом — медь.

Табл. 1. Коэффициенты теплопроводности биметаллического композиционного материала и исходных металлов

Коэффициент теплопроводности	λ_{\parallel}	λ_{\perp}	λ_{316L}	λ_{Cu}
Значение, Вт / (м · К)	131,28	22,391	13,8	400

В качестве примера биметаллического изделия с направленной теплопроводностью в данной работе рассмотрена модель лопатки турбины. Модель лопатки представляет собой тело из нержавеющей стали, внутри которого находятся медные стержни. Было смоделировано обтекание модели потоком горячего воздуха со скоростью 200 м/с и температурой 1200 °С. По результатам численного моделирования в программном пакете ANSYS было получено температурное поле на поверхности и внутри модели лопатки. Для оценки влияния биметаллической структуры на тепловые свойства изделия было проведено сравнительное численное моделирование аналогичного изделия только из нержавеющей стали с однородной внутренней структурой. Сравнение температур на передних кромках моделей лопаток приведено на рис. 2.

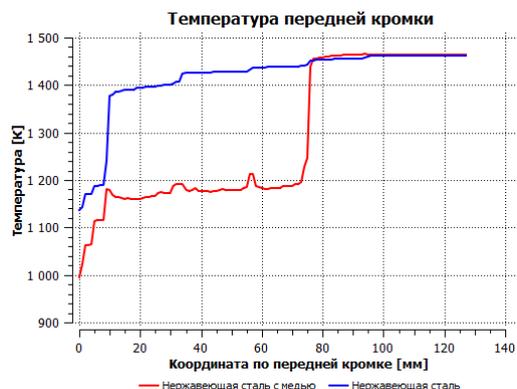


Рис. 2. Распределение температуры по передней кромке моделей лопатки.

Красный цвет — модель лопатки из биметаллического композиционного материала;

синий цвет — модель лопатки из нержавеющей стали 316L.

Однако, несмотря на все преимущества, использование двух разных металлов в одной детали может иметь ряд ограничений. Во-первых, необходимо учитывать разницу в температурном расширении между двумя металлами, так как это может привести к деформации и разрушению детали при высоких температурах. Во-вторых, более низкая температура плавления одного из металлов может вызвать проблемы при эксплуатации детали при высоких нагрузках и температурах. В-третьих, свариваемость двух разных металлов может быть затруднена, что также может ограничивать их совместное использование.

Таким образом, современные аддитивные технологии, позволяющие печатать двумя металлами одновременно, открывают новые возможности для разработки биметаллических деталей с недостижимыми другими способами эксплуатационными свойствами. Однако, для успешного использования этих технологий необходимо учитывать ограничения, связанные с различиями в свойствах двух металлов и их взаимодействием друг с другом.

Список использованных источников

1. Muhammad A.M. The Progressive Development Of Multifunctional Composite Materials In Different Applications // *Angkasa Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, Vol. 12, No. 2, 2020. pp. 9-18.
2. Ramadan M., Fathy N., Abdel Halim K.S., Alghamdi A.S. New trends and advances in bi-metal casting technologies // *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, Vol. 6, No. 2, 2019. pp. 75-80.
3. Groden C., Champagne V., Bose S., Bandyopadhyay A. Inconel 718-CoCrMo bimetallic structures through directed energy deposition-based additive manufacturing // *Materials Science in Additive Manufacturing*, Vol. 1, No. 3, 2022. pp. 1-8.
4. Squires L., Roberts E., Bandyopadhyay A. Radial bimetallic structures via wire arc directed energy deposition-based additive manufacturing // *Nature Communications*, Vol. 14, 2023.

5. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2013.
6. Wang Y., Gao Y., Li Y., Zhai W., Sun L., Zhang C. Review of preparation and application of copper–steel bimetal composites // *Emerging Materials Research*, Vol. 8, No. 4, 2019. pp. 538-551.
7. В.П. Киселев, А.Д. Ежов, С.Д. Селиверстов [и др.] Анизотропия теплопроводности аддитивных металлов, полученных методом селективного лазерного сплавления на примере нержавеющей стали CL 20ES // *Тепловые процессы в технике*. — 2021. — Т. 13, № 7. — С. 329–335. — DOI 10.34759/tpt-2021-13-7-329-335.
8. А.Д. Ежов, И.В. Котович, В.П. Киселев. Оценка влияния технологии аддитивного изготовления топологически оптимизированных изделий из фотополимерных смол на анизотропию их механических свойств // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. — 2024. — № 2. — С. 16–23. — DOI 10.15593/perm.mech/2024.2.02.
9. В.Д. Родин, М.С. Шилов, И.В. Котович. Тепловое состояние блока цилиндра двигателя внутреннего сгорания, изготовленного по аддитивной технологии // *Гагаринские чтения 2024: Сборник тезисов докладов 50-ой Международной молодежной научной конференции, Москва, 09–12 апреля 2024 года*. – Москва: ООО «Издательство "Перо"», 2024. — С. 85–86. А.Д. Ежов, М.С. Шилов, А.О. Полетаев. Тепловой и прочностной расчет контактной пары термобарьерного покрытия и стенки цилиндра поршневого двигателя, изготовленного по аддитивной технологии // *Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли: Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции памяти профессора А.В. Алиева, Ижевск, 11–12 апреля 2024 года*. — Ижевск: ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 2024. — С. 24–25.

**Автоматизированное устройство по переработке пластика в филамент
для использования в процессах производства**

Ковалев В.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

Ключевые слова: переработка, производственный процесс, макетирование, макет деталей.

В ходе исследования и разработки концепции были проанализированы различные аналоги. На рынке пока не представлены подобные устройства в производственных масштабах. Существующие альтернативы в основном являются примитивными установками

для личного пользования, также они не могут выполнять некоторые поставленные перед ними задачи и имеют ряд недостатков. Из недостатков можно отметить: низкое качество получаемого продукта, непродуманность конструкции, недоработанное программное обеспечение.

Работа конечного устройства разделена на два этапа: сортировка сырья с помощью технического зрения и дальнейшая переработка в филамент.

Для сортировки необходимых бутылок их нужно поместить на приемную площадку, откуда начнется процесс сортировки. При поступлении бутылки на платформу при помощи оптического датчика обнаружения запустится движение конвейерной ленты благодаря специальному мотору. Когда бутылка попадет в зону действия датчика камеры, будет произведен автоматический отбор по цвету с использованием технического зрения. В основе работы лежит процесс распознавания камерой объектов в виде изображений, которые передаются в систему и распознаются нейронной сетью. Нейронная сеть сопоставляет изображение с камеры с заданными параметрами (цвет), которые уже заложены в программу и имеют свой алгоритм отбора. При несоответствии с известными параметрами линейный актуатор вытолкнет бутылку за пределы конвейерной ленты в специально отведенное место, а нужная бутылка поедет дальше — на переработку.

Благодаря такой системе мы исключаем фактор человеческой ошибки и повышаем качество будущего сырья для переработки, потому что в данном процессе недопустима возможность использования несоответствующих объектов.

Как устроено автоматизированное устройство для переработки пластиковых бутылок в филамент? Сначала с помощью резака для пластика из бутылок делают ленты с контролируемой шириной для разного типа бутылок, которые с помощью шагового двигателя наматываются на катушку. После того как будет готово необходимое количество сырья, ленту протягивают через экструдер, на выходе которого получается готовый к использованию филамент. Благодаря редуктору он попадает на бобину для дальнейшей эксплуатации и транспортировки. Работа станка почти полностью автоматизирована и управляется программно с помощью микроконтроллера: регулировка скорости вращения бобины и катушки, температура сопла экструдера задаются через клавиатуру с жидкокристаллическим индикатором (ЖКИ).

С помощью программного обеспечения для 3D-моделирования «Компас-3D» была разработана модель редуктора станка. Она представлена на рисунке 1.

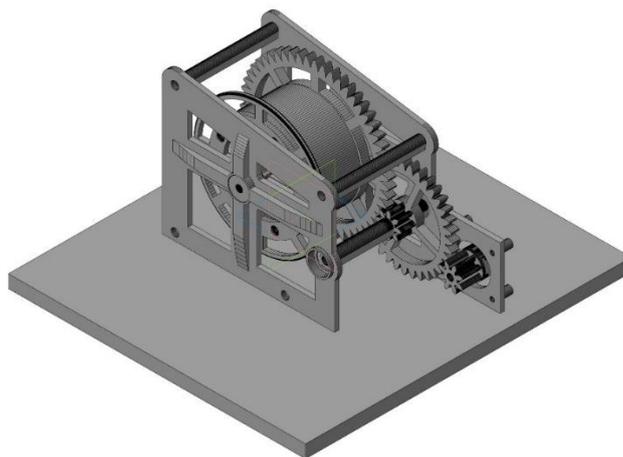


Рис. 1. Модель редуктора

Автоматизированное устройство по переработке ПЭТ-пластика в филамент представляет собой инновационное решение для решения проблемы пластиковых отходов. Эта технология не только снижает количество ненужного мусора, но и способствует устойчивому производству 3D-печатных материалов. Устройство эффективно перерабатывает пластиковые отходы, превращая их в качественный филамент, который может быть использован в различных сферах — от искусства до промышленности.

Список использованных источников:

1. Кутц Майер. Справочник по деградации материалов в окружающей среде. — 2 изд. — Elsevier Science, 2012.
2. Самодельные филаменты из ПЭТ-бутылок для 3D-печати // vektorus URL: <https://vektorus.ru/blog/plastik-dlya-3d-printera-iz-pet-butyllok.html> (дата обращения: 10.10.2023).
3. В.И. Коробкин, Л.В. Передельский. Экология и охрана окружающей среды. — М.: КноРус, 2012. — 336 с.
4. Приставка Е. 90% на свалку: какие проблемы у переработки пластика в России / Приставка Е. [Электронный ресурс] // Hightech: [сайт]. — URL: <https://hightech.fm/2021/04/15/recycle-russia-plastic> (дата обращения: 10.10.2023).
5. Stop plastic pollution / [Электронный ресурс] // WWF: [сайт]. — URL: https://www.wwfca.org/en/campaigns_main/stopplastic/ (дата обращения: 10.10.2023).
6. Вторичная переработка пластика: способы, технология, выгода / [Электронный ресурс] // RCYCLE.NET: [сайт]. — URL: <https://rcycle.net/plastmassy/vtorichnaya-pererabotka-plastika-sposoby-tehnologiya-vygoda> (дата обращения: 10.10.2023).

**Разработка решателя трехмерных задач механики деформируемого твердого тела
методом конечного элемента в кодах С для исследования напряженно
деформированного состояния узлов котлоагрегата
Колесников А.А.**

ПАО ТКЗ «Красный котельщик», Таганрог

Ключевые слова: решатель метода конечных элементов, численные методы механики сплошных сред, напряженно-деформированное состояние

Key words: finite element method solver, numerical methods of continuum mechanics, stress-strain state

В последние десятилетия метод конечных элементов (МКЭ) стал неотъемлемым инструментом для анализа механики деформируемого твердого тела, особенно в сфере проектирования и оценки напряженно-деформированного состояния котлоагрегатов. Решение трехмерных задач механики требует точного моделирования геометрии и физических свойств материалов. Основная цель данной работы заключается в разработке эффективного решателя МКЭ на языке С, который позволит исследовать напряженно-деформированное состояние узлов котлоагрегата. В процессе работы рассматриваются важные аспекты: входной пакет карт, алгоритмы алгебры разреженных матриц и их структуры данных, прямые и итерационные методы решения систем линейных алгебраических уравнений, матрица упругости изотропного материала, обобщенный закон Гука, расчет глобальной и локальной матрицы жесткости, функции формы, деформации и градиентная матрица, принцип виртуальной работы, граничные условия Дирихле и Неймана, распределенные нагрузки, тензор напряжений Коши. Особое внимание уделяется валидации и верификация разработанного решателя. Применение разработанного решателя позволяет не только проводить анализ существующих конструкций, но и оптимизировать их проектирование, что способствует повышению надежности и безопасности котлоагрегатов, уменьшению металлоемкости. Результаты работы могут использоваться как в научных исследованиях, так и в практических приложениях, что делает их актуальными для современных методов инженерного анализа.

Основной целью работы является создание эффективного инструмента для анализа напряженно-деформированного состояния узлов котлоагрегата, который является критически важным элементом в энергетических установках. Существующие пакеты для решения подобных задач отличаются закрытостью, сложностью в использовании и высокой стоимостью.

Гипотеза исследования заключается в том, что разработанные алгоритмы и программное обеспечение, основанные на методе конечных элементов, позволят достоверно

моделировать напряженно-деформированное состояние узлов котлоагрегата, что приведет к оптимизации их проектирования и будет способствовать более качественной оценке прочностных характеристик узлов котлоагрегата при различных условиях эксплуатации.

Объектом исследования являются узлы котлоагрегата (сосуды давления, опоры трубопроводов, крепления мембранных экранов, элементы опорно-подвесной системы и каркаса и т. д.), подверженные сложным механическим воздействиям. Исследование включает в себя разработку математических моделей, разработку алгоритмов расчета и структуры данных, программное обеспечение решателя численных методов механики сплошной среды, которое позволит оптимизировать и анализировать результаты. Полученные результаты станут основой для дальнейших исследований в области повышения надежности и безопасности котлоагрегатов в условиях современного энергетического рынка.

Основные **задачи** работы включают: анализ и моделирование механических свойств изотропных материалов, определение тензора напряжений Коши и деформаций в узлах под воздействием различных нагрузок, а также разработку алгоритмов для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных задач механики сплошной среды.

Методы работы включают как теоретические, так и практические подходы: формирование математической модели, имплементацию численных алгоритмов метода конечных элементов, процедурное программирование и методы тестирования программного обеспечения.

Результаты исследования продемонстрировали высокую точность и эффективность предложенного решателя, что позволило получить детализированные данные о напряженно-деформированном состоянии узлов котлоагрегата. Эти данные служат основой для оптимизации конструкции и повышения эксплуатационной надежности оборудования. В будущем планируется расширение функционала решателя для учета более сложных эксплуатационных моделей.

Основные **выводы** исследования заключаются в том, что разработанный решатель обеспечивает высокую точность моделирования и позволяет эффективно анализировать сложные механические нагрузки, действующие на конструкции. Решатель включает интеграцию в систему автоматизированного проектировочного и поверочного расчета на всех стадиях проектирования котлоагрегатов. Решатель прошел верификацию и апробацию и готов к использованию при проектировании узлов всей номенклатуры котлоагрегатов и энергетических установок.

Новизна работы заключается в интеграции современного подхода к моделированию и расчетам, что позволяет улучшить точность и скорость вычислений по сравнению с

существующими методами. Оригинальность решения заключается в адаптации алгоритмов метода конечных элементов для специфических условий эксплуатации котлоагрегатов, что обеспечивает более глубокое понимание поведения материала под нагрузкой.

Ценность работы для компании заключается в повышении надежности и безопасности котлоагрегатов, что соответствует требованиям заказчика к повышению точности проектировочного и поверочного расчетов, увеличению ресурса, снижению трудоемкости проектных работ без снижения качества. Разработка программного обеспечения способствует снижению затрат на физические испытания и позволяет минимизировать риски, связанные с эксплуатацией оборудования, тем самым повышая конкурентоспособность компании на рынке.

Перспектива использования результатов исследования в компании заключается в возможности сокращения времени разработки и повышения надежности оборудования. Разработанный решатель может быть внедрен в процесс проектирования и испытаний новых узлов котлоагрегатов, что позволит снизить риски отказов и увеличить эксплуатационный ресурс. Кроме того, применение данной методологии откроет новые горизонты для оптимизации конструкций и улучшения экономической эффективности производства.

Список использованных источников:

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.
2. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов — М.: Мир, 1979. — 392 С.
4. Лурье А.И. Теория упругости. — М.: Наука, 1970. — 940 с.
5. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. — М.: Наука, 1979. — 744 с.
6. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. — М.: Наука, 1962. — Т. 1.
7. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. — М.: Наука, 1959. — Т. 2.
8. Калиткин Н.Н. Численные методы. — М.: Наука, 1978.
9. Горшков А.Г., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Основы тензорного анализа и механика сплошной среды. — М.: Наука, 2000. — 214 с. — ISBN 5-02-002494-5.
10. Керниган Б., Ритчи Д. Язык программирования Си = The C programming language. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2007. — С. 304. — ISBN 0-13-110362-8.

Экспериментальные исследования и отработка конструкции опорно-упорного подшипника с высокой несущей способностью для газовой турбины ГТЭ-65.1

Кондаков А.С.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: газовые турбины, подшипник скольжения, опорно-упорный подшипник, модернизация, натурные испытания, несущая способность, ресурс

Key words: Gas turbines, sliding bearings, thrust bearing, modernization, full-scale tests, load-bearing capacity, resource

В настоящий момент на производственных мощностях АО «Силовые машины» ведется изготовление головного образца газовой турбины ГТЭ-65.1. Одним из важнейших вопросов, связанных с эксплуатацией данной машины, является надежная работа опорно-упорного подшипника скольжения.

Существующая конструкция опорно-упорного подшипника была проверена в период проведения пуско-наладочных работ по ГТЭ-65.0 на ТЭЦ-9 (г. Москва) в 2012 году. В ходе работ были выявлены несоответствия в работе подшипника — перегрев упорных колодок и протечки масла через уплотнения в проточную часть газотурбинной установки.

В период проработки конструкции ГТЭ-65.1 опорно-упорный подшипник являлся одним из «узких мест» в разработке и изготовлении новой машины. С целью выявления причин перегрева упорной части и определения несущей способности подшипника были проведены стендовые испытания опорно-упорного подшипника существующей конструкции, результаты которых отражены в техническом отчете №751.065.23-0754 [1]. Проведенные испытания указали недостатки имеющейся конструкции подшипника в части эксплуатационной надежности, были выявлены несоответствия заявленных ранее характеристик. Параллельно с проведением испытаний опорно-упорного подшипника ГТЭ-65.0 была осуществлена разработка новой конструкции опорно-упорного подшипника с последующим запуском в изготовление.

Данная работа посвящена разработке и внедрению новых конструкторских решений, применяемых в конструкции опорно-упорного подшипника ГТЭ-65.1, на основе анализа экспериментальных данных, полученных в результате натурных испытаний подшипника на стенде.

Основными целями работы являются:

- Повышение несущей способности подшипника.
- Повышение эксплуатационной надежности.
- Повышение ремонтпригодности.

Объектом работы является опорно-упорный подшипник новой конструкции газовой турбины ГТЭ-65.1.

Главными методами работы являются проведение натурных испытаний опорно-упорного подшипника на стенде для экспериментального подтверждения вышеуказанных целей, а также получение характеристик подшипника при различных режимах работы турбоагрегата.

К задачам работы можно отнести:

- Анализ существующей конструкции и проведение опытных исследований опорно-упорного подшипника ГТЭ-65.0.
- Разработка рабочей конструкторской документации на новую конструкцию опорно-упорного подшипника ГТЭ-65.1.

По результатам работы были подтверждены примененные конструкторские решения, а также определены пути дальнейшей модернизации опорно-упорного подшипника.

Основные выводы по проделанной работе:

- Подтверждена общая работоспособность подшипника новой конструкции.
- Подтверждено конструкторское решение о внедрении форсунок подвода масла перед каждой колодкой.
- Подтверждено конструкторское решение по внедрению втулки на опорной части подшипника для повышения ремонтпригодности.
- Подтверждено конструкторское решение по оптимизации геометрии маслоподводящего кармана.
- Подтверждено конструкторское решение по увеличению горизонтальных зазоров вкладыша.
- Подтверждено конструкторское решение по применению упорных колодок со слоем РЕЕК пластика.

Новизна работы заключается в том, что вышеописанная конструкция опорно-упорного подшипника не применялась ранее на территории Российской Федерации. Экспериментальные данные, полученные в результате испытаний, позволяют оценить преимущества внедрения данного типа подшипника в конструкцию перспективных газотурбинных установок, а также в рамках модернизации существующих.

Список использованных источников:

1. Технический отчет 751.065.23-0754 «НИОКР по подшипникам ГТЭ-65.1: Анализ и стендовые испытания существующей конструкции опорно-упорного подшипника», 2023 г.

Лазерный удар — инновационная технология повышения усталостной прочности деталей энергетических установок

Королев Д.Д., Кожевников Г.Д., Забенько Е.В.
МАИ, Москва

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, усталость, долговечность, дробь

Энергомашиностроение является одной из стратегически важных отраслей, обеспечивающих высокий уровень технологического развития России. Одним из факторов, значительно влияющих на ресурс и надежность энергетических установок (ЭУ), является усталостное разрушение их элементов. Причинами усталостного разрушения элементов паротурбинных, гидротурбинных и газотурбинных установок могут быть пульсирующие нагрузки, технологическое несовершенство деталей и эксплуатационные факторы: повышенная запыленность или влажность воздуха и связанное с этим эрозионное действие частиц, кавитация и др.

На отечественных предприятиях для повышения усталостной прочности деталей энергетического оборудования в основном используются дробеударные методы обработки, которые имеют ряд недостатков и ограничений. В работе рассматривается новый перспективный метод повышения предела выносливости и усталостной долговечности деталей ЭУ — лазерная ударная обработка (ЛУО) [1]; и показан эффект от его использования на свойства поверхностного слоя и усталостные характеристики таких материалов, как алюминиевые, титановые сплавы и стали.

Повышение усталостных характеристик при использовании ЛУО обеспечивается ударными волнами большой амплитуды, которые генерируются короткими лазерными импульсами высокой энергии, попадающими на поверхность упрочняемой детали через отражающий слой (воду) (рис. 1а). Эффект упрочнения достигается за счет локальной пластической деформации, производимой упругопластической волной в металле, а не термическим нагревом поверхности, как в случае лазерной закалки.

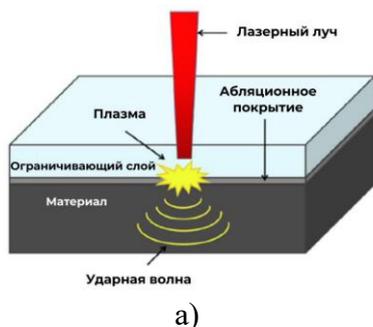


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид установки LS85 (б) для проведения процесса лазерной ударной обработки

Исследование влияние режимов лазерной ударной обработки проводилось на установке лазерного удара LS85 производства компании ООО «Прогрессивные производственные технологии» (рис. 1б). Исследование свойств поверхностного слоя (остаточные напряжения, микротвердость, шероховатость, волнистость) проводилось на прямоугольных образцах размером 80×20×4 мм, а оценка усталостных характеристик — на корсетных образцах (ГОСТ 25.502-79).

При обработке лазерным ударом металлов, в связи с импульсно-периодическим воздействием ударной волны, на поверхности образуется характерный рельеф (рис. 2а), несмотря на это шероховатость поверхности не изменяется, а увеличивается только волнистость, тогда как использованием дроби для упрочнения значительно ухудшает шероховатость с образованием глубоких дефектов из-за раскалывания частиц (рис. 2б).

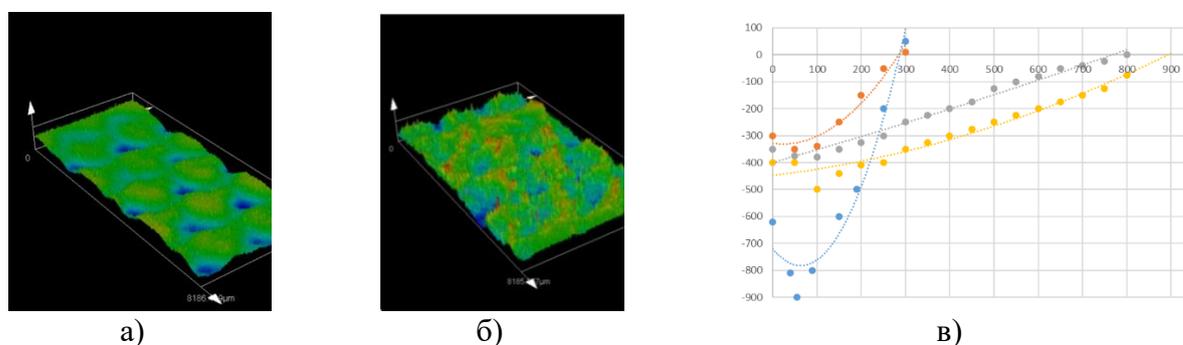


Рис. 2. Геометрия поверхности после обработки лазерным ударом (а) и дробеструйным методом (б), сравнение эпюр остаточных напряжений (в)

Основным преимуществом лазерной ударной обработки перед дробеударными методами является глубина залегания поверхностных остаточных сжимающих напряжений (рис. 3) [2], которая позволяет значительно увеличить долговечность и предел выносливости деталей. Так, обработка шейки корсетных образцов лазерным ударом позволила увеличить их усталостную долговечность для стали 30ХГСА в 4 раза, для алюминиевых сплавов Д16Т и АК4-1 в 2 раза, а титанового сплава ВТ6 в 2,7 раза.

Апробирование технологии лазерной ударной обработки для упрочнения кромок пера компрессорных лопаток из сплава ВТ8М для увеличения их стойкости к попаданию посторонних предметов в тракт газотурбинного двигателя показало увеличение предела выносливости на 57% по сравнению со штатным технологическим процессом при вибродинамических испытаниях с искусственной забоиной величиной 0,5 мм.

Таким образом, проведенные комплексные исследования позволили установить, что при лазерной ударной обработке шероховатость поверхности не изменяется по сравнению с первоначальным состоянием, но увеличивается волнистость; максимальная степень наклепа составляет не более 19%; наводятся устойчивые сжимающие остаточные напряжения на глубину от 300 мкм до 1000 мкм при изменении плотности мощности лазерного излучения с

2 до 7 ГВт/см²; лазерная ударная обработка позволяет получить прирост усталостной долговечности для стали 30ХГСА в 4 раза, для алюминиевых сплавов Д16Т и АК4-1 в 2 раза, а титанового сплава ВТ6 в 2,7 раза.

Полученные экспериментальные данные открывают широкие перспективы использования технологии лазерной ударной обработки для увеличения ресурса и надежности ответственных частей энергетического оборудования: лопаток, дисков, замков, валов, цапф, тяг, сварных швов и других ответственных элементов и соединений для изделий и агрегатов АО «Силовые машины» с целью снижения затрат на ремонт и обслуживание.

Список использованных источников:

1. Ляховецкий М.А., Волков М.В., Сарбучев И.С., Ширваньянц Г.Г. Сравнительное исследование остаточных напряжений на титановом сплаве ВТ6, обработанном методами лазерного ударного упрочнения и дробеструйной обработки // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM2020: сборник тезисов. — М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2020. С. 570–572.
2. Королев Д.Д. Разработка технологии лазерной ударной обработки для повышения усталостной прочности компрессорных лопаток из титановых сплавов авиационных двигателей: дис. канд. техн. наук: 2.5.15 / М., 2024. 132 с.

Исследование возможности повышения безопасности эксплуатации электрических устройств, систем и электрических машин

Крылов Д.М., Сержантова М.В.

ГУАП, Санкт-Петербург

Ключевые слова: этапы жизненного цикла

Общее понятие жизненного цикла (ЖЦ) для электрических устройств, систем и электрических машин — это совокупность взаимосвязанных этапов и процессов, которые проходят эти изделия от момента возникновения идеи до их полного вывода из эксплуатации и утилизации. Этот цикл охватывает все стадии существования объекта, начиная с зарождения концепции и заканчивая его моральным устареванием [1].

Основные этапы жизненного цикла электрических устройств, систем и электрических машин излагаются в 4-х этапах. Первый этап — проектирование (или конструкторская проработка): формирование требований, разработка концепции, детальное проектирование, проверка и анализ. Второй этап — изготовление (или производство): закупка материалов и комплектующих, производственный процесс, контроль качества, приемочные испытания.

Третий этап — ввод в эксплуатацию и эксплуатация (или наладка и функционирования): монтаж, пусконаладочные работы, обучение персонала, ввод в эксплуатацию, режим работы, техническое обслуживание, текущий ремонт, диагностика. Четвертый этап — вывод из эксплуатации (или утилизация): демонтаж, утилизация, замена.

Безусловно, каждый этап важен и интересен по-своему, но сфокусируем внимание на третьем этапе, а именно на взаимодействии человека с электрическими устройствами, системами и электрическими машинами, в котором рассмотрим технологический сборочный модуль с тремя роботами-манипуляторами (рисунок 1), работающими с человеком-оператором [2] в общей операционной зоне.

При рассмотрении данного вида взаимодействия важно учитывать безопасность человека-оператора. Существует четыре подхода к обеспечению совместной безопасной работы: контролируемый останов безопасности, ручное управление, мониторинг скорости и сближения с человеком, ограничение по мощности усилия и моменту силы. Первый подход — **контролируемый останов безопасности**, при котором робот или его манипулятор не двигаются в общем рабочем пространстве. Второй — **ручное управление**, где робот перемещается только под непосредственным управлением человека, в отличие от режима обучения, где робот работает без автоматического управления. Третий подход — **мониторинг скорости и сближения**, при котором робот и человек-оператор могут свободно передвигаться по траекториям в общем пространстве, но при критическом сближении робот автоматически останавливается. Четвертый подход — **ограничение мощности усилия и момента силы**, позволяющий обеспечить прямой контакт между человеком и роботом без риска травм или боли [3].

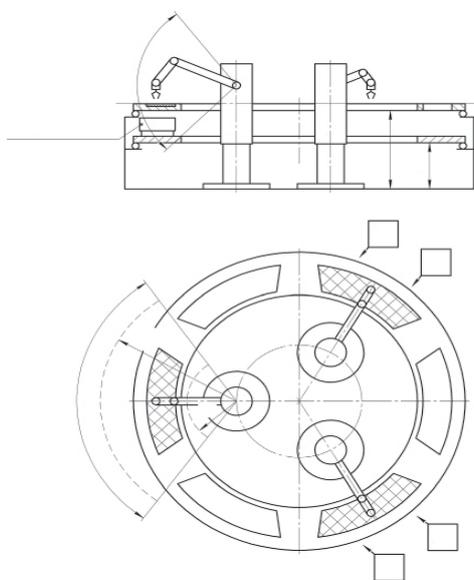


Рис. 1

Вводится гипотеза, что при внедрении голосового помощника повышается безопасность для человека при совместной работе с системой (рисунок 1), совершающей перемещения в совместном пространстве. Все настройки системы можно осуществлять непосредственно в рабочем пространстве (у стола), следить за состоянием оборудования, при необходимости изменять скорость работы системы и быстрее вносить корректировки в работе оборудования, например, как реакцию при чрезвычайных ситуациях и при ремонтных работах.

Таким образом, внедрение голосового помощника не только повысит безопасность человека-оператора, но и увеличит срок эксплуатации электрических устройств, систем и электрических машин, упростит управление, повысит гибкость системы.

Список использованных источников:

1. Е.И. Яблочников, В.И. Молочник, Ю.Н. Фомина, А.А. Саломатина, В.С. Гусельников. Методы управления жизненным циклом приборов и систем в расширенных предприятиях. Санкт-Петербург, 2009.
2. М.В. Сержантова, В.М. Медунецкий и С.М. Дьяченко. Роботизированный технологический сборочно-комплектующий модуль с возможностью введения команд от человека-оператора.// Сборник материалов 13-й Международной научной конференции «Современное машиностроение: наука и образование 2024» (Санкт-Петербург, 2024).
3. Таня М. Анандан. Роботы и люди: безопасное сотрудничество. [Control Engineering Россия, Декабрь 2017](#)

Внедрение интеллектуальных автоматов защиты электрических машин

Кузьменко Ю.П.

ГУАП, Санкт-Петербург

Ключевые слова: автоматы защиты, электрические двигатели, надежность, интеллектуальные алгоритмы, диагностика неисправностей, эксплуатационные характеристики, перегрузки, короткие замыкания, предиктивное обслуживание, автоматизация производственных процессов.

Цель работы заключается в разработке и оптимизации автоматов защиты для электрических двигателей, чтобы повысить их надежность и эффективность эксплуатации в промышленных условиях.

Гипотеза исследования предполагает, что использование современных автоматов защиты, оснащенных интеллектуальными алгоритмами обнаружения неисправностей, значительно снижает вероятность отказов электрических двигателей и увеличивает срок их службы.

Объектом исследования являются электрические двигатели, применяемые в производственных системах компании, а также современные автоматы защиты.

Задачи исследования включают:

1. Анализ существующих типов автоматов защиты электрических двигателей.
2. Разработку критериев выбора оптимальных защитных устройств для различных типов двигателей.
3. Исследование влияния автоматов защиты на эксплуатационные характеристики двигателей.
4. Проведение экспериментальных испытаний разработанных автоматов в реальных условиях эксплуатации.

Методы исследования основаны на теоретическом анализе литературы, моделировании электрических схем, экспериментальных испытаниях, а также статистическом анализе полученных данных.

Результаты исследования показали, что разработанные автоматы защиты обладают высокой чувствительностью к перегрузкам и коротким замыканиям, обеспечивая своевременную реакцию и предотвращение повреждений двигателей. Внедрение предложенных решений позволило уменьшить количество аварийных остановок и увеличить общий срок службы оборудования.

Основные выводы работы подтверждают эффективность использования интеллектуальных автоматов защиты для электрических двигателей. Применение таких устройств способствует повышению надежности производственных процессов и снижению эксплуатационных затрат.

Новизна и оригинальность исследования заключаются в разработке интегрированного подхода к выбору и настройке автоматов защиты с учетом специфических условий эксплуатации электрических двигателей компании, а также внедрении новых алгоритмов диагностики неисправностей.

Ценность работы для компании состоит в повышении надежности производственного оборудования, снижении затрат на ремонт и замену двигателей, а также в улучшении общей эффективности производственных процессов.

Перспективы использования результатов включают масштабирование предложенных решений на другие виды оборудования компании, интеграцию автоматов защиты в существующие системы автоматизации и дальнейшее развитие интеллектуальных алгоритмов для улучшения диагностики и предиктивного обслуживания.

Список использованных источников:

1. Дацков И.И. Электробезопасность в АПК: учебное пособие / И.И. Дацков. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 132 с.
2. Волобуев С.В. Нагрев асинхронных двигателей и их защита тепловыми реле: учебное пособие / С.В. Волобуев. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2015. 48 с.
3. Вольдек А.И. (1978) Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений.
4. ГОСТ 27888-88 (МЭК 34-11) Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита.

Экспериментальное определение усилия затяжки в болтовых соединениях

Логвинова А.А.¹, Самохвалов А.Э.²

Научный руководитель: Кривченков Ю.М.¹

1 — АО «Силовые машины», 2 — БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

Санкт-Петербург

Ключевые слова: резьбовые соединения, коэффициент трения, усилие затяжки, момент затяжки

Key words: threaded connections, friction factor, tightening force, tightening torque

В современных машинах большинство резьбовых соединений собирают с предварительной затяжкой. Правильная затяжка соединения является одним из ключевых факторов для обеспечения надежности его работы, особенно в условиях циклических и динамических нагрузок. Усилие предварительной затяжки устанавливают в соответствии с требованиями герметичности и плотности стыка. Последнее является необходимым условием прочности резьбового соединения при переменных нагрузках. После того как требуемое расчетное значение усилия затяжки, отвечающее требованиям герметичности, прочности и надежности работы соединения, определено, необходимо указать на чертеже момент затяжки.

Момент, приложенный к гайке или головке болта, уравнивается силами трения в резьбе и на торце гайки или головки болта и, при неизменных коэффициентах трения, сила затяжки пропорциональна моменту на ключе. Но в действительности значения коэффициентов трения нестабильны, так как зависят от состояния поверхностей и типов материалов гайки, болта и шайбы, и ряда других факторов, например, наличие покрытия и смазки. Исходя из этого связь между моментом и усилием затяжки не всегда остается постоянным даже внутри одной партии.

В конструкциях турбогенераторов в условиях сильных магнитных полей и под воздействием больших нагрузок резьбовые соединения из традиционных материалов могут не обеспечивать нужные характеристики прочности и надежности. Для таких случаев используются изделия из нестандартных материалов, для которых отсутствуют данные по коэффициентам трения в резьбе и на торце гайки, необходимые для определения момента затяжки. Поэтому важно для таких материалов определять референсные значения отношения усилия и момента затяжки резьбовых соединений (особенно в случаях изготовления болта и гайки из разнородных материалов) на резьбовом динамометре для каждой партии болтов [1, с. 332; 2, с. 20].

В данной работе представлены результаты экспериментального определения зависимостей момента затяжки от усилия затяжки для соединений из углеродистых сталей, нержавеющей стали 12X18H10T и титановых сплавов. Момент затяжки задавался динамометрическим ключом. Измерение усилия затяжки производилось на специализированном устройстве, описание которого представлено в работе. Рассмотрено влияние обезжиривания трущихся поверхностей на величину усилия затяжки. Выполнена статистическая обработка результатов измерений. Получено совпадение со значениями момента затяга, используемых на заводе «Электросила», для соединений из углеродистой стали при условии обезжиривания трущихся поверхностей.

Цель работы — определение требуемого момента затяжки резьбового соединения из титановых сплавов, из нержавеющей стали и экспериментальное определение и подтверждение справочных данных для углеродистых сталей.

Гипотеза

Требуемое усилие предварительной затяжки резьбового соединения обычно определяется из расчета прочности и/или герметичности узла соединения, и подбираются материалы болта, гайки, шайбы, отвечающие этим требованиям. При этом момент затяжки остается неопределенным, так как зависит от коэффициентов трения в резьбе и на торце гайки. Коэффициент трения зависит от состояния резьбы, наличия покрытий, смазочных материалов и других факторов. Поэтому соотношение между моментом затяжки и усилием затяжки должно определяться для выбранного типа соединения, и особенно для гаек и болтов, изготовленных из различных материалов.

Объектами исследования являются резьбовые соединения из титановых сплавов ВТЗ-1 и ПТЗ-В, углеродистой стали и нержавеющей стали 12X18H10T.

Задачи работы

1. Исследовать и проанализировать научно-технические источники, относящиеся к затяжке резьбовых соединений.
2. Определить пробелы в текущих знаниях и направление исследования.
3. Экспериментально исследовать усилие затяжки рассматриваемых болтовых соединений и, на основании полученных данных, определить соотношение между моментом и усилием затяжки.
4. Сравнить полученные данные с теоретическими расчетами по справочным данным коэффициентов трения и подготовить отчет с выводами.
5. По результатам исследования выдавать рекомендации по сборке и затяжке резьбовых соединений из представленных в работе материалов на основании определенного момента затяжки.

Исследования, направленные на определение усилия затяжки болтовых соединений, выполнялись экспериментальным методом.

Основные выводы по проделанной работе

В научно-технических источниках значения коэффициентов трения имеют большой разброс, либо данные вовсе отсутствуют. По результатам проведенных экспериментов были выявлены основные закономерности распределения значения коэффициентов трения в зависимости от рассматриваемых материалов.

Новизна работы

Получены данные по затяжке резьбовых соединений из материалов, которые отсутствуют в научно-технических источниках. Определено влияние обезжиривания на усилие затяжки.

Ценность работы для компании

1. Получены конкретные данные по моменту затяжки для болтов и шайб, изготовленных из материала ВТЗ-1, гаек из материала ПТЗ-В и для болтов, шайб и гаек из материала 12Х18Н10Т, которые применяются на заводе «Электросила», с учетом заводских технологий изготовления.
2. На основе проведенного исследования были предложены и внедрены рекомендации при сборке лобовых частей статора ТВВ-1000-2.

Перспектива использования результатов работы

1. Разработка чертежей и изготовление устройства для определения усилия затяжки болтовых соединений на заводе ЭЛС.

2. Исследование усилия затяжки в резьбовых соединениях из стеклопластика или стеклотекстолита, определение влияния смазочных материалов на усилия затяжку.

3. Увеличение базы данных по моментам и усилиям затяжки соединений, изготовленных из различных материалов, применяемых в производстве.

Список использованных источников:

1. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. — М.: Машиностроение, 1990. — 368 с.

2. Иосилевич Г.Б., Строганов Б.Г., Шарловский Ю.В. Затяжка и стопорение резьбовых соединений. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.

3. Беляев А.Н., Брытков Е.В., Расчупкина Т.В. Трение в узлах машин: лабораторный практикум. — Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2023. — 28 с.

4. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Машиностроение, 1966. — 612 с.

5. ГОСТ 32484.3-2013 Болтокомплекты высокопрочные для предварительного натяжения конструкционные. Система HR — комплекты шестигранных болтов и гаек.

Оценка собственных частот компоновки ГТЭ-65.1 на раме для стендовых испытаний Ляшенко В.К.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: собственные частоты, отстройка, формы колебаний

Key words: Natural frequencies, detuning, modal forms

Испытания газотурбинной установки ГТЭ-65.1 производятся на уникальном стенде. Компоновка ГТУ на стенде отличается от установки на объекте заказчика. В связи с вышесказанным под отдельно взятую ГТУ вновь проектируется рама. Данная рама может иметь собственные частоты, близкие к рабочей частоте вращения ротора ГТУ, а также повлиять на собственные частоты ГТУ, что осложнит или сделает невозможным корректное проведение замеров вибраций.

Данная работа выполнена с целью оценки собственных частот компоновки ГТЭ 65.1 опорами, рамой для испытаний, трубопроводами, статорной и роторной частями.

Рама для испытаний ГТЭ-65.1 не должна оказывать влияние на собственные частоты ГТУ на номинальном режиме. Для обеспечения данного требования собственные частоты, формы колебаний которых задействуют раму, должны быть отстроены от рабочей частоты вращения ротора ГТУ (90.7 Гц) более чем на 10%.

Рама представляет собой набор отдельных сварных элементов, связанных между собой резьбовыми соединениями (рисунок 1). ГТЭ-65.1 так же крепится к раме с помощью резьбовых соединений.

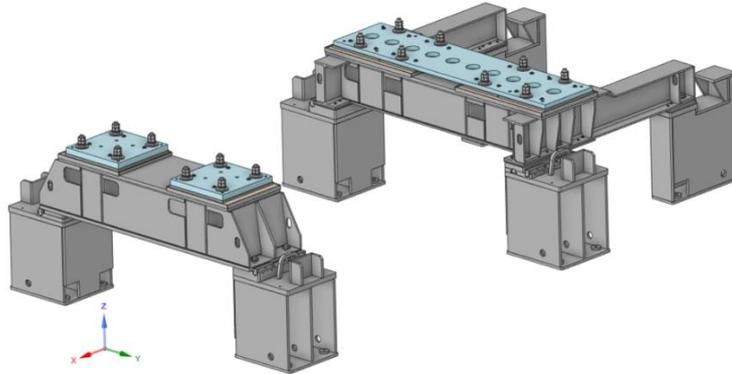


Рис. 1. Рама для испытаний ГТЭ-65.1 на стенде

Анализ собственных частот компоновки выполнен методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS 2022 R2. Задача решалась в трехмерной мерной постановке. Тепловое состояние и преднапряжение при расчете не учитывались.

Для геометрии ротора использовался двухмерный осесимметричный элемент SOLID272, позволяющий учитывать неосесимметричные нагрузки и перемещения.

Для моделирования рамы и статорной части ГТУ были использованы трехмерные элементы второго порядка. Часть элементов статорной части (обоймы, диффузор компрессора, трубопроводы) заменены на эквивалентные точечные массы.

Элементы, не влияющие на жесткость корпуса, исключены из расчетной модели. Недостающая масса задана по наружным поверхностям корпусов ГТУ.

Сетка конечных элементов компоновки ГТЭ-65.1 на раме содержит 12265971 узлов и 4394517 элементов.

Расчетная геометрия и сетка конечных элементов представлены на рисунке 2.

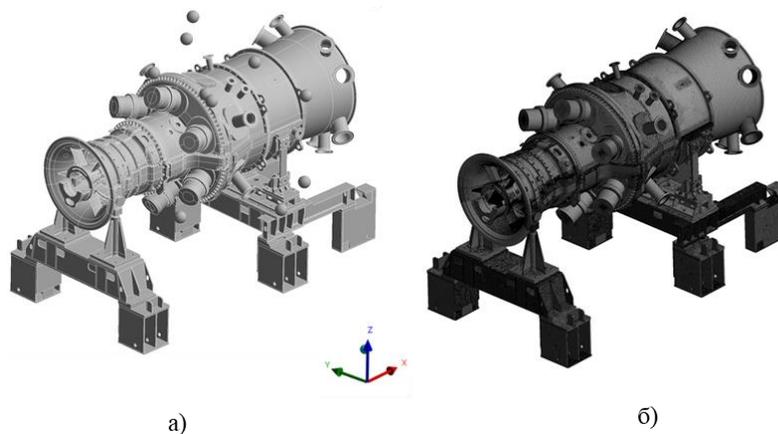


Рис. 2. Расчетная геометрия (а) и сетка конечных элементов (б) компоновки ГТЭ-65.1 на раме для испытаний

По результатам модального анализа было получено 79 собственных частот в диапазоне от 0 до 140 Гц. Среди выявленных частот большинство имеет формы колебаний, связанных преимущественно с выходным диффузором турбины. Данные частоты имеют малую степень массового участия и не рассматриваются при анализе динамического поведения конструкции.

Таблица 1 представляет список, степень массового участия и описание собственных частот конструкции.

Таблица 1. Рассмотренные собственные частоты

№ формы колебаний	Частота, Гц	Отстройка от рабочей частоты вращения, %
1	12.6	86.1
2	14.9	83.6
3	30.9	65.9
4	66.5	26.7
5	74.3	18.1
6	80.52	11.2
7	86.53	4.6
8	91.7	1.1
9	99.3	9.5
10	102.0	12.5
11	119.5	31.8

Из рассмотренных частот три находятся в диапазоне отстройки 10% от рабочей частоты вращения (от 81.6 до 99.8 Гц) – 86.5 Гц, 91.7 и 99.3 Гц. Нарушение критерия по частоте 99.3 Гц (отстройка 9.5 %) незначительно и составляет 0.5%.

Формы колебаний частот 86.5 Гц и 91.7 Гц связаны преимущественно с изгибом корпуса и мало задействуют раму для испытаний. Их степени массового участия малы и составляют 3.14% по оси Z и 0.14% по оси Y соответственно. Рама для испытаний незначительно влияет на данные собственные частоты, их формы колебаний и не будет являться причиной повышенных вибраций.

Формы колебаний частоты 99.3 Гц (отстройка от рабочей частоты 9.5%) и близкой к диапазону отстройки 10% частоты 80.5 Гц (отстройка от рабочей частоты 11.2%) имеют формы колебаний, связанные с изолированными крутильными колебаниями передней и задней частей рамы. Степени массового участия данных частот по оси Y — 0.09 % и 0.21 %

соответственно. Вышеописанные частоты могут оказать влияние на собственные частоты компоновки в окрестности рабочей частоты, что рекомендуется учитывать при проведении испытаний.

В данной работе впервые была проведена оценка собственных частот компоновки ротора и статора ГТЭ-65.1.

Результаты этой работы позволяют удостовериться в допустимости использования текущей проектной геометрии рамы, а также оперативно провести оценку в случае ее модификации в будущем.

Разработка системы контроля качества технологического оборудования

Ляховский А.С., Порохненко К.А.
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

Ключевые слова — алгоритмы распознавания, технологическое оборудование, контроль качества.

В связи с тем, что на любом современном производстве широко используется электрооборудование предлагается автоматизировать процесс учета с помощью алгоритмов распознавания.

Каждое оборудование имеет идентификационный номер, который необходимо учитывать при проведении инвентаризации или других контрольных и технических надзорных работ. Поэтому задача распознавания номерных и буквенных знаков является актуальной в настоящее время, особенно при распознавании, например, шильдика двигателя.

В работе исследовались алгоритмы на основе однонаправленной нейронной сети и сверточной нейронной сети. По итогам проведения экспериментов было проведено сравнение алгоритмов.

Первый алгоритм был реализован на Python с использованием библиотек NumPy.

Лучший подход — экспериментировать до тех пор, пока не будет получена конфигурация сети, оптимальная для решаемой задачи.

В связи с этим были проведены эксперименты по определению эффективности (процента правильных ответов сети) в зависимости от таких исходных данных, как количество эпох, коэффициент обучения и количество скрытых узлов.

В результате исследования был проведен сравнительный анализ двух алгоритмов.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов

	Однонаправленная нейронная сеть	Сверточная нейронная сеть
Преимущества	Простота реализации алгоритма	Учет топологии исходных данных (изображений)

	Однонаправленная нейронная сеть	Сверточная нейронная сеть
Недостатки	Необходимо больше времени для обучения	Сложная реализация алгоритма

Было установлено, что второй алгоритм лучше справляется с поставленной задачей и обладает ключевыми преимуществами по сравнению с первым.

Список использованных источников:

1. Николенко С., Кадурын А., Архангельская Е. Глубокое обучение. — СПб.: Питер, 2018. — 480 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»).
2. Галушкин, А. И. Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. — Москва: Горячая линия-Телеком, 2017. — 496 с.

Методика для оценки ресурса корпусной изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением Маннанов Э.Р., Балыков О.С., Баранов В.С.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: оценка ресурса, корпусная изоляция, статорные обмотки турбогенераторов

Key words: resource assessment, main insulation, stator windings of turbogenerators

Актуальность

В мире не существует стандартизированных методик для расчета ресурса корпусной изоляции статорных обмоток турбогенераторов, так как системы изоляции каждого производителя оборудования индивидуальны. Однако, существуют нормативно-технические документы по испытаниям электрической изоляции, а также опыт разработки новых и модернизации существующих электроизоляционных материалов АО «Силовые машины», который может быть адаптирован к применяемой конструкции системы изоляции и объединен в единую Программу испытаний с целью получения расчетно-экспериментальных данных ресурса корпусной изоляции.

Цель работы — разработка методики для оценки ресурса корпусной изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением на основе решения расчетно-экспериментальных задач.

Гипотеза

Одним из основных требований рынка к турбогенераторам является обеспечение срока службы не менее 40 лет. Электрическая изоляция является ключевым элементом для обеспечения необходимого срока службы оборудования. Известно, что электроизоляционные материалы и изделия под влиянием эксплуатационных воздействий могут существенно

изменять свойства, что приводит к процессам деструкции материалов, создавая потенциальные возможности отказов оборудования. Актуальной задачей является расчет ресурса электрической изоляции, который может быть выполнен только на основе данных об изменении свойств материалов, полученных в ходе выполнения экспериментальных исследований реальной конструкции при длительном воздействии эксплуатационных факторов.

Объектом исследования является корпусная изоляция статорных обмоток высоковольтных турбогенераторов с воздушным охлаждением, изготавливаемая по технологии гидростатической прессовки (Resin Rich). Для изготовления корпусной изоляции используются электроизоляционные ленты слюдяные пропитанные марки Элмикатерм 52409, перспективная высокотеплопроводная лента Элмикатерм 52409ТН, разработанной в конце 2024 года в рамках объема работ по проекту НИОКР.

Задачи работы

Для достижения поставленной цели требуется:

1. Выполнить технический анализ научно-технических источников для определения ключевых факторов, влияющих на изменение свойств (старение) электрической изоляции высоковольтных электрических машин.
2. Разработать Программу испытаний на основе связанных между собой методик проведения ускоренных исследований изменения свойств элементов конструкции при воздействии основных факторов, имитирующих длительные эксплуатационные воздействия на основе международных стандартов и имеющегося опыта АО «Силовые машины».
3. Подготовить оборудование, разработать конструкцию и изготовить объекты испытаний.
4. Разработать расчетно-экспериментальную методику оценки ресурса корпусной изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением.
5. Выполнить экспериментальное исследование и расчет ресурса корпусной изоляции на основе применяемых и перспективных к использованию электроизоляционных материалов.

Исследования выполнялись на основе **расчетно-экспериментальных методов**.

Результаты работы

1. На основе выполненного анализа научно-технических источников выявлены основные факторы, оказывающие наиболее существенное воздействие на состояние электрической изоляции в процессе длительных эксплуатационных воздействий.
2. На основе методик проведения ускоренных исследований изменения свойств элементов конструкции при воздействии основных факторов, имитирующих длительные

эксплуатационные воздействия, международных стандартов и опыта АО «Силловые машины» разработана Программа испытаний.

3. Подготовлено оборудование и объекты испытаний:

- макеты, имитирующие реальную конструкцию стержня статорной обмотки, изготовленные по штатной заводской технологии, аналогичной технологии, применяемой при изготовлении стержней статорной обмотки турбогенераторов;
- стержни с изоляцией статорной обмотки на опытных партиях лент и стандартно применяемых и разрабатываемой высокотеплопроводной лентах.

Для испытаний были выбраны материалы, как используемые на производстве в данный момент, так и перспективные с точки зрения их потенциального внедрения в конструкцию системы изоляции.

4. Разработана оригинальная расчетно-экспериментальная методика оценки ресурса корпусной изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением, базирующаяся на использовании методик международных стандартов, адаптированных и связанных между собой для возможности применения реальной конструкции изоляции турбогенераторов АО «Силловые машины».

5. Выполнено экспериментальное исследование и расчетным путем определен ресурс корпусной изоляции на основе применяемых и перспективных к использованию электроизоляционных материалов.

6. На основе выполненных работ определены направления дальнейших исследований, которые целесообразно выполнить для создания полномасштабной модели расчета ресурса с целью получения более точных данных.

Основные выводы по проделанной работе

1. В ходе технического анализа выявлено, что основным фактором, влияющим на состояние корпусной изоляции, является длительное воздействие электрического поля и термомеханических напряжений. Исследование изменения характеристик и расчет ресурса базируется на методиках представленных международных стандартах, адаптированных под использование для реальной конструкции изоляции, с учетом оптимизации временных и стоимостных затрат на проведение исследований.

2. По результатам экспериментальных работ и сравнения с эталонным графиком «кривой жизни» для $E_{доп} = 2,8$ кВ/мм согласно стандарту КЕМА S13 показано, что корпусная изоляция характеризуется высокой электрической стойкостью.

3. Гипотетическая экстраполяция медианной линии графика эмпирической зависимости $\log \tau = F(\log E)$ для корпусной изоляции макетов в область рабочей напряженности E раб

2,8 кВ/мм с последующей оценкой значения ресурса («времени жизни») корпусной изоляции обмотки дала значения только для электрического старения не менее 84 лет при напряженности электрического поля в изоляции 2,8 кВ/мм.

4. Для разработки полномасштабной методики расчета ресурса системы изоляции с высокой достоверностью представляется целесообразным выполнить исследования по направлениям:

- экспериментальное исследование процессов, происходящих в системе коронозащиты в зоне выхода из паза и стыка с лобовым покрытием;

- определение скорости повреждения покрытий и корпусной изоляции в условиях повреждения покрытий в этой зоне;

- процессы, происходящие в системе коронозащитных покрытий при выходе из диапазона сопротивлений только эмалевого покрытия, а также скорость разрушения двухслойного покрытия при выходе из диапазона сопротивлений всех составляющих не изучены;

- процессы и оценка времени работоспособности корпусной изоляции в случае повреждения коронозащитного покрытия как в пазовой, так и в лобовой части не изучены;

- исследование снижения ресурса корпусной изоляции статорной обмотки при механических воздействиях;

- скорость разрушения корпусной изоляции в случае повреждения двухслойного коронозащитного покрытия как в пазовой, так и в лобовой должна быть исследована.

Принимая во внимание вышеперечисленные направления работ, целесообразно реализовать методику в виде Программы для ЭВМ для возможности использования в практических целях расчета ресурса системы изоляции турбогенераторов с воздушным охлаждением и других электротехнических изделий.

Новизна и оригинальность работы

1. В результате выполнения работ впервые определены электрофизические характеристики новой высокотеплопроводной ленты, разработанной в рамках НИОКР.

2. Впервые разработана и внедрена в АО «Силовые машины» расчетно-экспериментальная методика оценки ресурса корпусной изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением.

Ценность работы для компании заключается в:

1. Практической применимости результатов исследований в качестве первичной оценки времени жизни корпусной изоляции для всех турбогенераторов с воздушным охлаждением.

2. Возможности подтверждения срока службы изоляции.

Перспектива использования результатов работы в компании

Результаты работы могут:

1. Использоваться при необходимости «быстрой» оценки времени жизни корпусной изоляции для всех турбогенераторов с воздушным охлаждением.
2. Послужить в качестве «исходных данных» при разработке уточненной прикладной методики оценки ресурса изоляции, основанной на экспериментальных исследованиях компонентов системы изоляции.
3. Использоваться для обоснования срока службы системы изоляции.

Разработка конструкции сварной втулки подпятника подвешного гидрогенератора Чарвакской ГЭС

Марков М.А., Шестаков А.О.
АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: гидрогенератор, втулка подпятника, литая заготовка, стальной прокат, сварной шов, номинальный режим работы, режим покоя, напряжения, сопротивление усталости.

Key words: hydrogenerator, thrust bearing bushing, cast billet, rolled steel, welded seam, nominal operation mode, resting mode, stresses, fatigue resistance.

Работа посвящена разработке инновационной конструкции сварной втулки подпятника в рамках мероприятий по снижению себестоимости оборудования для модернизации гидрогенераторов Чарвакской ГЭС. В настоящий момент для изготовления втулок подпятника гидрогенераторов подвешного типа закупаются дорогостоящие литые заготовки. Кроме высокой стоимости данное решение также обладает рядом недостатков: большие сроки поставки, а также отсутствие входного неразрушающего контроля качества литья. В соответствии с вышесказанным было принято решение о проектировании и изготовлении сварной конструкции втулки подпятника из стального проката с ультразвуковым контролем материала и высоконагруженных сварных швов для реализации в проекте модернизации гидрогенераторов Чарвакской ГЭС. В ходе выполнения поставленной задачи был принят ряд конструктивных решений, а также выполнены механические расчеты с использованием метода конечных элементов для подтверждения работоспособности разрабатываемой конструкции.

Цель работы — создание новой инновационной конструкции втулки подпятника для подвешного гидрогенератора с улучшенными характеристиками, а также методики конструирования, расчета и оптимизации. Необходимо также, чтобы разработанная

конструкция соответствовала современным требованиям, предъявляемым к оборудованию данного типа, имела себестоимость ниже, чем у существующей конструкции, а также позволяла заводу-изготовителю в полном объеме осуществлять контроль сроков изготовления.

Гипотеза работы. В настоящее время заводы-изготовители гидрогенераторов для изготовления втулок подпятников подвесных гидрогенераторов осуществляют закупку литых стальных заготовок. Основными недостатками литых заготовок являются высокая стоимость литой заготовки (до 9 млн руб.), большие сроки поставки и отсутствие входного неразрушающего контроля качества литья. В настоящей работе рассматривается замена литой конструкции втулки подпятника на сварную из стального проката с УЗК контролем материала и высоконагруженных сварных швов с выполнением механических расчетов с использованием метода конечных элементов для подтверждения работоспособности разрабатываемой конструкции.

Механический расчет сварной втулки подпятника

Оценка работоспособности сварной конструкции втулки подпятника выполняется с использованием программы ЭВМ [2] и расчетной методики, разработанных в СКБ по проектированию гидрогенераторов. Данные программа и методика основаны на процедуре расчета, описанной в зарубежном документе FKM Guideline, в котором рассмотрены оценки статической прочности и сопротивления усталости с использованием как номинальных, так и местных напряжений [1].

Оценка начинается с проведения статических расчетов с использованием метода конечных элементов. Рассматриваются следующие режимы работы:

1. Состояние покоя.
2. Номинальный режим работы.
3. Номинальный режим работы с учетом повышения вертикальной нагрузки из-за пульсации осевого гидравлического усилия.

Проводится подготовка 3D модели к расчету с проведением моделирования геометрии рассчитываемых угловых сварных швов. Швы приварки элементов конструкции, которые привариваются друг к другу с разделкой кромок, не моделировались, так как они являются частью основного металла расчетной модели. Важным этапом подготовки является введение мнимых радиусов скругления в геометрии данных сварных швов для определения возникающих в них местных напряжений.

На рис. 1 изображена расчетная модель, представляющая собой половину рассматриваемого узла. При номинальном режиме работы на втулку подпятника действуют

следующие нагрузки: центробежные силы, усилия от посадки втулки на вал, вертикальное усилие, вызванное массой вращающихся частей генератора и турбины, а также осевое гидравлическое усилие. В режиме покоя из усилий, действующих на втулку подпятника, исключались центробежные силы и осевое гидравлическое усилие. Также для проведения оценки работоспособности сварной втулки рассматривался номинальный режим работы агрегата с увеличенным на 2% значением осевого гидравлического усилия (пульсацией осевого гидравлического усилия).

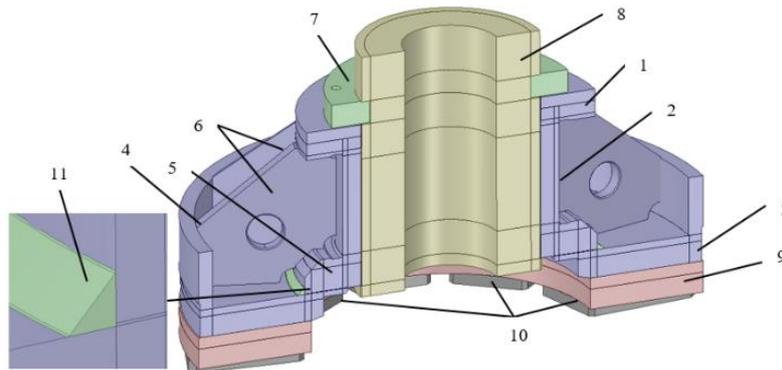


Рис. 1. Расчетная модель (1 — верхний диск центральной части втулки, 2 — цилиндр центральной части втулки, 3 — нижний диск втулки, 4 — цилиндр втулки, 5 — кольцо центральной части втулки, 6 — ребра жесткости втулки, 7 — запорное кольцо, 8 — вал, 9 — диск подпятника, 10 — сегменты подпятника, 11 — геометрия углового сварного шва с мнимыми радиусами скругления)

Для оценки работоспособности сварной втулки подпятника рассматривались следующие расчетные сечения и точки:

1. Радиальное сечение втулки в зоне ребра жесткости.
2. Радиальное сечение втулки в зоне между ребер жесткости.
3. Сечение, проходящее по сварному шву приварки верхнего диска к цилиндру центральной части втулки.
4. Сечение, проходящее по сварному шву приварки кольца к цилиндру центральной части втулки.
5. Самая напряженная точка на поверхности углового шва приварки кольца центральной части к нижнему диску втулки.

Далее по результатам статического расчета проводится оценка сопротивления усталости сварных швов, рассмотренных выше. На рис. 2 изображена схема оценки сопротивления усталости сварного соединения [1]. Для проведения расчета задаются срок службы работы гидроагрегата, а также требуемое количество его пусков-остановов в год или количество циклов изменения усилия, действующего на рассматриваемый узел [3]. Данные величины обозначаются как требуемое количество циклов работы. Результаты статического

расчета сварной втулки подпятника и оценки сопротивления усталости рассчитываемых сварных швов будут представлены на конференции и в презентации к докладу.

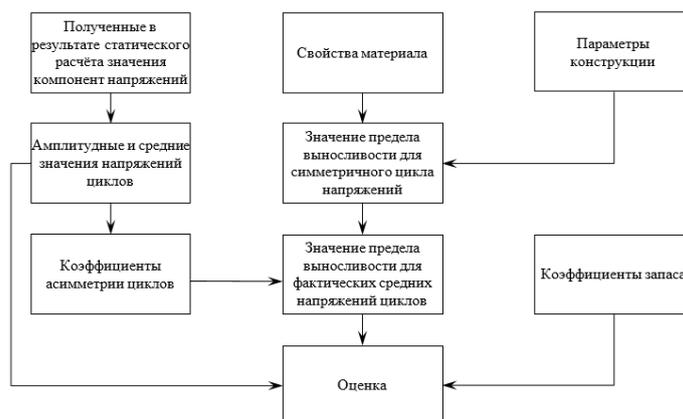


Рис. 2. Схема оценки сопротивления усталости сварного соединения

Список использованных источников:

1. R. Rennert, E. Kulling, M. Vormvald etc. FKM Guideline. Analytical strength assessment of components made of steel, cast iron and aluminum materials in mechanical engineering. 6th revised ed. Frankfurt am Main, VDMA Verlag GmbH, 2013, 232 p.
2. Расчет характеристик сопротивления усталости сварных конструкций высоконагруженных узлов гидрогенератора [Электронный ресурс] URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44244011&ysclid=lx34tki2hf217755672>
3. ГОСТ 5616-89. Генераторы и генераторы-двигатели электрические гидротурбинные. Общие технические условия. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. — 18 с.

Упрочнение поверхностей нагрева для увеличения срока службы при сжигании высокоабразивного топлива

Кунец А.В.

ПАО ТКЗ «Красный котельщик», Таганрог

Ключевые слова: абразивный износ, зала, продление срока службы, золовой износ, абразивные свойства золы, поверхности нагрева котлоагрегатов

Keywords: abrasive wear, hall, prolongation of service life, ash wear, abrasive properties of ash, heating surfaces of boilers

Сибирь в данное время ориентируется на использование дешевых и легкодоступных низкосортных местных топлив для нужд теплоэнергетики. Из-за этого оценка возможности и последствий перехода на иной вид топлива или марки угля для тепловых электрических станций является актуальной задачей, т. к. переход на не проектный вид топлива может иметь

значительный экономический эффект, заключающийся в снижении стоимости топлива, уменьшении цены его транспортировки, трудозатраты на подготовку к сжиганию.

Одним из серьезных последствий от сжигания низкосортного топлива является быстрый физический износ оборудования. С учетом длительного срока его эксплуатации из-за использования непроектного угля быстрее происходит разрушение поверхностей нагрева, что приводит к значительным изменениям условий функционирования всей технологической системы станций и требует более частого ремонта и замены. Что зачастую влечет за собой большие экономические потери из-за увеличения времени простоя котла в ремонте, вследствие шлакования и износа поверхностей нагрева чаще всего ремонт предполагает замену части трубного пучка.

Воздухоподогреватели, экономайзеры более подвержены разрушению, в том числе из-за абразивного воздействия летучей золы и несгоревших частиц продуктов сгорания топлива, ускоряя выход из строя оборудования. Это приводит к вынужденным ремонтам конвективных поверхностей нагрева. Часто период эксплуатации составляет 2–3 года в связи с тем, что происходит интенсивное утонение стенок труб, которое перестает соответствовать их нормативной толщине.

Для устранения данной проблемы обычно применяют накладки без последующей закалки, так как экономически это более дорого в связи с тем, что ранее данная технология была дорогой и могла быть применена на небольших по размерам элементах конструкции. Применение таких накладок позволяет увеличить срок службы поверхностей до 4–6 лет.

В связи с развитием технологий методика борирования существенно удешевилась и появились технологии, способные обработать большой объем одномоментно, что также существенно удешевляет производство элементов.

Борирование стали проводят для повышения твердости поверхностного слоя металла (до 1800–2000 HV), соответственно повышается износостойкость, а также стойкость к окалинообразованию (до 800 °С) и теплостойкость. Процесс борирования заключается в диффузионном насыщении поверхностных слоев стали борсодержащими агентами при нагревании в определенной среде.

Насыщение проводят при температурах 800–900 °С, время выдержки составляет от 1 до 3 дней. Огромное влияние на результаты борирования оказывают избыточное давление газов и их концентрация в насыщающей среде. При газовом борировании на углеродистых сталях формируется боридный слой толщиной 1–2 мм и твердостью 1800–2000 HV. Для слоя в 1 мм необходима выдержка в 1–2 дня в зависимости от марки материала, подверженного данной обработке. Тогда как твердость необработанного металла — 800–1000HV.

При реализации предложенной технологии планируется усиливать поверхности нагрева путем установки защитных элементов с последующим упрочнением поверхностного слоя накладок и труб с помощью борирования, что позволит увеличить срок службы поверхностей нагрева или другого оборудования станции, что влечет за собой существенные снижения затрат на обслуживание поверхностей нагрева и пуско-наладочные работы.

Оценочная стоимость одного квадратного метра материала, подверженного обработке методом борирования, — 350 рублей. Борированию в среднем необходимо будет подвергать 200–800 м² поверхности заменяемого компонента. Итоговая сумма составит 70–280 тыс. рублей.

Стоимость оборудования, которое поставляет российская компания, составляет примерно 10–20 млн рублей, что является оценочной ценой, которая может измениться в зависимости от комплектации и размеров сосудов, в которых происходит насыщение поверхностного слоя.

Подводя итог вышесказанному, можно судить, что применение метода целесообразно на станциях при использовании абразивного топлива.

Цель — увеличение срока службы оборудования станции

Гипотеза — применение метода борирования позволит увеличить срок службы оборудования котельной станции.

Объект — методика борирования металлов.

Задача — предоставить актуальные данные по методу борирования, сравнить характеристики получаемых этим методом материалов.

Метод исследования. Литературный обзор.

Результат. Зарубежные партнеры в данное время внедряют исследуемую технологию в крупной промышленности, необходимы натурные испытания для подтверждения гипотезы.

Основной вывод. Метод является наиболее дешевым при наличии оборудования. На рынке присутствуют компании, готовые выполнить борирование металлов.

Новизна. Анализ рынков и возможности масштабирования производства по исследуемой технологии.

Ценность. Возможность обеспечить конкурентоспособности изделий завода при уменьшении издержек на закупку более дорогих сталей.

Перспективы. Возможное переоборудование существующих производств или создание нового производства с последующем выводом на рынок более дешевого и качественного продукта

Список использованных источников:

1. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. НПО ЦКТИ, Санкт-Петербург, 1998 г.
2. Н.П. Герасимова. Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов [Текст] / Н.П. Герасимова // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2020. — № 3. — С. 596–605.
3. Эрозионный износ поверхностей нагрева летучей золой // ozlib.com URL: https://ozlib.com/848873/tehnika/iznos_poverhnostey_nagreva_letuchey_zoloy (дата обращения: 05.09.2023).
4. Яблонская И.В., Щербаков В.Г. Сравнительная характеристика методов борирования конструкционных и инструментальных сталей / И.В. Яблонская, В.Г. Щербаков [Текст] // Сборник научных работ XVII Республиканской студенческой научно-технической конференции. — Минск: БНТУ, 2016. — С. 253.
5. Лабунец В.Ф. Износостойкие боридные покрытия: справочное пособие / В.Ф. Лабунец, Л.Г. Ворошнин, М.В. Киндрачук. — Киев.: Техника, 1989. — 158 с.
6. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов: справочное пособие / Л.Г. Ворошнин. — Минск: Беларусь, 1981. — 205 с.
7. Кунец А.В., Гладких А.А. Методы продления срока службы поверхностей нагрева паровых котлов при сжигании высокоабразивных топлив / А.В. Кунец, А.А. Гладких [Текст] // Сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции (08 февраля 2024 г., г. Москва). — Москва: Изд. АНО ДПО «ЦРОН», Изд. АЛЕФ, 2024. — С. 139.

Анализ генераторов, применяемых в ветроэнергетических установках**Михайлов Е.В., Мадея К.Р.**

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Данная статья рассматривает различные типы генераторов, применяемых в ветроэнергетике, и их соответствие требованиям современной ветроэнергетической техники. В аннотации рассматриваются преимущества и недостатки генераторов постоянного тока (ГПТ), асинхронных генераторов (АГ), синхронных генераторов (СГ) и асинхронизированных синхронных генераторов (АСГ), а также их особенности в контексте ветрогенераторов большой мощности.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроустановка, асинхронный генератор, синхронный генератор, асинхронизированный синхронный генератор, генератор постоянного тока, возобновляемая энергия, коэффициент мощности, эффективность.

Keywords: wind energy, wind turbine, asynchronous generator, synchronous generator, asynchronous synchronous generator, DC generator, renewable energy, power factor, efficiency.

Цель исследования

Целью исследования является определение преимуществ различных типов генераторов и обоснование выбора наиболее подходящего варианта для ветроэнергетических установок (ВЭУ) мощностью 5 МВт.

Гипотеза исследования

Предполагается, что использование асинхронизированного синхронного генератора (АСГ) мощностью 5 МВт позволит повысить качество вырабатываемой энергии, улучшить эффективность ее преобразования в условиях изменяющегося ветра и минимизировать эксплуатационные издержки по сравнению с традиционными генераторами.

Объект исследования

Объектом исследования является асинхронизированный синхронный генератор мощностью 5 МВт.

Задачи исследования

1. Провести сравнительный анализ существующих типов генераторов, применяемых в ветроэнергетике.
2. Оценить влияние эксплуатационных характеристик АСГ на производительность и надежность ветроустановки.
3. Изучить экономические аспекты применения АСГ в ветроэнергетике.

Методы исследования

Для достижения поставленных целей использовались методы: сравнительного анализа конструктивных особенностей и производительности генераторов, анализа экономических показателей.

Актуальность темы

Современные ветроэнергетические установки отличаются большим разнообразием конструктивных решений [1]. Это разнообразие конструкций обеспечивает возможность адаптации ВЭУ к различным климатическим и эксплуатационным условиям, что повышает их общую эффективность. Однако основным ограничением является нестабильность ветра — природного явления, характеризующегося изменениями направления и скорости потока.

Нестабильность ветрового потока приводит к изменению скорости вращения ротора генератора, что напрямую влияет на параметры генерируемой электроэнергии, включая амплитуду, частоту и фазу напряжения. Это вызывает необходимость использования дополнительных систем преобразования электроэнергии для обеспечения ее соответствия нормативным требованиям качества [2]. Проблема преобразования энергии с переменными параметрами в энергию стандартного качества становится ключевой задачей ветроэнергетики.

Анализ типов генераторов

Генераторы постоянного тока, асинхронные генераторы, синхронные генераторы и асинхронизированные синхронные генераторы были рассмотрены с точки зрения их конструктивных особенностей, производительности и экономической эффективности. АСГ, также известный как генератор двойного питания, представляет собой асинхронную машину с фазным ротором, подключенную к сети через преобразователь частоты. Основным преимуществом АСГ является возможность работы в широком диапазоне скоростей ветра (± 30 % от номинальной частоты), а также управление потоками реактивной мощности. Высокий КПД (до 98 %), компактные размеры и снижение стоимости преобразователей делают его оптимальным выбором для современных ВЭУ [3].

Практическая значимость

Использование АСГ позволяет минимизировать затраты на эксплуатацию и повысить эффективность преобразования энергии. Эти генераторы широко используются ведущими мировыми производителями, такими как ABB и Siemens, что подтверждает их конкурентоспособность на рынке [4, 5].

Ценность исследования для компании

Результаты исследования могут стать основой для успешного внедрения асинхронизированных синхронных генераторов (АСГ) в производственный процесс компании. Работа предоставляет объективные данные о преимуществах АСГ, их эксплуатационных характеристиках и экономической эффективности, что позволяет минимизировать риски при освоении новых технологий. Это исследование также формирует базу для разработки конкурентоспособных решений, которые помогут компании утвердиться в сегменте ветроэнергетики, расширить свою продукцию и увеличить долю на рынке энергетических систем.

Выводы

В условиях необходимости увеличения доли ветроэнергетики в энергобалансе России выбор асинхронизированных синхронных генераторов для ВЭУ мощностью 5 МВт является перспективным направлением. Эти генераторы обеспечивают высокую стабильность

параметров выходной энергии, соответствие требованиям стандартов, а также снижение эксплуатационных затрат, что делает их оптимальным выбором для современных высокомоощных ветроустановок.

Список использованных источников:

1. Усольцев А.А. Электрические машины / Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. — 416 с.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014.
3. Котов А.А., Неустроев Н.И. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2017. Т. 17, № 4. С. 80–89.
4. Generators for wind turbines Standard slip ring generator series for doubly-fed concept from 1.5-3.5 MW. ABB, 2014.
5. Siemens. Wind Generators from Siemens. URL: <https://new.siemens.com/global/en/markets/wind/equipment/energy-generation/windgenerators.html> (дата обращения: 25.10.2024).

**Разработка стенда для диагностики форсунок с применением аддитивных технологий
Могильников А.В.¹, Климин С.Н.², Липатов И.А.², Мельцын С.А.², Макаров А.А.²,
Тимофеев К.М.²**

1 — АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

2 — КГАПОУ «Авиатехникум», Пермь

Ключевые слова: стенд, форсунка, диагностика, моделирование, 3D-принтер Ender-3 V3 KE

Key words: stand, nozzle, diagnostics, modeling, Ender-3 V3 KE 3D printer

Форсунки могут использоваться в самых разных отраслях, от сельского хозяйства до тяжелой промышленности, что делает их универсальным решением для многих задач. От качества используемых в системах форсунок зависит себестоимость продукции. Форсунка — устройство, позволяющее дозировать подачу топлива в двигатель. Обязательным условием является регулярная проверка форсунок, которая должна проводиться в рамках периодического обслуживания.

Актуальность разработки стенда для проверки форсунок обусловлена:

- необходимостью изучения функционирования форсунок в составе сложных технологических систем;

- возможностью визуально-измерительного контроля параметров и протекающих в них процессах;

- тем фактом, что изготовление физических лабораторных установок (габаритных стендов), которые требуют применения дорогостоящего технологического оборудования, является на сегодняшний день весьма затратным.

Стенд для проверки форсунок позволяет рассмотреть работу топливной аппаратуры согласно оригинальному заводскому тест-плану и выявить отклонения от поставленных норм. Мастер составит на основе полученных данных объективную картину состояния форсунки и определит все дальнейшие действия по регулировке, ремонту и профилактике поломок.

Существуют российские стенды для испытания и регулирования форсунок, но они имеют существенные недостатки: высокая стоимость, большие габариты стендов, сложность в обслуживании и ремонте. Разработанный с помощью аддитивных технологий макет стенда для диагностики форсунок может стать основой для создания новых моделей, которые будут удовлетворять потребностям российских предприятий и способствовать решению внедрения новых технологий. К достоинствам стенда относятся: невысокая стоимость, компактность и удобство использования, легкая замена корпуса и комплектующих, а также большой простор для модернизации, простота производства и конструкции.

Для изготовления стенда, представленного на рисунке 1, использовалось не только аддитивное оборудование, но и фрезерный станок для изготовления 2-х основ: верхней и нижней (таблица 1). Данные детали были изготовлены из алюминия марки Д16Т. Также были использованы блок питания на 12 вольт, форсунка, штуцер, тумблер, переходная гайка, которые не печатаются на 3D-принтере (рисунок 2).

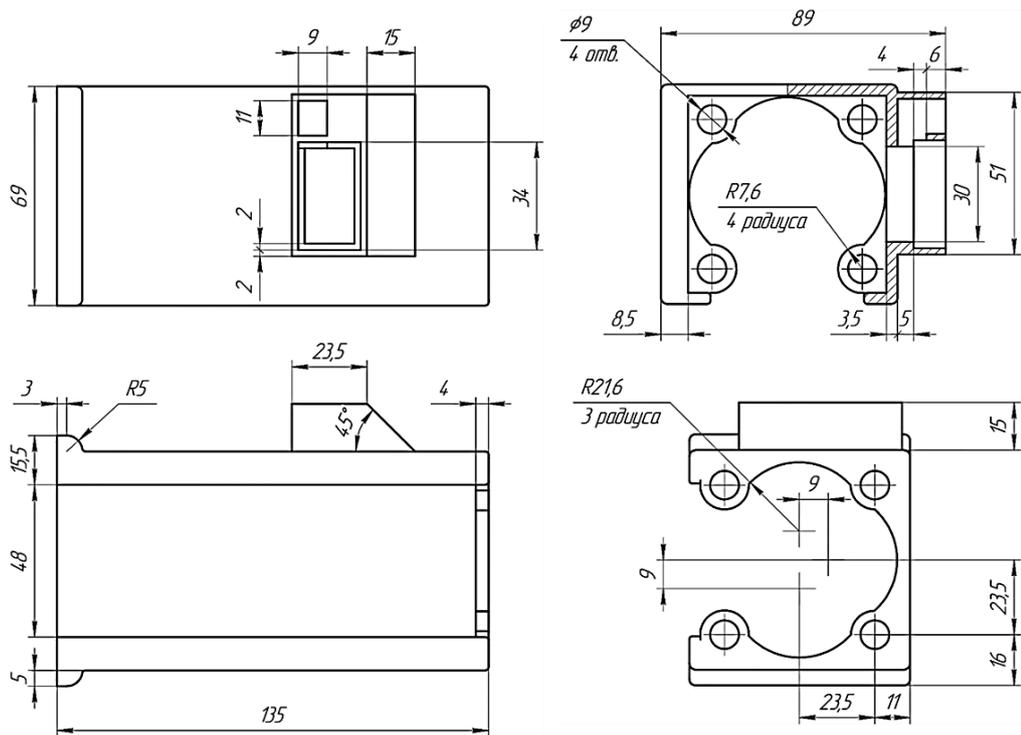
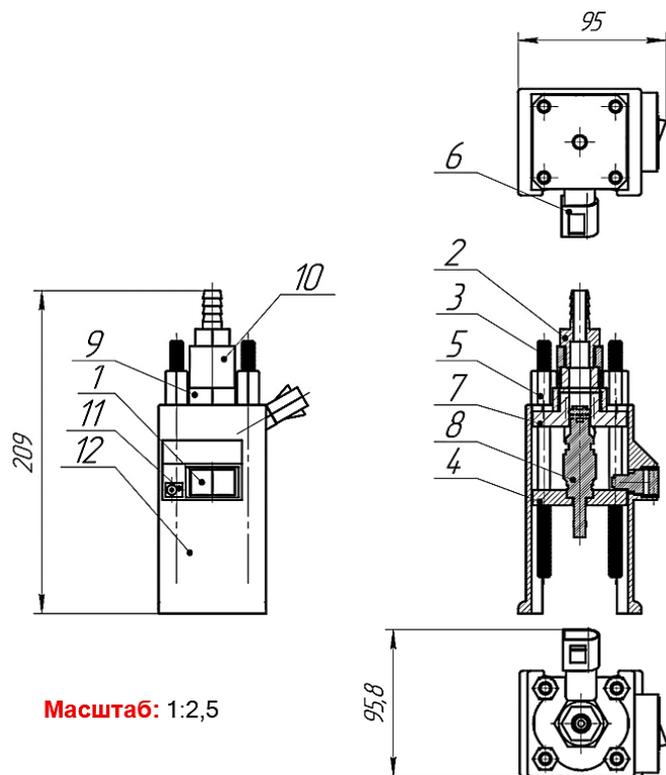


Рис 1. Чертеж корпуса стенда для диагностики форсунок



Масштаб: 1:2,5

Рис 2. Сборочный чертеж стенда для диагностики форсунок

Послойному построению подлежит сам корпус стенда (рисунок 3). Корпус печатался на 3D-принтере Creality Ender-3 V3 KE, максимальная скорость печати которого составляет 500 мм/с при ускорении 5000 мм/с², что повышает эффективность производства [1]. При изготовлении использовался материал PETG. PETG — износостойкий сополиэфир

(комбинация). «PET» означает полиэтилентерефталат, а «G» говорит о том, что он модифицирован гликолем для большей долговечности. Прочный материал, исключительно крепкий и без запаха при печати.

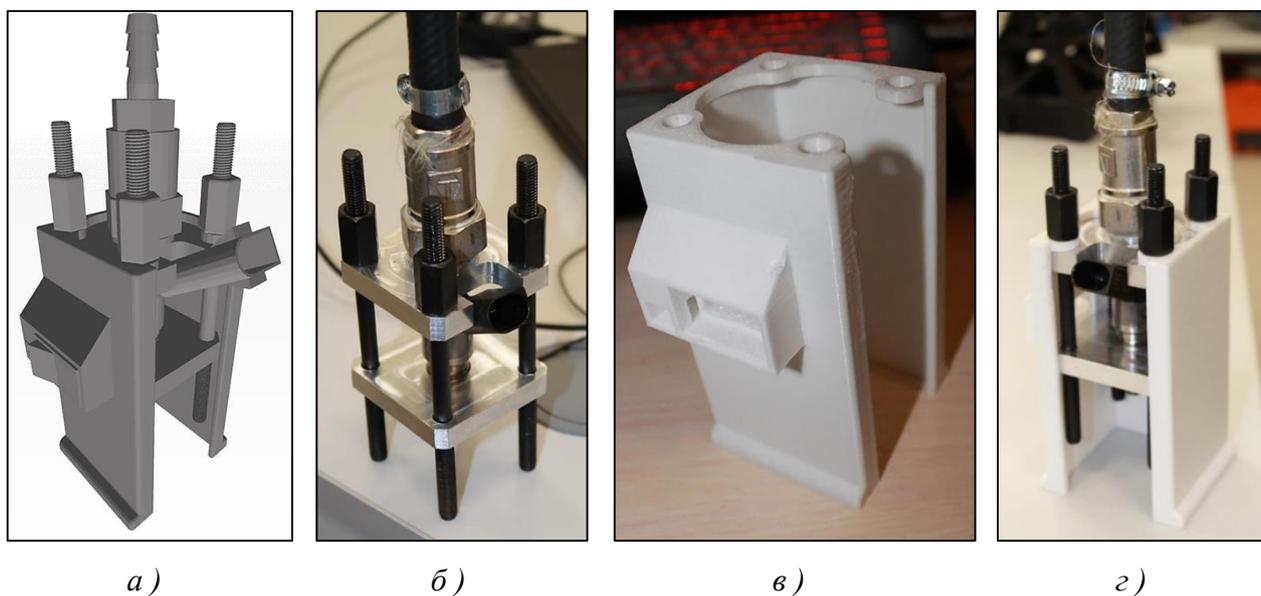


Рис 3. Конструирование станда для диагностики форсунки
(а — 3D-модель; б — форсунка с основаниями; в — корпус; г — сборка)

Таблица 1. Методы изготовления изделий для станда

Изделие	Метод изготовления	Оборудование	Материал	Цена / вес, цена / габариты	Полная стоимость
Верхняя основа	Фрезерные работы	Фрезерный станок	Алюминий Д16Т	30*60*60 мм 710 рублей	1450,00 руб.
Нижняя основа	Фрезерные работы	Фрезерный станок	Алюминий Д16Т	10*60*60 мм 360 рублей	750,00 руб.
Корпус	FDM (FFF) печать	Crealty Ender-3 V3 KE	PETG филамент	1500 руб/кг	1500,00 руб.

Совмещение традиционных и аддитивных методов изготовления дает ряд преимуществ. Разработанный стенд дешевле, а также меньше по габаритам и весу в сравнении с аналогами российского и зарубежного производства, прост в изготовлении и обслуживании. Корпус легко перепечатать на 3D-принтере и заменить, если он подвергнется повреждению или поломке в результате эксплуатации. Стоимость такого станда — 6518,00 рублей.

Список использованных источников:

1. [Электронный ресурс] // CREALITY. URL: <https://www.crealty.com/products/creality-ender-3-v3-ke> (дата обращения: 31.01.25)

**Применение подхода прямого моделирования в системе Ansys Spaceclaim для
разработки расчетных схем поврежденных деталей турбогенератора
Молодчиков С.Е.**

АО «Силовые машины» Санкт-Петербург

Современные турбогенераторы представляют собой сложные системы, требующие точного расчета для обеспечения надежности и долговечности. Применение современных инструментов компьютерного моделирования позволяет повысить точность и скорость выполнения расчетов. Программный комплекс Ansys Spaceclaim обладает широким набором инструментов для создания качественных и точных расчетных схем, что делает его актуальным для решения задач статической прочности конструкций турбогенератора.

Цель работы заключается в демонстрации особенностей использования данного инструмента при моделировании сложных геометрических форм без применения аддитивных технологий и их адаптация для проведения численного анализа методом конечных элементов.

Предполагается, что использование Ansys Spaceclaim позволит проводить комплексный анализ с учетом различных условий эксплуатации, упростить процесс моделирования поврежденных деталей, улучшить качество сетки конечных элементов.

В работе рассматриваются следующие объекты исследования:

1. Участок вала возбудителя БВД-1600-3000.
2. Бандажное кольцо турбогенератора ТЗВ-110-2УЗ.
3. Участок вала турбогенератора ТВВ-1200-2.

Постановка задачи:

1. Разработать расчетную схему для поврежденного участка вала возбудителя БВД-1600-3000 и турбогенератора ТВВ-1200-2, бандажного кольца турбогенератора ТЗВ-110-2УЗ.
2. Предложить рекомендации по моделированию различных выборок от дефектов для различных случаев нагружения.
3. Провести оценку несущей способности деталей турбогенератора с моделированными выборками от дефектов.

В работе использовались следующие методы компьютерного моделирования:

1. Для создания выборок от дефектов на участке вала возбудителя БВД-1600-3000 и бандажного кольца турбогенератора ТЗВ-110-2УЗ, применялись булевы операции, которые удаляют объем дефекта.
2. Для создания выборки от дефекта на участке вала турбогенератора ТВВ-1200-2 применялся подход фасетирования поверхности, который подразумевает не удаление объема, а создание плавной и гладкой поверхности дефекта.
3. Для проведения статического расчета использовался Ansys Mechanical.

Результаты работы показывают хорошую применяемость системы прямого моделирования выборок от дефекта в задаче определения несущей способности элементов конструкции турбогенератора любой сложности. Разработанные расчетные схемы удалось повторить с минимальным геометрическим отклонением от реальных повреждений. Численные расчеты показывают, что модели, построенные с учетом выборок от дефектов, не усложняют процесс расчета и позволяют дать оценку несущей способности конструктивного узла турбогенератора не только в первом приближении.

Основные выводы по проделанной работе:

1. Подход прямого моделирования, который используется в системе Ansys Spaceslaime позволяет быстро создавать, «лечить», редактировать сложные и не стандартные формы дефектов.
2. Обеспечение сходимости расчетной схемы и реального объекта, которая достигается предложенными подходами моделирования, дают возможность более точно определять интенсивность напряжения в выборках.
3. Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния для различных конструктивных элементов, на основе которых могут делаться выводы о возможном применении поврежденных деталей в составе узла турбогенератора.

В работе предложен новый подход практического проектирования — фасетирование поверхности участка вала турбогенератора ТВВ-1200-2, основанный на слепке реальной геометрии, без применения аддитивных технологий.

Практическая ценность работы состоит в предоставлении рекомендаций по эффективному моделированию реалистичных повреждений модели в единой среде Ansys, что дает достаточное представление о поведении конструкции в условиях рабочего нагружения, сохраняя ассоциативную связь модель — расчетный проект.

Перспектива использования предложенного подхода позволяет в дальнейшем параметризовать и оптимизировать форму выборки дефекта, определять параметры, влияющие на интенсивность напряжений и на несущую способность узлов турбогенератора. Применение 3D-сканера в рамках данной задачи, позволит моделировать дефектные поверхности, сечения, детали или узлы с достаточно высокой точностью.

Список использованных источников:

1. ANSYS Help 2022 R2.

Применение газовых подшипников в ГТЭ-160

Назаргулов А.Р.

УУНиТ, Уфа

Ключевые слова: газовые подшипники, ГТЭ-160, опорно-упорные подшипники.

Key words: *gas bearings, GTE-160, thrust bearings.*

Целью данной работы является обзор возможности применения газовых подшипников в конструкции газотурбинных установок.

В качестве улучшаемой установки была выбрана ГТЭ-160, так как опыт технического обслуживания выявил ряд дефектов связанных с использованием опорно-упорных подшипников.

Сущность гипотезы исследования: при помощи использования газовых подшипников повысить экологичность, экономичность, надежность, оптимизировать массогабаритные характеристики и устранить дефекты — электроэрозионный износ, выработка баббитовой расточки, механический износ баббита, отслоение баббитовой заливки вкладыша, выкрашивание баббитовой заливки вкладыша, повреждение сферы самоустанавливающихся опорно-упорных подшипников.

Объектом исследования является возможность применения газового подшипника в конструкции ГТЭ-160.

Для достижения цели работы необходимо было решить ряд задач:

- 1) сравнительный анализ газовых подшипников разных типов и опорно-упорных подшипников;
- 2) анализ дефектов, возникающих при использовании опорно-упорных подшипников;
- 3) выбор оптимальной формы и характеристик, необходимых для доказательства или опровержения гипотезы исследования.

Метод исследования делится на пять этапов:

1. Поиск патентов на газовые подшипники

На данном этапе необходимо проанализировать патентные разработки различных стран в области газовых подшипников, для:

- 1) проверки новизны технического решения;
- 2) формирования базы знаний;
- 3) выявления перспективных направлений.

2. Выбор типа, геометрии и характеристик газового подшипника.

Выбор типа, геометрии и характеристик позволяет обеспечить надежную работу механизма.

При выборе учитываются следующие факторы:

- 1) характерные нагрузки;
- 2) частота вращения;
- 3) ожидаемый срок службы;
- 4) вибрации и шумы;
- 5) состояние рабочих сред.

3. Оптимизация конструкции

Оптимизация позволяет:

- 1) Уменьшить количество составных частей.
- 2) Снизить затраты на техобслуживание.
- 3) Увеличить рабочие скорости.

4. Сравнение проектируемого газового подшипника и опорно-упорного подшипника.

Сравнение проектируемого газового подшипника и опорно-упорного подшипника позволит понять, получилось ли достичь цели исследовательской работы.

5. Анализ результатов сравнения

Вывод по результатам сравнения дает понимание, получилось ли доказать гипотезу исследовательской работы, устранить дефекты, связанные с использованием опорно-упорных подшипников, используя газовые подшипники.

Новизна и оригинальность данной работы состоят в том, что такой подход к оптимизации конструкции дает возможность повышения ресурса подшипника.

Результаты, полученные в данной работе в перспективе, будут применяться при производстве ГТЭ-160.

Доклад сопровождается технологической документацией, чертежами, 3Д-моделью.

Список использованных источников:

1. Патент на газовый подшипник. Автор: Бехтольд Марио. Публикация: 20.03.2011
https://yandex.ru/patents/doc/RU2414632C2_20110320.
2. Тенденции применения лепестковых газовых подшипников в опорах ГТУ и ГТД (обзор).
<https://ciam.ru/upload/iblock/59e/59eab7c0da31c31e5e8741817b5f3572.pdf?ysclid=m6ne0q4o51997354033>.
3. <https://www.turbinist.ru/49602-lepestkovye-gazodinamicheskie-podshipniki.html>.

Экспериментальное и численное исследование расходных и сепарационных характеристик ячеисто-лункового уплотнения для паровых турбин

Никитин И.А.

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Цель исследования. Целью работы является исследование расходных характеристик ячеисто-лункового уплотнения.

Гипотеза исследования. Предполагается, что использование лунковой поверхности на роторе для интенсификации потока в противоположной ячеистой поверхности статорной части позволит создать дополнительное гидравлическое сопротивление и уменьшить утечку в уплотнении.

Объект исследования — прямоугольно-ячеистое уплотнение с лунковым ротором.

Задачи исследования:

- Сборка стенда для проведения аэродинамического исследования ячеисто-лункового уплотнения.
- Проведение серии экспериментов по исследованию сепарационной способности уплотнения.
- Проведение серии экспериментов по исследованию расходных характеристик уплотнения.
- Численное моделирование уплотнения с другой конфигурацией статора для определения оптимальной геометрии ячеек.
- Оформление патента на полезную модель ячеисто-лункового уплотнения.

Методы исследования: моделирование, сравнение, эксперимент, визуализация.

Результаты исследования.

Серии экспериментов проводились с неподвижным диском и вращающимся при различных оборотах (1000; 2000; 3000 об/мин). Результаты построения расходных характеристик показали, что влияние вращения пренебрежительно мало (это подтверждают и другие авторы, например [1]), поэтому все дальнейшие результаты будут представлены для статического эксперимента.

При обработке экспериментальных данных были построены зависимости расхода утечки от перепада давлений на проточную часть уплотнения $G = f(\varepsilon)$ (рис. 1). При $\varepsilon = 0,9$ расход утечки уплотнения с лунковым ротором уменьшился на 5,7% по сравнению с гладким, а для перепада давлений $\varepsilon = 0,85$ экономичность составила уже 6%.

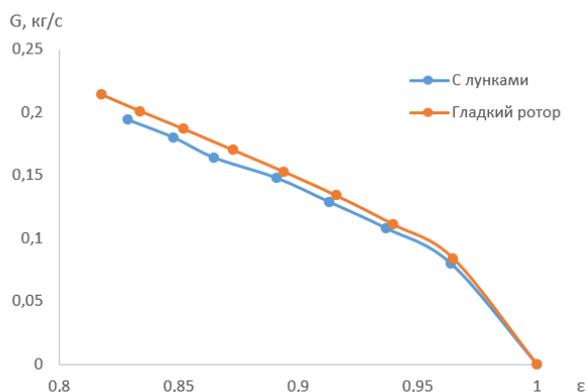


Рис. 1. Расходная характеристика прямоугольно-ячеистого уплотнения с лунковым и гладким ротором по результатам эксперимента

В процессе численного моделирования был выявлен сложный пространственный характер течения газа в проточной части уплотнения с образованием обратных вихревых течений. На рис. 2 представлена эпюра скоростей для лункового (а) и гладкого (б) роторов для перепада давлений $\varepsilon = 0,8$. Отчетливо видно, что в уплотнении с лунками вихри в ячейках напротив имеют более пологую структуру. Усиление вихревых структур связано изменяющимся градиентом площади лунок, где происходит локальное ускорение основного потока, который, в свою очередь, нагнетает возмущенный поток в ячейки. Причем это возмущение сильнее в местах отрыва потока в лунках: между первым и вторым углублением.

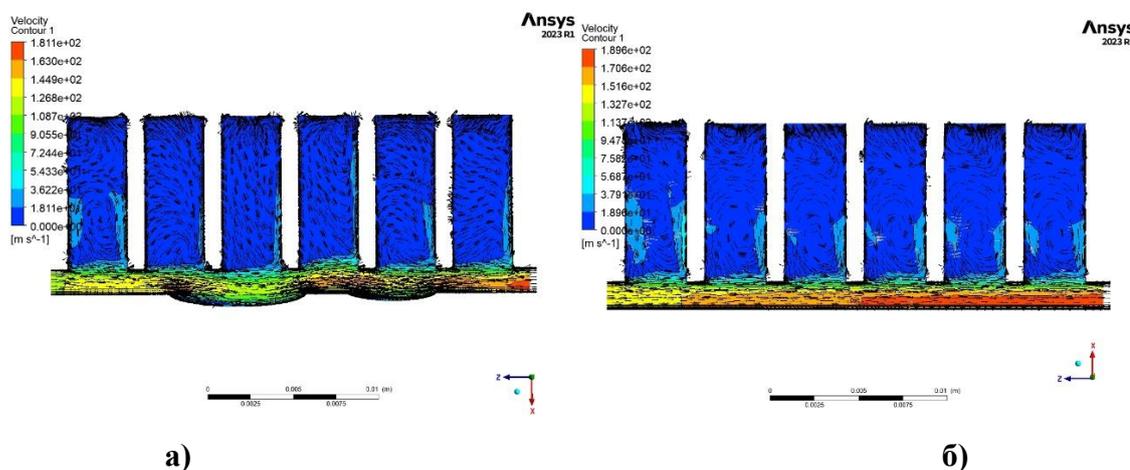


Рис. 2. Распределение проекции абсолютной скорости в продольном сечении уплотнения

Сравнение результатов расчетов с данными экспериментов, полученными при исследовании модели уплотнения (рис. 3), показало увеличение расхода утечки уплотнения с прямоугольно-ячеистым статором, образованным прямыми радиальными пластинами (численное моделирование), по сравнению с прямоугольно-ячеистым статором, где радиальные пластины, формирующие ячейки, наклонены под углом 45° к плоскости по касательной (эксперимент). Это объясняется влиянием закрутки потока и направлением

радиальных пластин, которые позволяют улавливать перетекающие линии тока поперек уплотняющего канала.

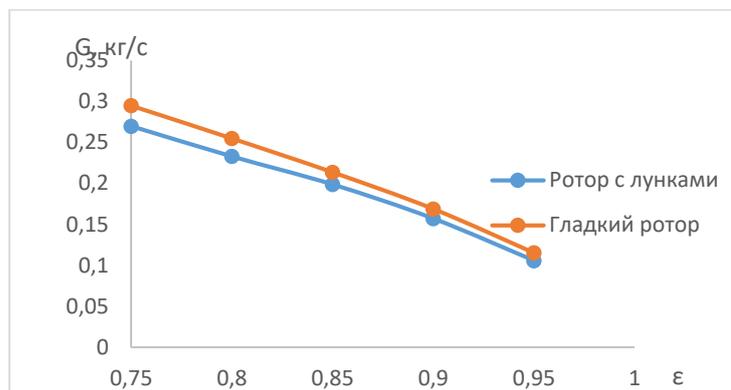


Рис. 3. Расходная характеристика прямоугольно-ячеистого уплотнения с лунковым и гладким ротором по результатам численного моделирования.

Основные выводы по проделанному исследованию:

- Предложенная конструкция уплотнения показывает отличную эффективность по уменьшению расхода утечки при том же радиальном зазоре по сравнению с прямоугольно-ячеистым уплотнением с гладким ротором.
- Результаты исследования прямоугольно-ячеистого уплотнения с комбинированным использованием лунок на противоположной роторной части показали возможность применения его в качестве эффективного конструкторского решения для уменьшения расхода утечки в узлах больших осевых перемещений валопровода относительно корпуса.

В чем состоит новизна и оригинальность исследования. Лунковые поверхности используют в теплообменниках для интенсификации процесса теплообмена. Предложено впервые создать комбинированное уплотнение с использованием лунок и ячеек для увеличения гидравлического сопротивления в проточной части уплотнения.

Ценность исследования и перспектива использования результатов в компании. Данное техническое решение позволит увеличить внутренний КПД парка выпускаемых паровых турбин групп компаний «Силовые машины», а также модернизировать паровые турбины, эксплуатирующиеся на станциях.

Список использованных источников:

1. Дмитриев С.С. Экспериментальные исследования влияния вращения ротора и закрутки потока перед уплотнениями на расход утечки / С.С. Дмитриев, Б.Н. Петрунин, М.Э. А.Э. Ахмед // Теплоэнергетика. — 2021. — № 2. — С. 16–27.

2. Грибин В.Г., Дмитриев С.С., Петрунин Б.Н., Ахмед М.Э.А.Э. Исследование сепарационной способности нового периферийного уплотнения НИУ МЭИ // Теплоэнергетика. — 2020. — № 6. — С. 21–27.

Проектирование металлической спиральной камеры с требуемым углом выхода потока

Никулин Д.А.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: угол выхода потока, гидротурбина, направляющий аппарат, колонны статора, спиральная камера, ANSYS CFX.

Key words: outlet flow angle, hydro turbine, distributor, stator columns, spiral case, ANSYS CFX.

Введение. В настоящее время заказчиком, как правило, выставляется требование обеспечить тенденцию к самозакрыванию (гидравлический момент, действующий на лопатку, положителен) лопаток направляющего аппарата (НА) во всем диапазоне открытых [1]. Металлическая спиральная камера (СК) со стандартными колоннами статора [2] характеризуется малыми углами выхода потока с колонн статора, порядка 27° – 35° . При таких

у

г

л

Гипотеза работы. Обеспечения требуемого угла натекания потока можно добиться изменением профиля статорных колонн.

Этапы работы. Проектирование СК выполнялось в рамках подготовки ТКП для дериационной ПЛ гидротурбины с металлической СК. На первом этапе была спроектирована стандартная СК и стандартный профиль колонн статора [2] (рисунки 1, 2). По результатам аналитического расчета [6] угол выхода потока из СК (без учета колонн статора) составил $\delta = 38.2^{\circ}$. Далее, в программном комплексе ANSYS CFX был выполнен расчет совместного трехмерного течения в СК и колоннах статора. Угол выхода потока с колонн статора составил $\delta = 38.2^{\circ}$. В соответствии с методикой [3, 4], выполнен расчет зависимости гидравлического момента, действующего на лопатку НА, от открытия НА для основных напоров (рисунок 3). Видно, что условие самозакрывания не выполняется.

На следующем этапе была спроектирована СК увеличенных размеров (рисунок 1). По результатам гидромеханического расчета угол выхода потока из СК (без учета колонн статора) составил $\delta = 36.7^{\circ}$. Т. е. при существенном увеличении размеров СК угол выхода потока был увеличен только на 3.3° . Расчет в программном комплексе ANSYS CFX не выполнялся.

а

н

а

Далее, для стандартной спиральной камеры были спроектированы [5, 6] колонны статора с новым профилем (рисунок 2). В программном комплексе ANSYS CFX выполнен расчет совместного трехмерного течения в СК и колоннах статора. Угол выхода потока с колонн статора составил $\delta=45.8^\circ$. Выполнен расчет зависимости гидравлического момента, действующего на лопатку НА, от открытия НА для основных напоров (рисунок 4). Видно, что условие самозакрывания выполнено во всем диапазоне открытий.

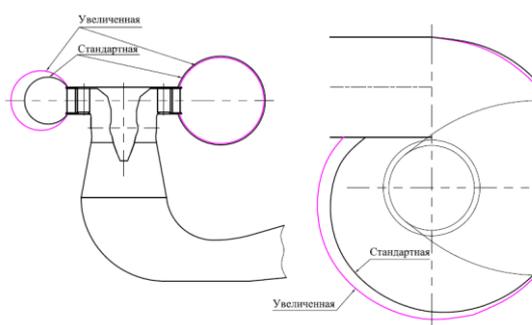


Рис. 1. Сравнение спиральных камер

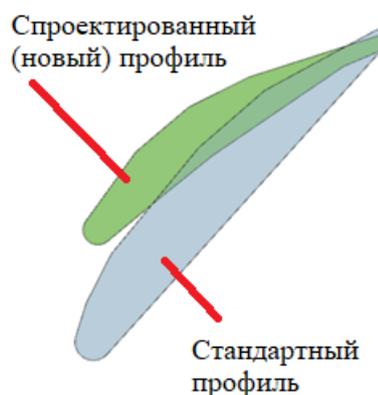


Рис. 2. Сравнение профилей

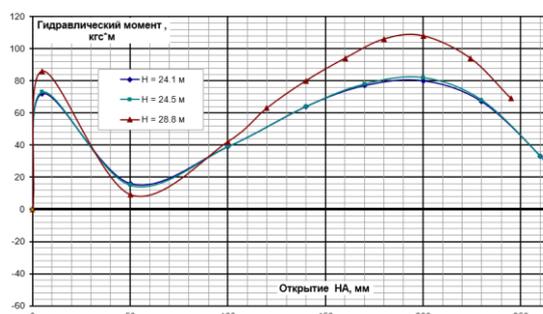


Рис. 3. Зависимость гидравлического момента от открытия НА (для стандартного профиля колонны статора)

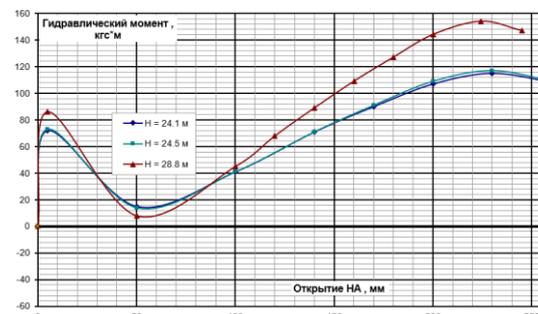


Рис. 4. Зависимость гидравлического момента от открытия НА (для нового профиля колонны статора)

Заключение. Самозакрывания направляющего аппарата можно добиться изменением профиля статорной колонны, что также является экономически выгодным решением, т. к. в этом случае габариты спиральной камеры не увеличиваются.

Список использованных источников:

1. СТО РусГидро 02.01.110-2015 Гидротурбинные установки. Условия поставки. Нормы и требования.
2. ОСТ. 108.023.11-80. Камеры спиральные металлические гидравлических вертикальных турбин. Очертания проточной части. Размеры.

3. ОСТ 108.023.14-84 Профили лопаток направляющего аппарата гидравлических вертикальных поворотно-лопастных и радиально-осевых турбин. Типы и размеры. Андреев В.Б. и др. Справочник по гидротурбинам //Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. — 1984. — 496 с.

4. Ковалев Н.Н., Гидротурбины Л. Машиностроение. — 1971. — 584 с.

5. Грановский С.А. и др. Конструкции и расчет гидротурбин //Л., Машиностроение. — 1974. — 408 с.

Маркетинг и ценообразование энергетического оборудования

Овчинников К.А.

СПБПУ, Санкт-Петербург

Ключевые слова: основное оборудование электростанций, формирование коммерческого предложения, LCOE, NPV, технический минимум

Производители энергетического оборудования не обладают возможностью быстро изменить объем выпуска. Главным фактором повышения доходности предприятия является политика ценообразования. В работе систематизированы факторы, необходимые для учета при формировании коммерческих предложений по отношению к генерирующим компаниям.

Ценовая политика предприятий энергомашиностроения требует учета механизмов принятия решений заказчиком. Анализ коммерческих предложений подразумевает максимизацию доходности вложений. Анализ рисков, связанный с экспертной оценкой, направлен на увеличение математического ожидания финансовых результатов с учетом текущих ресурсов и рыночных условий.

Цель ценообразования — поиск максимальной цены, которая обеспечит:

- 1) Положительный денежный поток заказчика.
- 2) Лучшие финансовые показатели, нежели у конкурентов.

Расходы генераторов делятся на три основные группы:

- 1) Капитальные (CapEx), зависящие от стоимости оборудования.
- 2) Эксплуатационные (OpEx), зависящие от стоимости обслуживания.
- 3) Топливные, зависящие от удельного расхода и цены топлива.

Для сравнения используются LCOE (средневзвешенная себестоимость электроэнергии) и NPV (чистый дисконтированный доход).

В приближенных расчетах уместно использовать LCOE (формула 1) [1–3]. Показатель удобен отсутствием расчета финансовых потоков.

$$LCOE = \frac{CapEx_{уд.} + \sum_1^n \frac{OpEx_{уд.}}{(1+r)^n}}{\sum_1^n \frac{E_{уд.}}{(1+r)^n}} + \frac{3600 * C_Q}{\eta} \quad (1)$$

где $CapEx_{уд.}$ — удельные капитальные затраты [\$/кВт]; $OpEx_{уд.}$ — удельные эксплуатационные затраты в год n (неизменны) [\$/год·кВт]; E_n — удельная выработка электроэнергии [кВт·ч/год·кВт],

C_Q — стоимость топлива [\$/кДж], η — КПД, r — ставка дисконтирования, n — лет.

Чтобы сделать вывод об экономичности решения 1 по сравнению с решением 2, должно быть справедливым следующее уравнение:

$$LCOE_1 < LCOE_2 \quad (2)$$

Использование показателя NPV позволяет учитывать рыночную конъюнктуру. Без учета налогов и штрафов она выглядит следующим образом:

$$NPV = -CapEx$$

$$+ \sum_1^n \frac{P_n \Pi_{\text{мощность}} - OpEx_n}{(1+r)^n} + \int_1^n \frac{\int_1^{8760} E_t \left(\Pi_{\text{эл-я}} - \frac{3600 * C_Q}{\eta_t} \right)}{(1+r)^n} dt + C \quad (3)$$

где $OpEx_n$ — эксплуатационные затраты в месяц n , P_n — отпущенная мощность, $\Pi_{\text{мощность}}$ — цена мощности (зависит от механизма (ДПМ, КОМ НГО, КОММод)), E_t — выработка в час t , $\Pi_{\text{эл-я}}$ — цена электроэнергии, C — неучтенные потоки.

Результаты

Определены основные факторы влияющие на предел цены оборудования:

- энергетические характеристики и объемы производства;
- стоимость обслуживания оборудования;
- надежность оборудования;
- цены энергоносители, электроэнергию и мощность.

Поиск предела цены требует преобразовать уравнение себестоимости:

$$\frac{\Delta CapEx_{уд.}}{\sum_1^n \frac{E_{уд.}}{(1+r)^n}} < \frac{\Delta OpEx_{уд.}}{E_{уд.}} + \Delta \left(\frac{3600 * C_Q}{\eta} \right) \quad (4)$$

Увеличение капитальных затрат (рост стоимости оборудования по сравнению с конкурирующим) при равенстве эксплуатационных затрат будет оправдано в случае, если топливные издержки снизятся еще больше:

$$\Delta CapEx_{уд.} < \text{КИУМ} * 365 * 24 * \sum_1^n \frac{1}{(1+r)^n} 3600 \left(\frac{C_{Q_1}}{\eta_1} - \frac{C_{Q_2}}{\eta_2} \right) \quad (5)$$

где КИУМ — коэффициент использования установленной мощности, 24 — число часов в сутки, 365 — число дней в году.

При схожих топливных, но меньших эксплуатационных издержках предел увеличения капитальных затрат задается экономией на обслуживании и ремонте:

$$\Delta CapEx_{уд.} < \sum_1^n \frac{1}{(1+r)^n} \sum_1^n OpEx_{n_{уд.}} \quad (6)$$

где КИУМ — коэффициент использования установленной мощности, 24 — число часов в сутки, 365 — число дней в году.

Исходя из задачи максимизации NPV можно выделить еще два фактора, влияющих не на себестоимость производства, а на доходы:

- 1) аварийность;
- 2) объем и КПД производства на техническом минимуме.

Аварии и неплановые остановки приводят к недопоставке мощности и штрафам. Меньший объем технического минимума же может позволить снизить убыток в часы низких цен РСВ.

Обсуждение

Основные показатели, обеспечивающие конкурентные преимущества оборудования, — это КПД на номинальном режиме работы и срок службы. Однако существуют и другие показатели, которые можно использовать как дополнительных аргументы в переговорах с заказчиком и при позиционировании (на сайте производителя, в СМИ, атласах, выставках).

Наиболее аргументированным подходом будет предварительный укрупненный расчет показателей. Например, расчет топливной составляющей себестоимости оборудования исходя из цен на энергоносители в регионе заказчика. Аналогичный расчет можно произвести и для убытка при работе на техническом минимуме, зная цены топлива и обработав статистику по ценам РСВ. Расчет показателей может быть трудоемким, целесообразно разработать калькулятор, для демонстрации на сайте.

Эксплуатационные затраты также важны для клиентов. Поэтому важно собирать, анализировать и демонстрировать данные о фактических или прогнозных эксплуатационных

затратах. А обработка статистики по отказам позволит спрогнозировать математическое ожидание убытка от недопоставки.

Отказа от демонстрации широкого спектра показателей может выглядеть желание скрыть потенциально слабые места оборудования. Компании, предоставившие такую информацию, будут иметь преимущество в позиционировании, поскольку при расчете рисков генкомпания будут скорее склонны завышать потенциальные риски и ущерб и занижать доходные статьи.

Список использованных источников:

1. Федор Веселов. Курс «Планирование развития энергосистем» Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики — методические основы и результаты // Дополнительная профессиональная программа МВА «Управление в электроэнергетике» Москва, УЦ Совета рынка, июнь 2019. Ист.: https://www.eriras.ru/files/veselov_mva_optimizatsiya_struktury.pdf (дата обращения: 28.08.2023)
2. Федотов А.А., Каранова Д.А., Тарасенко А.Б., Киселева С.В. Использование свалочного газа в газотурбинных и газопоршневых установках: энергетические и экономические оценки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;19-21:65-82.
3. Fan, Jing-Li; Wei, Shijie; Yang, Lin; Wang, Hang; Zhong, Ping; Zhang, Xian (2019). Comparison of the LCOE between coal-fired power plants with CCS and main low-carbon generation technologies: Evidence from China. Energy, doi:10.1016/j.energy. 2019.04.003

Анализ существующих подходов к обратному проектированию турбинных лопаток ГТУ и предложение новой методики реверс-инжиниринга

Павлов Н.С.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, турбинная лопатка, газовая турбина, методология

Key words: reverse engineering, turbine blade, gas turbine, methodology

Сегодня обратное проектирование (реверс-инжиниринг) в сфере энергетического машиностроения является как никогда обсуждаемой и актуальной темой. Учитывая уход с российского рынка иностранных производителей энергетического оборудования и последующий отказ в его обслуживании, возникает острая потребность в скорейшей замене данного оборудования на отечественные аналоги и локализации производства запасных

частей для эксплуатируемых установок на период их работы. Особенно это актуально для газотурбинной отрасли, поскольку абсолютное большинство газовых турбин большой мощности, находящихся в эксплуатации на территории Российской Федерации, приходится на долю западных производителей, поэтому нельзя недооценивать воздействие санкционной политики на этот сектор. Правительство, понимая данную проблему, выводит на передний план задачи по скорейшему освоению производства отечественных газовых турбин и ускоренную локализацию производства запасных частей для поддержания эксплуатируемого оборудования. Одним из распространенных способов локализации является метод обратного проектирования (реверс-инжиниринга). Однако, учитывая наукоемкость подобных проектов, а также постоянно возникающую потребность в плановом и внеплановом обслуживании существующего энергетического оборудования, для успешной и быстрой реализации поставленных задач требуется разработка комплексной методики реверс-инжиниринга.

Многие крупные компании в сфере энергетического машиностроения предлагают свои услуги по реверс-инжинирингу, гарантируя высокое качество взаимозаменяемости локализованного изделия и оригинального образца. Зачастую эти работы сопровождаются различными предложениями по модернизации и новыми инженерными решениями, позволяющими исправить или улучшить характеристики изделия. Однако на данный момент в России не существует единого, отработанного общего подхода к обратному проектированию, который можно было бы стандартизировать. И если процесс реверс-инжиниринга относительно простых по своей форме и назначению деталей и узлов еще может быть реализован с достаточной точностью и взаимозаменяемостью без специального методологического сопровождения, то процесс реверс-инжиниринга более технологичных изделий, например, турбинных лопаток требует кардинально другого подхода.

В работе рассматриваются существующие в мире методики реверс-инжиниринга турбинных лопаток. Выполняется качественный анализ особенностей российского и зарубежного подходов к обратному проектированию, выделяются наилучшие практики и решения, принимаемые в ходе процесса воссоздания исследуемого изделия.

На основе изученных данных, а также исходя из собственного опыта реверс-инжиниринга пилотной горелки турбины SGT-400 в составе инициативной группы, в работе предлагается методология обратного проектирования, которая позволяет воссоздать турбинную лопатку не в отрыве от всей газотурбинной установки (ГТУ), а с учетом численного моделирования тепловых, газодинамических, прочностных и иных расчетов объекта исследования, подтвержденных компьютерным моделированием процессов и конечном счете натурным экспериментом. Обратное проектирование рассматривается с двух

сторон: с одной стороны, как классический подход к реверсу инжинирингу, применяемый большинством компаний, а с другой стороны — как метод последовательных расчетов, описывающих процессы и условия работы. В работе подтверждается, что только при подобном подходе возможно назначить обоснованные геометрические допуски с точки зрения физики процесса и добиться высокой взаимозаменяемости исследуемого объекта и вновь проектируемого изделия. Итогом работы является создание дорожной карты, описывающей последовательность этапов реверс-инжиниринга турбинной лопатки. На основе предложенной методологии в дальнейшем планируется в тестовом режиме выполнить реверс-инжиниринг турбинной лопатки большой мощности.

**Выбор и обоснование тепловой схемы мобильной газотурбинной
установки для электромобилей
Парфенов К.А., Барсков В.В.
СПбПУ, Санкт-Петербург**

Ключевые слова: малогабаритная ГТУ, мобильная ГТУ, электромобиль.

Актуальность данного исследования обусловлена растущим числом электромобилей как в мире, так и в Российской Федерации.

Целью является выбор тепловой схемы установки, а также определение диапазона параметров для достижения наилучших характеристик. Задачами работы являются исследование влияния тепловых схем и параметров перед турбиной на эффективный КПД малогабаритной газотурбинной установки (далее МГТУ). Для исследования применяется метод математического моделирования циклов.

Для исследования были выбраны следующие тепловые схемы:

1. Тепловая схема простого цикла без рекуперации.
2. Тепловая схема простого цикла с рекуперацией.
3. Тепловая схема двухвальной ГТУ с рекуперацией и промежуточным охлаждением.

Указанные выше схемы были выбраны исходя из следующих предъявляемых требований:

- необходимость малых массогабаритных размеров установки;
- высокая эффективность теплообменника (для циклов с рекуперацией) [1, 2];
- максимальный КПД.

Расчеты проводятся для диапазона температур с 600 до 1000 °С с шагом 100 °С. Ниже представлены графики зависимости эффективного КПД циклов от степени повышения давления в компрессоре при разных температурах перед турбиной (рис. 1 – 4).

Следует отметить, что разрабатываемая МГТУ будет устанавливаться на электромобилях. Соответственно, необходимо в первую очередь учитывать массогабаритные характеристики. Это требование будет учитываться исходя из количественного состава оборудования. Дополнительным критерием для определения оптимального цикла будет выступать эффективный КПД.

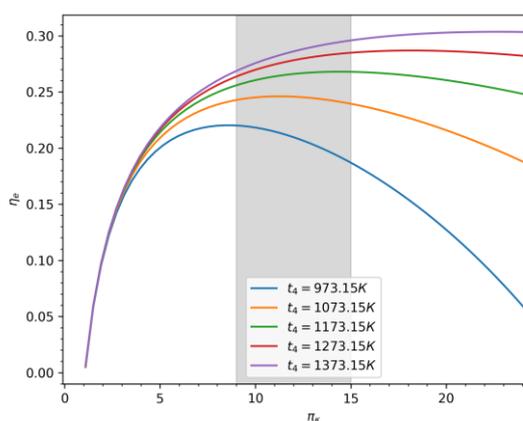


Рис. 2. График зависимости эффективного КПД простого цикла без рекуперации от степени повышения давления

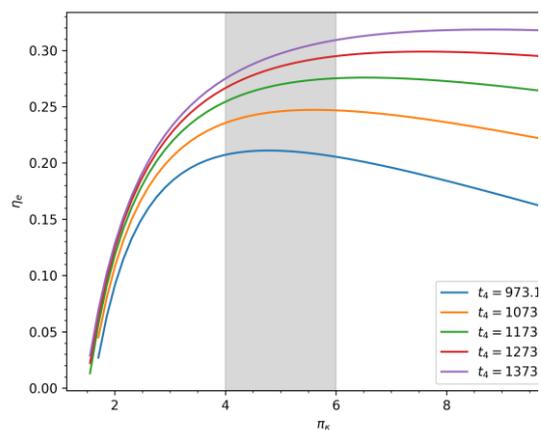


Рис. 3. График зависимости эффективного КПД простого цикла с рекуперацией от степени повышения давления

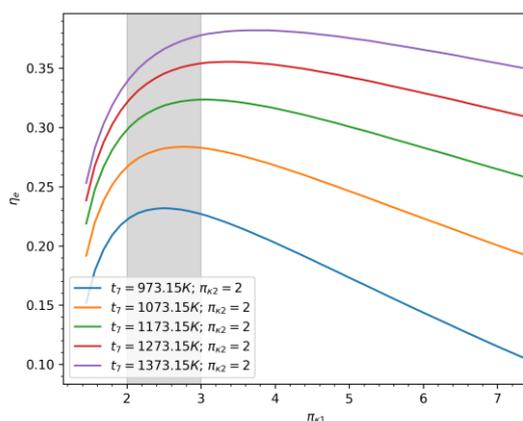


Рис. 4. График зависимости эффективного КПД двухвальной ГТУ с рекуперацией и промежуточным охлаждением от степени повышения давления в первом каскаде компрессора

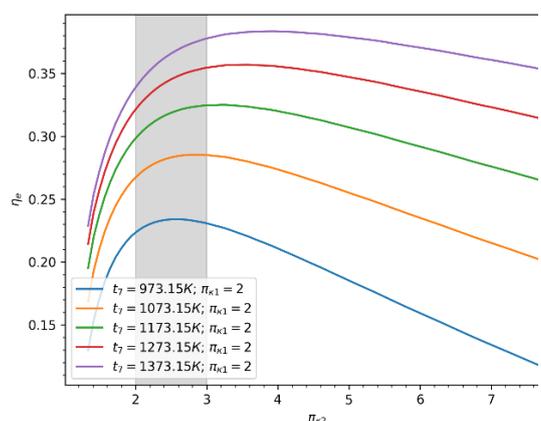


Рис. 5. График зависимости эффективного КПД двухвальной ГТУ с рекуперацией и промежуточным охлаждением от степени повышения давления во втором каскаде компрессора

Исходя из полученных графиков зависимостей можно сделать вывод о значительно большем эффективном КПД третьего рассматриваемого цикла. Однако без дополнительных исследований не представляется возможным однозначно заключить о возможности его

применения для указанных выше целей, т. к. расширение состава оборудования установки неизбежно повлечет за собой увеличение массы и размеров.

Несмотря на заключение выше, примем, что наиболее перспективным циклом для разработки МГТУ является цикл двухвальной ГТУ с рекуперацией и промежуточным охлаждением.

Выбранные диапазоны степени повышения давления для каждого цикла представлены в таблице 1.

Таблица 1. Выбранные диапазоны параметров цикла

Наименование цикла	Диапазон степени повышения давления и температур
Тепловая схема простого цикла без рекуперации	9–15 800–900 °С
Тепловая схема простого цикла с рекуперацией	4–6 800–900 °С
Тепловая схема двухвальной ГТУ с рекуперацией и промежуточным охлаждением	2–3 2–3 800–900 °С

Критериями оптимума для данных диапазонов выступают количество ступеней компрессора и эффективный КПД каждого цикла. Указанные диапазоны позволяют добиться максимального КПД при минимальной массе установки. Таким образом, поставленная цель достигнута.

Дальнейшим развитием данного исследования будут выбор оптимальных параметров для проектирования компрессоров и турбин для данной установки и разработка рекомендаций для проектирования теплообменного оборудования. Целевыми показателями отношения мощности установки к ее массе будем считать 400 Вт/кг [3, 4].

Результаты данного исследования можно использовать для дальнейшей разработки МГТУ для использования в качестве мобильной зарядной станции. Учитывая малую развитость данного рынка в РФ и растущий спрос на электромобили, данное исследование может заинтересовать АО «Силовые машины».

Список использованных источников:

1. Chatzi P. et al. Metal foam recuperators on micro gas turbines: Multi-objective optimisation of efficiency, power and weight // Appl Therm Eng. Elsevier Ltd, 2024. Vol. 242.
2. Chen F. et al. Heat transfer efficiency enhancement of gyroid heat exchanger based on multidimensional gradient structure design // International Communications in Heat and Mass Transfer. Elsevier Ltd, 2023. Vol. 149.

3. Tran M. K., Sherman S., Samadani E. et al. Environmental and Economic Benefits of a Battery Electric Vehicle Powertrain with a Zinc–Air Range Extender in the Transition to Electric Vehicles // *Vehicles*. 2020. Vol. 2, № 3. P. 398–412.

4. Sherman S. B., Cano Z. P., Fowler M. et al. Range-extending Zinc-air battery for electric vehicle // *AIMS Energy*. AIMS Press, 2018. Vol. 6, № 1. P. 121–145.

**Гибка листового проката сплавов титана на прессах.
Оптимизация технологического процесса
Пегов В.Д.**

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: листовой прокат сплавов титана, титановые полуцилиндры, гибка на прессах

Key words: titanium alloy sheets, titanium half cylinders, press bending

В данной работе рассматривается процесс гибки полуцилиндров (рис. 1) из листового проката сплавов титана на прессах. Из полуцилиндров собирают цилиндры, которые в свою очередь составляют основу корпуса статора электродвигателя.



Рис. 1. Процесс гибки детали «Полуцилиндр»

Цель работы заключается в оптимизации технологического процесса гибки с целью повышения качества и точности полуколец.

Гипотеза работы предполагает, что применение медных/алюминиевых прокладок при гибке листового титана, положительно влияет геометрию готовых изделий.

Объектом работы являются полукольца, изготовленные из листового проката сплавов титана, используемые в различных особо ответственных конструкциях.

Задачи работы включают: анализ существующих технологий изготовления титановых полуколец, экспериментальное исследование влияния параметров гибки на качество полуколец, а также разработку рекомендаций по оптимизации процесса.

Методы работы основаны на экспериментальных испытаниях, компьютерном моделировании и анализе полученных данных.

Результат работы включает в себя определение оптимальных режимов гибки, что позволило снизить размеры и количество дефектов, возникающих при механической обработке поверхности полуколец.

Основные выводы подчеркивают важность точного контроля параметров гибки для достижения высоких эксплуатационных характеристик изделий.

Новизна и оригинальность работы заключается в разработке нового подхода к гибке титана на прессах, который учитывает специфику механических свойств материала и позволяет улучшить качество полуколец.

Ценность работы заключается в возможности применения полученных результатов для повышения эффективности производства и улучшения характеристик готовых изделий.

Перспектива использования результатов работы открывает новые горизонты для внедрения инновационных технологий в обработку титана, что может привести к созданию более надежных и долговечных конструкций корпусов статора.

Устройства измерения полных параметров газа

Плодистый М.О.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: измерительное устройство, замер полных параметров газа, газовая турбина, термопара, камера торможения.

Key words: measuring instrument, measurement of gas total parameters, gas turbine, thermocouple, kiel-shrouded.

Температура и давление горячего газа перед турбиной входят в число ключевых параметров, характеризующих работу ГТУ. Измерение указанных параметров необходимо для подтверждения заявленных характеристик ГТУ, а также для верификации расчетных моделей и методов. Измерительные устройства включают в себя термопары для измерения температуры газа и капиллярные трубки для измерения давления, закрепленные в корпусе. Проблемой является обеспечение работоспособности измерительных устройств при высокой температуре газа, которая для современных ГТУ может превышать 1500°C. Решение этой

проблемы достигается использованием жаростойких материалов и (или) применением охлаждения конструкции измерительного устройства.

Целью работы является создание устройства для измерения давления и температуры заторможенного газового потока перед турбиной. Устройство должно обеспечивать высокую точность измерения температуры и давления газа, сохранять работоспособность при высокой температуре газа, быть простым в изготовлении и обеспечивать простоту установки и фиксации при приемлемой стоимости.

Анализ литературных источников [1–3] дал основания выбрать для дальнейшей разработки измерительное устройство с камерой торможения, которая обеспечивает уменьшение скорости потока и восстановление полного давления газа при его измерении. Уменьшение скорости потока в непосредственной близости от чувствительного элемента («горячего» спая) термопары увеличивает коэффициент восстановления температуры и повышает точность измерения температуры газа.

В процессе разработки измерительного устройства был рассмотрен ряд вариантов конструкции корпуса устройства (втулки) с камерой торможения потока, включая втулки с каналами охлаждения, а также втулки из жаростойких материалов без охлаждения. Сравнительный анализ вариантов конструкции позволил выявить четыре основных варианта конструкции втулки, представленные на рисунке 1, которые были детально исследованы при выборе окончательного варианта.

Устройство для измерения температуры представляет собой цилиндрическую втулку (охлаждаемую или нет) с продольным осевым каналом и камерой торможения. Термопара установлена в продольном осевом канале таким образом, что спай термопары находится в

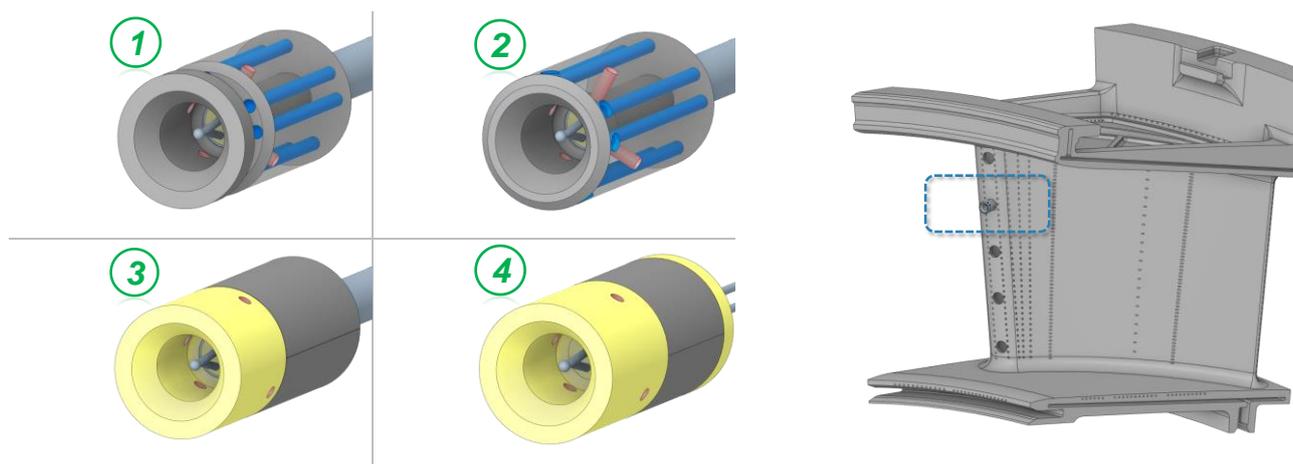


Рис. 6. Рассматриваемые варианты конструкции

камере торможения. В охлаждаемых вариантах конструкции цилиндрические отверстия охлаждения расположены попарно по окружности втулки с выпуском воздуха в

проточную часть под углом. Выпуск охлаждающего воздуха под углом к оси втулки позволяет исключить влияние охлаждающего воздуха на измеряемую температуру газового потока. Для исключения застойной зоны в камере торможения, которая может отрицательно повлиять на точность измерения температуры, выполнены 4 отверстия. Устройства для измерения давления указанных четырех отверстий не имеют. Основной недостаток охлаждаемых втулок — это ограниченная максимально допустимая температура металла, а также возможное воздействие втулки на показания термопары за счет охлаждения потока газа при теплообмене со втулкой. Для керамических втулок основной недостаток — это трудности фиксации устройства в турбине, вызванные тем, что данный материал невозможно закрепить с использованием стандартных методов фиксации (сварка, пайка), и возникает необходимость проработки дополнительных конструктивных мероприятий для обеспечения надежной фиксации как самой термопары, так и корпуса в сопловой лопатке.

Разработка конструкции втулки измерительного устройства была выполнена на основе результатов теплового анализа, проведенного с использованием сопряженной тепло-гидравлической модели. Расчетная модель включала сопловую лопатку и измерительное устройство, состоящее из корпуса и закрепленной в нем термопары с открытым спаем. В результате проведенных расчетов были получены распределение температуры охлаждающего воздуха с учетом его подогрева в каналах охлаждения и трехмерное распределение температуры металла втулки (рис. 7). Анализ полученных данных свидетельствует о том, что втулка № 2 в наибольшей степени соответствует предъявляемым критериям, обеспечивая надежную работу и высокую точность измерений при приемлемой стоимости и сроках изготовления.

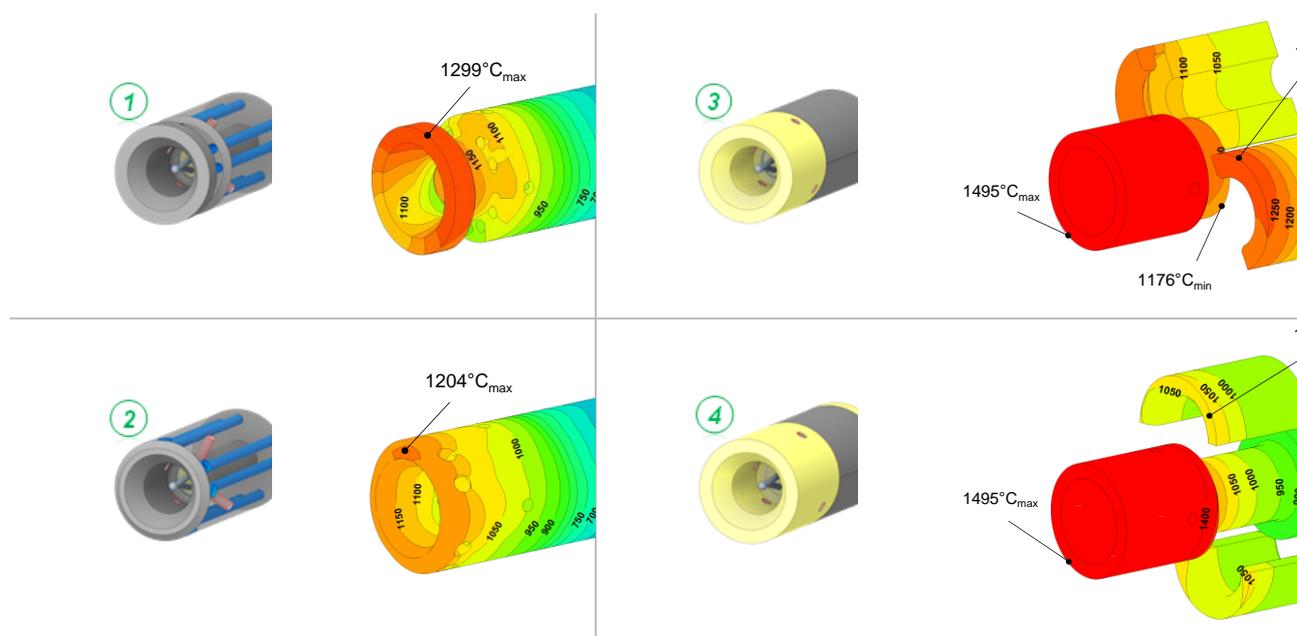


Рис. 7. Сравнение температуры металла

Втулка № 2 — это охлаждаемая втулка с восемью попарно расположенными по окружности втулки отверстиями охлаждения с выпуском воздуха в проточную часть под углом 60° к оси втулки. Данная втулка обеспечивает надежную работоспособность при температуре газа 1500°C . Максимальная температура металла достигается на торце втулки в зоне, равноудаленной от выходов охлаждающих отверстий и достигает 1204°C , оставаясь в диапазоне рабочих температур материала ХН45Ю. Расход воздуха на охлаждение втулки составляет 1.6 г/с, что несущественно при общем расходе на охлаждение сопловой лопатки, превышающем 10 кг/с.

По результатам данной работы были разработаны и изготовлены устройства для измерения полной температуры и давления горячего газа на входе в турбину, которые будут установлены на головном образце турбины ГТЭ-65.1, что позволит подтвердить расчетные характеристики турбины ГТУ, а также провести верификацию расчетных методов, что, в свою очередь, повысит эффективность проектирования новых турбин.

Список использованных источников:

1. Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока (приемники давления и скоростного напора) // Петунин А.Н. — М., «Машиностроение», 1972, 332 с.
2. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». 3-е изд., перераб. // Преображенский В.П. — М., «Энергия», 1978, 704 с.
3. Руководящие технические материалы авиационной техники РТМ 1551-77, 1552-77 Измерение температуры газового потока при стендовых испытаниях ГТД, 1977.

Анализ современных устройств утилизации тепла (УУОТ), работающих на высокотемпературном органическом теплоносителе

Попп А.А., Чемисов В.В.

ПАО ТКЗ «Красный котельщик», Таганрог

Ключевые слова: теплоносители, вода, термическое масло, котлы, эффективность

Key words: heat carriers, water, thermal oil, boilers, efficiency

Современное теплообменное оборудование использует в качестве рабочего тела не только воду, но и другие различные типы теплоносителей.

В статье проводится сравнительный анализ теплофизических характеристик, теплообменного оборудования, экономической эффективности и применимости

оборудования в различных условиях эксплуатации, при использовании различных типов теплоносителей.

Выбор теплоносителя является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность работы котельных установок и теплообменного оборудования.

В статье особое внимание уделяется двум типам теплоносителя — воде и высокотемпературным органическим теплоносителям (ВОТ).

Вода и ВОТ имеют несколько различные теплофизические свойства, которые делают их подходящими для разных задач. Однако, при сравнении указанных теплоносителей следует учитывать не только технические характеристики, но и реальный опыт их применения.

Вода остается одним из самых популярных теплоносителей благодаря своим уникальным свойствам:

- высокая теплоемкость;
- доступность;
- экологичность.

Однако существуют и ограничения:

- Температурные ограничения: для работы на температурах выше 100 °С требуется повышенное давление, что усложняет конструкцию системы.
- Коррозия: вода может вызывать коррозию металлических частей оборудования, что требует применения специальных добавок.

ВОТ представляют собой специальные органические жидкости, предназначенные для работы при высоких температурах (до 350–400 °С). Основные преимущества:

- ВОТ позволяют работать с высокими температурами без необходимости создания высокого давления.
- Современные ВОТ устойчивы к окислению и деградации при длительной эксплуатации.
- Применяются в различных отраслях промышленности, включая химическую, пищевую и текстильную.

Недостатки:

- ВОТ значительно дороже воды.
- При утечках ВОТ возможны экологические риски.
- Требуется регулярный контроль качества масла и замена при необходимости.

Гипотеза: применение ВОТ может быть более эффективным для систем, требующих высоких температур и минимального давления.

Объект исследования: теплоносители для котельных установок и теплообменного оборудования.

Метод исследования: сравнительный анализ теплофизических характеристик воды и ВОТ.

Основной вывод: выбор теплоносителя зависит от конкретных условий эксплуатации. Для систем, требующих высоких температур без повышения давления теплоносителя, ВОТ являются предпочтительным выбором, хотя и более дорогими.

Новизна: исследование предоставляет комплексный анализ характеристик теплоносителей различных типов.

Ценность: полученные результаты помогут использоваться при проектировании и модернизации котельных установок теплообменного оборудования.

Перспективы: разработка новых видов ВОТ может существенно расширить возможности их использования технологий глубокой утилизации тепла и новых видов теплообменного оборудования.

Список использованных источников:

1. Каган С.З., Чечеткин А.В. Органические высокотемпературные теплоносители и их применение в промышленности. — Москва: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1951. — 172 с.
2. Костылев И.И. Петухов В.А. Котельные установки с органическим теплоносителем. — СПб.: ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, 2013. — 104 с.
3. Щербинин С.А., Синьков Д.А. Применение высокотемпературных теплоносителей в теплообменном оборудовании // Вестник АНГТУ. — 2024. — № 18. — С. 167–170.

Улучшения в конструкции клапана срыва вакуума

Порунов А.И.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: клапан срыва вакуума, конструкция, улучшения

Key words: vacuum breaker, structure, improvements

Клапан срыва вакуума является типовым узлом, разработанным в конструкторском бюро, который применяется в каждой гидротурбине для предотвращения большого разряжения в области рабочего колеса.

Целью работы является анализ конструкции типового клапана срыва вакуума, применяемого в КБ и рассмотрение вариантов его конструктивных улучшений. По

выдвинутой гипотезе, такие улучшения должны позволить снизить трудозатраты на производство и монтаж узла, а также повысить его ресурс.

В качестве объекта исследования был выбран клапан срыва вакуума Ø400, ранее применяемый в КБ.

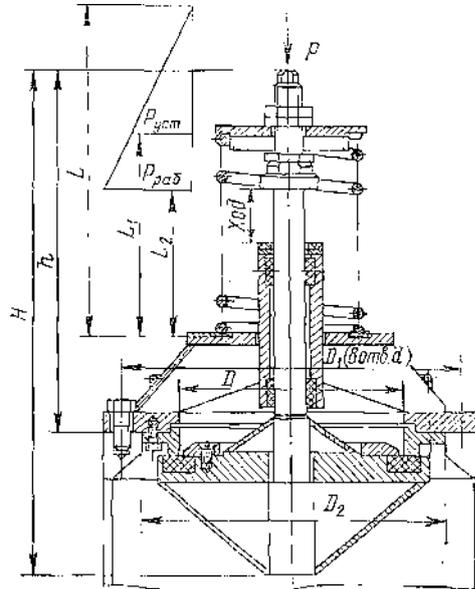


Рис. 1. Пример клапана

В ходе работы был спроектирован типовой клапан с предлагаемыми изменениями с использованием программного комплекса NX/ТС, а также составлена конструкторская документация. Также было проведено изучение возможности закупки материалов, необходимых для рассматриваемых изменений.

По результатам работы изменениям были подвергнуты фильтрующая сетка, а также втулка направляющая.

В изначальной конструкции в качестве фильтрующей сетки использовалась проволока, привариваемая к ребрам и фланцам корпуса. Был проведен поиск варианта, который позволит отказаться от операции сварки, тем самым позволив снизить трудозатраты на изготовление узла. Было принято решение в качестве сороудерживающей решетки использовать покупной лист перфорированный. Использование такого листа в конструкции упрощает монтаж и демонтаж клапана.

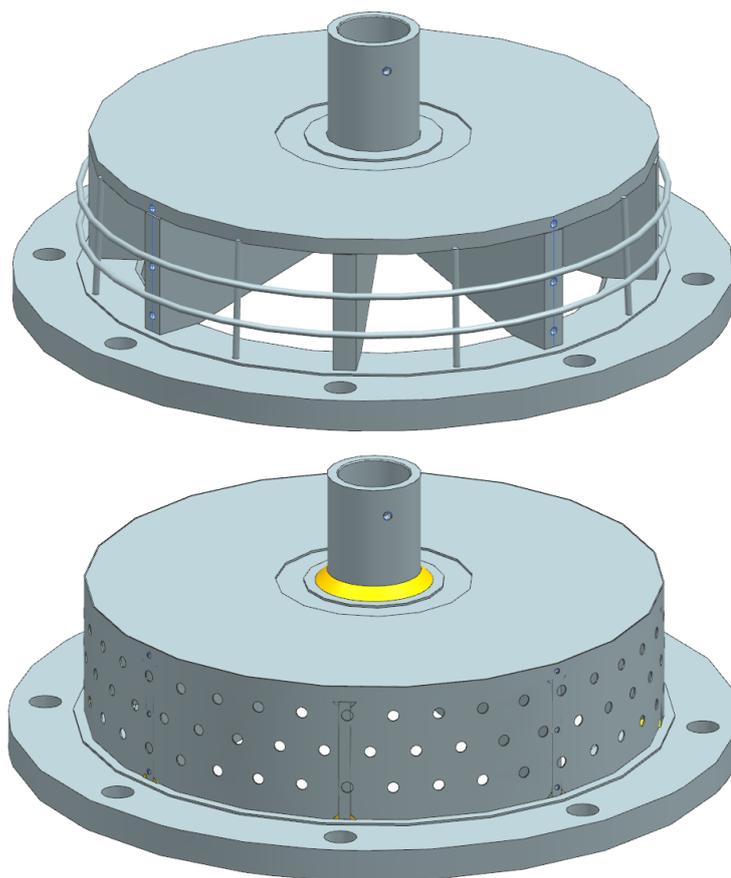


Рис. 2. Варианты исполнения

Также была рассмотрена замена материала втулки направляющей с УСЭК на УГЭТ-4. Решение было принято на основании испытаний антифрикционных материалов в ЦИИ. Данная замена позволит повысить ресурс узла.

Табл. 1 – Данные из испытаний ЦИИ

Марка (материал)	Твердость контргела, НВ	$R_{уд}$, МПа	L, км	Прираб. покрытие	f	ϵL , мкм/км	Разница окр.ср. и контргела - t, оС	Фирма
УСЭК с высокомодульный углеволокном	238	25	5	фторопласт	0,06	3	—	ЦНИИСМ
	256	50	7,5					
УГЭТ-4 (Ф-4Д)	272	25	5,5	Ф-4Д	0,03	4	3	Прометей
	268	50	1,4					

По результатам работы видно, что возможно улучшение типового узла, применяемого в КБ, с учетом использования современных материалов, которые не применялись для клапана ранее. Это позволит компании снизить трудозатраты на производство отдельно взятых деталей, а также повысить качество продукции.

Перспективой является возможность использования модернизированного варианта клапана в будущих проектах КБ.

Решетчатые теплообменные аппараты, изготовленные с помощью аддитивных технологий для газотурбинных установок

Пулин А.Г.

СПбПУ, Санкт-Петербург

Ключевые слова: энергетика, газовые турбины, теплообменные аппараты, турбулизаторы, интенсификация теплообмена

Теплообменные аппараты (ТА) позволяют эффективно использовать теплоту выхлопных газов газовых турбин, снижая топливные затраты и повышая эффективность установки. Конвективный теплообмен, реализующийся в ТА, характеризуется числом Нуссельта, которое представляет из себя отношение между интенсивностью теплообмена за счет конвекции и интенсивностью за счет теплопроводности. Для повышения эффективности теплообмена в ТА применяются турбулизаторы. При оценке качества турбулизатора оценивается отношение числа Нуссельта с ним и без него.

Проводя обзор конструкций классических турбулизаторов в ТА, можно заметить, что большинство турбулизаторов потока обеспечивают отношение $Nu/Nu_{гд}$ в пределах от 0,7 до 2,3 [1–2]. Рассмотрев различные виды турбулизаторов, можно обратить внимание на их простое конструктивное исполнение, зависящее от возможностей технологий изготовления классическими методами (литье, штамповка, сварка, резка металла). С развитием аддитивных технологий стало возможно на этапе проектирования интегрировать более сложные турбулизирующие поверхности непосредственно в конструкцию ТА [3–6]. Такими поверхностями являются решетчатые структуры, которым посвящены многие современные исследования [7–9].

Целью данной работы является исследование влияния решетчатых структур на параметры ТА. Используя решетчатые турбулизаторы в ТА, можно интенсифицировать теплообмен за счет активного размещения слоев рабочего тела и увеличения площади теплообмена, а также улучшить прочность теплообменного аппарата, поскольку данная модификация будет являться ребром жесткости. Так, можно выдвинуть *гипотезу* о том, что

использование решетчатых структур в теплообменных аппаратах положительно скажется на теплообменных и прочностных характеристиках теплообменного аппарата.

Объектом исследования является участок трубчатого теплообменного аппарата типа «труба в трубе». В данный сектор был интегрирован решетчатый турбулизатор, представляющий собой гироидную решетчатую поверхность. На рисунке 1 представлены геометрические модели секторов.

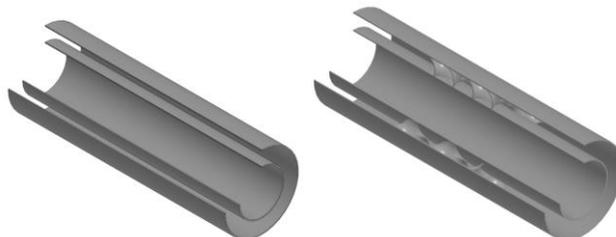


Рис. 1. Геометрические модели секторов теплообменных аппаратов

Задачи исследования: спроектировать участок теплообменника с и без решетчатого турбулизатора, произвести подготовку расчетной модели для произведения сопряженного газодинамического, прочностного и модального расчета и произвести сравнительный анализ теплообменных и прочностных характеристик теплообменников.

При проведении исследования были использованы численные методы. Были произведены газодинамические, прочностные и модальные расчеты в ПО «Ansys 2019 R2». На рисунке 2 представлена блок-схема исследования.

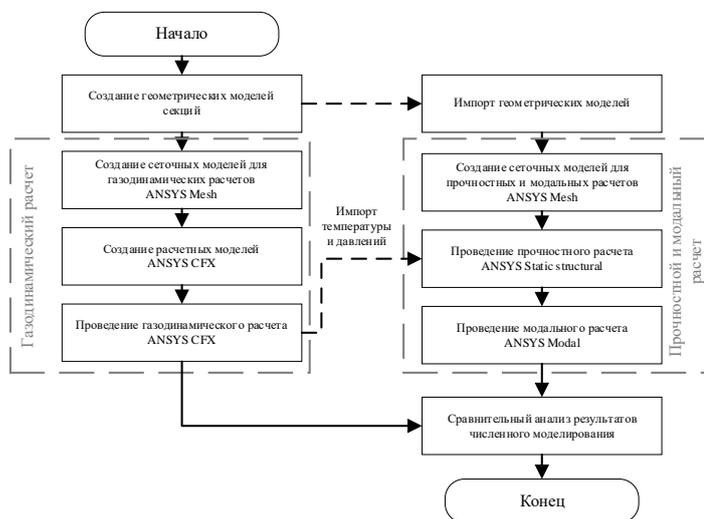


Рис. 2. Геометрические модели секторов теплообменных аппаратов

Расчеты производились при разных числах Рейнольдса (разных скоростях потока) для определения границ, при которых данная модификация наиболее эффективна. Эпюры температур при $Re = 1000$ представлены на рисунке 3.

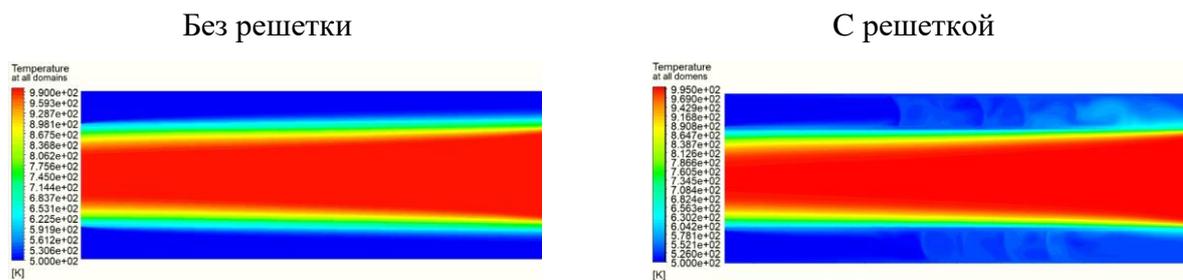
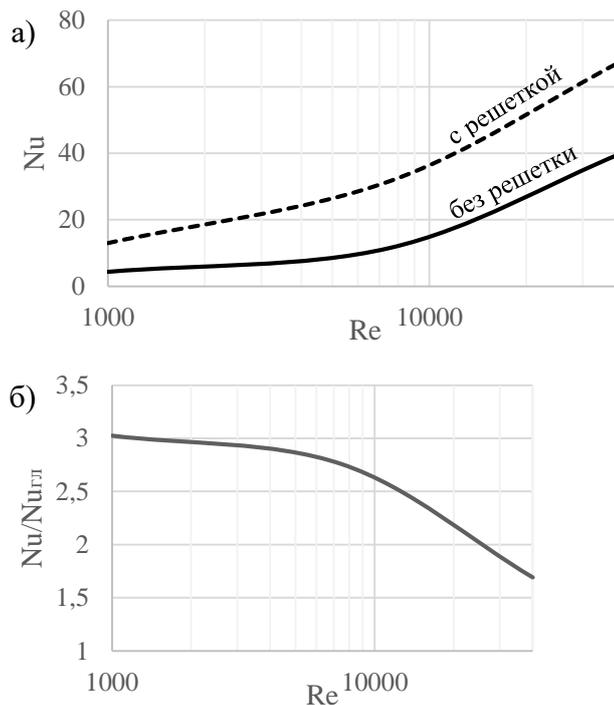


Рис. 3. Эпюра распределения температур в секторах теплообменника

Основные результаты газодинамического расчета представлены на рисунке 4.

Рис. 4. График чисел Nu (а) и график отношения $Nu/Nu_{гр}$ (б) в зависимости от числа Re

Из данных графиков видно, что отношение конвекции к теплопроводности увеличивается до 3,03 раз. В целом на всем диапазоне чисел Рейнольдса показывается прирост интенсивности теплообмена. В сравнении с классическими турбулизаторами потока решетчатая структура показывает себя эффективнее. Однако при этом потери давления в системе куда больше, чем при использовании классических турбулизаторов. Так, при $Re = 1000$, отношение коэффициентов местных потерь давления составляет 5,71. Однако зачастую у турбулизаторов, которые наиболее эффективно влияют на прирост теплообменных характеристик, коэффициенты местных потерь растут значительно быстрее [10]. Из полученных результатов видно, что наиболее высокий прирост конвективного теплообмена за счет добавления решетки-турбулизатора наблюдается при более низких значениях числа Рейнольдса. Прирост коэффициента местных потерь давления при этом растет с увеличением числа Рейнольдса.

Результаты, полученные в ходе исследования статической прочности, и модальный анализ показали, что использование решетчатых конструкций снижает средние эквивалентные напряжения в теплообменнике на 10–20% при интеграции решетчатого турбулизатора. Кроме того, частотный анализ показал значительное увеличение собственных частот модифицированного теплообменника на 86–125%.

По результатам, полученным в процессе исследования, была подтверждена ранее выдвинутая гипотеза. Исследование позволило сделать выводы о повышении интенсивности теплообмена при использовании решетчатых турбулизаторов, также выявлено улучшение прочностных характеристик ТА. Новизна исследования заключается в том, что данные решетчатые структуры малоизучены. Результаты данного исследования позволят разрабатывать принципиально новые ТА для газотурбинных установок, повышая тем самым эффективность, а значит, и экономичность и экологичность энергетических машин. В перспективе данные, полученные в данной работе, позволят использовать их при проектировании теплообменных аппаратов изготовленных с помощью аддитивных технологий.

Список использованных источников:

1. Черняков Л.А., Гаврилов Т.А. Экспериментальное исследование влияния турбулизации жидкости на параметры теплообменника // Учетные записки петрозаводского государственного университета. 2014.
2. Горобец В.Г. Сравнительный анализ теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучков труб с оребрением различного типа. Киев: Изд-во Института технической теплофизики НАН Украины, 2006. 5 с.
3. Bioprotece and Fit 3D make significant strides in custom prosthesis production with Eplus 3D's latest printer [Электронный ресурс]. URL: <https://www.etmm-online.com/bioprotece-and-fit-3d-make-significant-strides-in-custom-prosthesis-production-with-eplus-3ds-latest-printer-a-c7ea1f2d2d9647b2a4fb137316f02c4d/> (Дата запроса: 19.02.2024).
4. Anton du P. [и др.]. Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review // Prog Mater Sci. 2022. Изд. 125.
5. Попович А.А. Перспективные материалы и технологии аддитивного производства. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. Vol. 1. 346 с.
6. Fei C. [и др.]. Heat transfer efficiency enhancement of gyroid heat exchanger based on multidimensional gradient structure design // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2023. Изд. 149.

7. Kirttayoth Y. [и др.]. Turbulent Flow Heat Transfer and Thermal Stress Improvement of Gas Turbine Blade Trailing Edge Cooling with Diamond-Type TPMS Structure // Aerospace. 2023. Изд. 11, № 1.
8. Ahmet D., Melih C., Feridun K. An innovative methodology to design gyroid heat exchangers for metal additive manufacturing // International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry. 2023. Vol. 7, № 3.
9. Dalia M. [и др.]. Enhancement of heat exchanger performance using additive manufacturing of gyroid lattice structures // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Изд. 126, № 3.
10. Дрейцер Г.А. О некоторых проблемах создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // Московский авиационный институт (государственный технический университет). Новости теплоснабжения. 2004. Изд. 5.

**Разработка асинхронного двигателя с массивным ротором с применением сплавов
с высокой электропроводностью
Раднаев А.Б.**

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: асинхронный двигатель, массивный ротор, короткозамкнутый ротор

Key words: induction motor, massive rotor, squirrel-cage rotor

В настоящее время из-за низких энергетических показателей в рабочих режимах асинхронные двигатели с массивным ротором имеют ограниченное распространение. Несмотря на ухудшение энергетических характеристик (коэффициент полезного действия, коэффициент мощности) двигатели с массивным ротором из стали с высокой электропроводностью и низкой магнитной проводимостью могут найти широкое применение, в приводах, где предъявляются требования к механической прочности ротора, а благодаря практическому отсутствию пульсаций вращающего момента в приводах специального назначения с высокими требованиями по виброшумовым характеристикам [1]. Другими преимуществами ротора такого типа являются простота в изготовлении, что способствует повышению технологичности конструкции, и высокая надежность ротора (отсутствие паяных соединений и термомеханических напряжений).

Цель работы — разработка асинхронного двигателя с массивным ротором с применением современных сплавов с высокой электропроводностью, подбор материала и конструкции ротора с целью повышения энергетических и эксплуатационных характеристик двигателя.

Объект работы асинхронный двигатель с массивным ротором с применением сплавов с высокой электропроводностью.

Расчет АД с массивным ротором выполнен методом численного моделирования. В качестве материала для ротора рассматривались стали типа CF-25, CF-8, CM-20, CM-25 и медь.

Основной несущий материал массивного ротора (рис. 1) состоит из вала из стали Ст-3, на поверхности которого размещена гильза из сплава обладающей высокой электропроводностью.

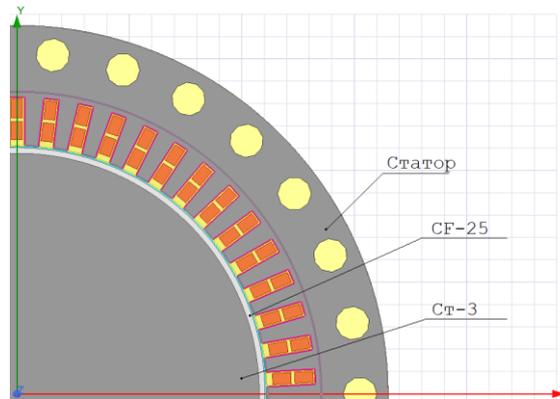


Рис. 1. Модель АД с массивным ротором

Результаты моделирования при различной ширине гильзы приведены в табл. 1

Табл. 1. Характеристики двигателя при различной толщине гильзы

bk, мм	I_{ϕ} , А	$\cos\phi$	М, кН·м	n, об/мин	Потери в роторе, кВт	s, %
20	495,4	0,702	2,71	983	13,3	1,7
17,5	484,9	0,717	2,71	982,2	13,1	1,78
15	476,4	0,729	2,71	981	12,9	1,9
12,5	470,6	0,737	2,71	979,2	13	2,08
10	466,6	0,74	2,71	976,8	13,4	2,32
7,5	466,8	0,738	2,7	973,2	14,1	2,68
5	473,7	0,729	2,7	967,4	15,5	3,26

С целью улучшения рабочих характеристик иногда внешнюю поверхность массивного стального ротора покрывают медью, применяют медные кольца, прикрепленные к торцевым поверхностям массивного ротора [2]. Дополнительно выполнен расчет асинхронного двигателя с массивным ротором с покрытием поверхности ротора слоем меди. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Табл. 2. Характеристики двигателя с омедненным ротором

bk, мм	I_{ϕ} , А	$\cos\phi$, о.е.	М, кН·м	n, об/мин	Потери в роторе, кВт	s, %
5	531,2	0,646	2,7	987,2	14,8	1,28

3,5	501,6	0,683	2,7	983,8	16,6	1,62
2	484,3	0,71	2,7	977,1	22,1	2,29

Сравнение двигателя с короткозамкнутым ротором и его аналогом с применением гильзы из высокопроводящего сплава и с покрытием поверхности ротора слоем меди при сопоставимых скольжениях (при ширине кольца 15 мм) приведено в таблице 3.

Табл. 3. Сравнительные данные

Параметр	Короткозамкнутый ротор	Массивный ротор с высокопроводящей гильзой	Массивный ротор с омеднением
Коэффициент мощности, о. е.	0,86	0,73	0,7
Ток статора, А	394	476,4	484
Сумма потерь в роторе, кВт	8	12,9	16,6
Кратность пускового момента, о. е.	1,2	1,7	–
Кратность пускового тока, о. е.	5,4	4,6	–

Применение массивного ротора приводит к ухудшению энергетических характеристик в сравнении с короткозамкнутым ротором — снижению коэффициента мощности двигателя, увеличению потерь в обмотке статора и суммарных потерь в роторе, в то же время двигатель с массивным ротором обладает лучшими пусковыми характеристиками.

Исходя из результатов расчета массивного ротора с медным цилиндром на поверхности (табл. 3) применение стали с высокой электропроводностью является более предпочтительным по всем показателям.

Список использованных источников:

1. Нейман Л. Р.: поверхностный эффект в ферромагнитных телах. — Ленинград; Москва: Изд-во Госэнергоиздат, 1949. — 190 с.
2. Куцевалов В.М: вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. – Москва; Ленинград: Изд-во Энергия, 1966. — 304 с.

Разработка технологии выборочного низкотемпературного упрочнения поверхности штока клапана из материала 15X11МФ

Родькина Д.Д.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: низкотемпературное азотирование, профиль глубины твердости, мартенситная нержавеющая сталь

Key words: low-temperature nitriding, hardness depth profile, martensitic stainless steel

Цель работы/исследования:

Исследование влияния процесса низкотемпературного азотирования на твердость, структуру и коррозионные свойства стали 15X11МФ и сравнение свойств, получаемых по штатной технологии и получение повторяемости значений по твердости.

Методы работы/исследования:

1. Подбор и подготовка образцов

Для исследования будут использованы образцы из жаропрочной стали 15X11МФ мартенситного класса, подготовленные в соответствии стандартам. Подготовка включает механическую обработку, шлифовку и полировку, что позволит минимизировать влияние поверхностных дефектов на результаты исследования.

2. Исследование структуры и свойств исходного материала

Перед проведением низкотемпературного азотирования необходимо провести анализ микроструктуры и механических свойств исходного материала. Для этого будут применяться следующие методы:

- Металлографический анализ: исследование микроструктуры образцов с использованием оптической микроскопии структуры и балла зерна.
- Испытания на твердость: определение твердости образцов с использованием метода Виккерса или Роквелла для установления исходного уровня твердости.

3. Технология азотирования

Основной метод поверхностного упрочнения, применяемый в данном исследовании — низкотемпературное азотирование. Процесс будет осуществляться в контролируемой атмосфере с использованием различных температурных режимов и временных интервалов. Для достижения требуемой твердости (≥ 650 HV) и глубины упрочненного слоя (0,2–0,3 мм) будут фиксироваться следующие параметры:

- Температура азотирования: определение оптимального температурного диапазона для достижения необходимого уровня диффузии азота.

- Время обработки: изучение влияния времени азотирования на глубину упрочненного слоя и твердость.

- Состав атмосферы: использование различных газовых смесей (например, N₂, NH₃) для оптимизации процесса.

- Подбор методов активации поверхности.

4. Анализ результатов

После завершения процесса азотирования образцы будут подвергнуты анализу с использованием следующих методов:

- Шлифподготовка.

- Металлографический анализ: повторное исследование микроструктуры для оценки изменений, произошедших в результате азотирования.

- Испытания на твердость: повторное измерение твердости для определения достигнутых значений и глубины упрочненного слоя.

- Испытания на усталостные свойства: проведение испытаний на усталость для оценки долговечности и надежности упрочненных образцов.

Результаты будут сопоставлены с существующими стандартами и требованиями к материалам, а также с результатами, получаемыми по штатной технологии, используемой в производстве штоков клапанов в АО «Силовые машины».

Гипотеза работы/исследования:

в рамках исследования выдвигается гипотеза о том, что применение низкотемпературного азотирования приведет к более стабильным и повторяемым значениям твердости по сравнению с применяемой на производстве технологией азотирования.

Это связано с тем, что низкотемпературное азотирование обеспечивает более контролируемую диффузию азота в структуру мартенситной стали 15X11МФ, что способствует формированию однородного упрочненного слоя с минимальными термическими деформациями и изменениями микроструктуры.

В частности, предполагается:

- Контроль температуры: низкотемпературный режим позволяет избежать перегрева и последующего распада мартенситной структуры, что может происходить при более высоких температурах, приводя к неоднородности свойств.

- Оптимизация времени обработки: более длительное время азотирования при низких температурах может способствовать равномерному распределению азота в упрочняемом слое, что, в свою очередь, улучшает механические свойства и повышает твердость.

• Состав атмосферы: использование различных газовых смесей в процессе низкотемпературного азотирования может дополнительно оптимизировать процесс, обеспечивая более высокую степень насыщения стали азотом и, как следствие, улучшение твердости.

Объект работы/исследования:

объектом данного исследования является жаропрочная мартенситная сталь 15X11МФ, используемая для производства штоков клапанов. Исследование сосредоточено на анализе влияния процесса низкотемпературного азотирования на механические свойства, микроструктуру и коррозионные характеристики данного материала, а также на сравнении этих свойств с результатами, полученными по штатной технологии азотирования.

Задачи работы/исследования:

разработка технологии для низкотемпературного упрочнения жаропрочной мартенситной стали 15X11МФ.

Проведение экспериментальных испытаний технологии низкотемпературного азотирования на образцах.

Сравнительный анализ полученных результатов между предлагаемой технологией и штатной.

Результаты работы/исследования:

предполагается достижение повторяемости требуемой прочности 15X11МФ, сохранение и возможно повышение коррозионной стойкости материала.

Основные выводы по проделанной работе/исследованию:

разработанная технология упрочнения может быть внедрена в производство для достижения повторяемости требуемых характеристик.

В чем состоит новизна и оригинальность работы/исследования:

впервые предложена технология выборочного низкотемпературного упрочнения для данного типа материала, что открывает новые возможности для повышения эксплуатационных характеристик.

Ценность работы/исследования для компании:

внедрение разработанной технологии в компании позволит снизить затраты на перепроизводство штоков клапанов из материала 15X11МФ,

Перспектива использования результатов работы/исследования в компании:

результаты исследования могут быть применены для разработки новых изделий и улучшения существующей технологии, также имеется перспектива применения технологии для других марок сталей, что повысит конкурентоспособность компании на рынке.

Список использованных источников:

Somers, M. A. J Gaseous surface hardening of martensitic stainless steels // European Conference on Heat Treatment, 12/13 April 2018 – pp. 118-124.

Christiansen, T. L. and Somers, M. A. J. (2013) ‘Low-Temperature Surface Hardening of Stainless Steel’, *Advanced Materials & Processes*, (November-December), pp. 52–53.

Christiansen, T. L. and Somers, M. A. J. Gaseous processes for low temperature surface hardening of stainless steel, pp. 581 – 614.

Новые применения реактивной синхронной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора на примере системы электродвижения судна**Розбицкий Г.Г.**

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: реактивная синхронная машина, анизотропная магнитная проводимость, преобразователь частоты, активный выпрямитель, управление, затраты машинного времени.

Key words: synchronous reluctance machine, anisotropic magnetic conductivity, frequency converter, active front end rectifier, calculation, control, machine time costs.

Области применения реактивных синхронных машин (РСМ) обычно ограничиваются приводами насосов и вентиляторов, имеющих сравнительно спокойную нагрузку. В данной работе рассмотрена целесообразность применения РСМ в системе электродвижения (СЭД) судна, в которой возможны быстрые изменения нагрузки, например, реверсы гребного винта (ГВ). Математическое описание СЭД выполнено по методологии расчета сложных систем по подсистемам, взаимосвязанным зависимыми источниками напряжения и тока [1]. Модели ориентированы на использование на персональных ЭВМ средней производительности, что обеспечено применением быстродействующих алгоритмов вычислений [2].

Рассмотрены варианты силовых схем СЭД с РСМ и различными преобразователями частоты (ПЧ). В варианте рис. 1 а) СЭД выполнена с активным выпрямителем (АВ). В другом варианте в СЭД вместо АВ использован диодный выпрямитель (ДВ), схема которого представлена на рис. 1 б). СЭД содержат силовые устройства и блоки системы управления (СУ).

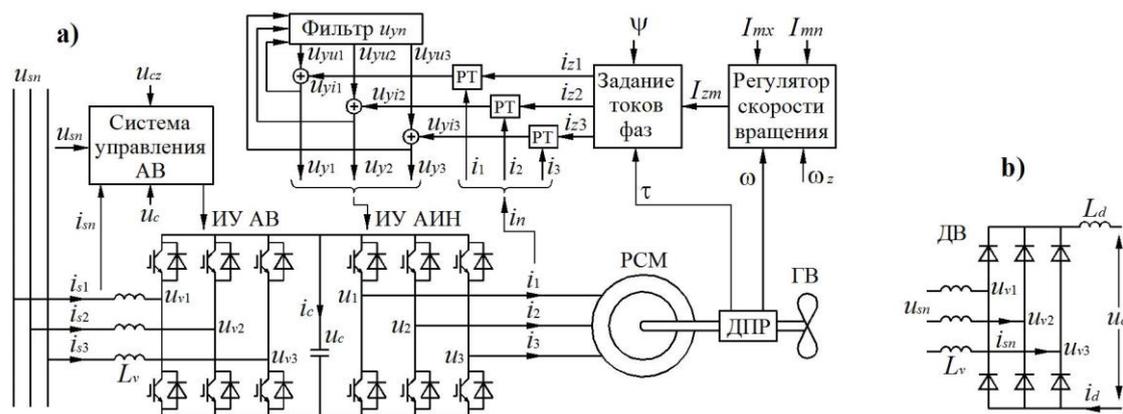


Рис. 1. СЭД судна с РСМ и активным ПЧ

СЭД варианта 1 содержит следующие устройства: транзисторный ПЧ с АВ и автономным инвертором напряжения (АИН), РСМ с датчиком положения ротора (ДПР), СУ АВ и АИН. На валу РСМ имеется ГВ. На входе АВ есть реактор с индуктивностями L_v . В АВ и АИН выпрямленное напряжение u_c фильтруется конденсатором C . Питание ПЧ осуществляется от электросети с напряжением u_{sn} ($n=1, 2, 3$). Напряжения фаз АВ u_{vn} , токи i_{sn} . Напряжения фаз РСМ u_n , токи i_n . СУ АВ обеспечивает стабилизацию выпрямленного напряжения на заданном уровне u_{cz} , форму токов фаз АВ, близкую к синусоидальной, заданный коэффициент мощности потребляемой электроэнергии, а также реверс активной мощности. СУ АВ формирует импульсы управления (ИУ) транзисторами АВ.

СУ АИН обеспечивает регулирование РСМ. От ДПР в СУ АИН поступают сигналы по угловому положению ротора τ и по фактической частоте вращения ω . В регулятор скорости вращения ротора поступает также сигнал по заданной частоте вращения ω_z . На выходе этого регулятора формируется сигнал по заданной амплитуде токов фаз РСМ I_{zm} при ограничениях ее положительным и отрицательным уровнями I_{mx} и I_{mn} . В соответствии с параметрами τ и I_{zm} , а также с заданным углом сдвига вектора тока относительно поперечной оси ротора ψ вычисляются заданные токи фаз i_{zn} . Трехфазная система токовых составляющих u_{yn} напряжений управления АИН u_{yn} формируется П-регуляторами тока (РТ) в каждой фазе.

Для устранения статических ошибок в СУ АИН использован трехфазный фильтр, на выходе которого формируется трехфазная система составляющих напряжений основной частоты u_{yn} , которые затем складываются с токовыми составляющими. Алгоритмы работы СУ более подробно описаны в публикации [1].

Математическое описание ПЧ выполнено с учетом времени переключения транзисторов. В модели РСМ учтены вид шихтовки железа ротора, различие активных сопротивлений и индуктивностей контуров ротора по продольной и поперечной осям, доли потерь в железе ротора и статора. Проверка правильности описания РСМ выполнена на моделях РСМ [3]. В ANSYS Maxwell рассчитаны установившиеся режимы РСМ. Аналогичные

расчеты выполнены в ComSim. По многим параметрам РСМ различия результатов не превышают 1%.

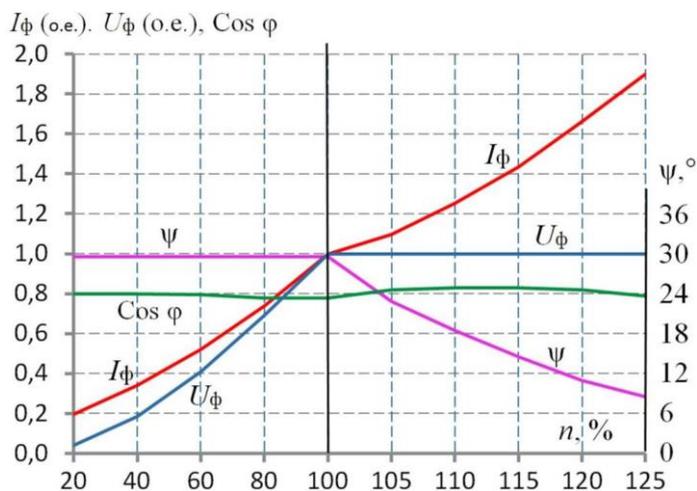


Рис. 2. Характеристики РСМ при регулировании частоты

Предложен новый алгоритм регулирования РСМ в СЭД, при котором в зоне пониженных частот вращения РСМ работает с постоянным углом ψ , а при повышенных частотах напряжение статора U_ϕ ограничивается путем уменьшения угла ψ . Зависимости переменных РСМ от частоты n построены на рис. 2 (I_ϕ — фазный ток статора РСМ, $\cos \varphi$ — коэффициент мощности).

Рассмотрены аномальные и аварийные режимы работы СЭД, возникающих при перемодуляции напряжений управления АИН. Для исключения перемодуляции и предотвращения аварий предложено в зоне повышенных частот вращения ГВ стабилизировать амплитуду напряжений управления АИН путем изменения угла ψ .

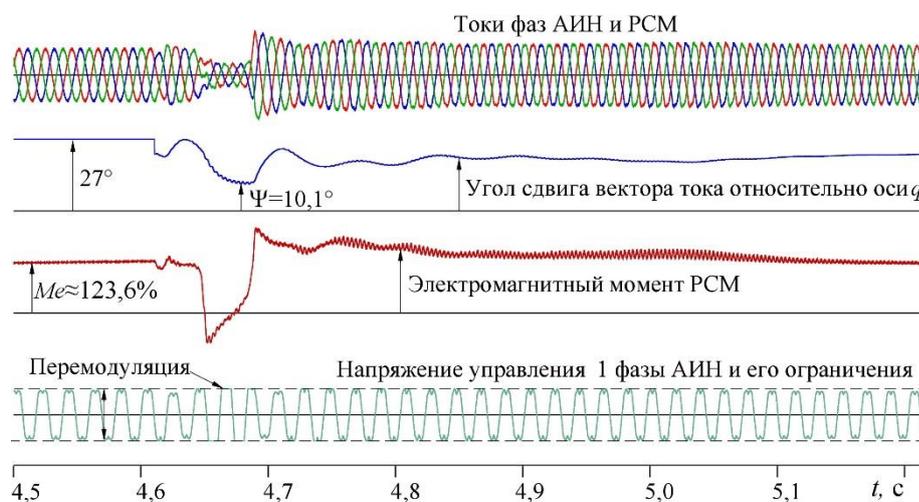


Рис. 3 Фрагмент процесса пуска РСМ с аномальным выходом на установившийся режим работы

Один из результатов расчета аномального режима работы СЭД при увеличении коэффициента П-регулятора в полтора раза представлен на рис. 3. В рассмотренном случае

привод все-таки перешел в нормальный режим работы. Но переход от пуска к установившемуся режиму оказался связан со значительными колебаниями токов и электромагнитного момента. Такой режим работы отнесен к аномальным режимам.

При применении АВ нейтрализуется влияние на электромагнитные процессы глубоких провалов напряжения электросети СЭД путем стабилизации выпрямленного напряжения.

При использовании ДВ провалы напряжения сети могут привести к перемодуляции напряжений управления АИН. Но в этом случае можно стабилизировать амплитуду напряжений управления АИН путем воздействия на угол ψ РСМ.

Разработанные модели РСМ и алгоритмы управления предполагается использовать также в других установках, например, в ветроэлектрических.

К новизне работы можно отнести новую область применения РСМ.

К научной новизне работы можно отнести математическое описание СЭД с РСМ, разработку алгоритмов управления РСМ в СЭД, разработку комплекса компьютерных моделей СЭД с РСМ, результаты исследований СЭД с РСМ.

Предполагается, что выявленная новая область применения РСМ позволит расширить номенклатуру изделий АО «Силовые машины».

Список использованных источников:

1. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам / СПб., изд-во «Ладoga», 2020, 336 с.
2. Воронцов А.Г. Развитие методологии моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам и комплекс моделей в ComSim / Известия СПбГЭТУ, 2022, № 3, С. 57–65.
3. Пронин М.В., Григорян А.С., Чесноков Г.А., Воронцов А.Г. Моделирование реактивной синхронной машины с анизотропной проводимостью ротора в ANSYS и по методологии взаимосвязанных подсистем / Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019, № 3, С. 72–77.

**Особенности применения реактивных синхронных
машин в ветроэлектрических установках
Розбицкий Г.Г.**

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: реактивная синхронная машина, анизотропная магнитная проводимость, преобразователь частоты, активный выпрямитель, управление, затраты машинного времени.

Key words: synchronous reluctance machine, anisotropic magnetic conductivity, frequency converter, active front end rectifier, calculation, control, machine time costs.

В ветроэлектрических установках (ВЭУ) с синхронными генераторами на постоянных магнитах при сильном ветре и увеличении частоты вращения ветроколеса (ВК) возрастает напряжение обмотки статора генератора. ВЭУ этого типа пожароопасны.

В ВЭУ с асинхронизированными генераторами надежность системы снижена из-за наличия в роторе контактных колец. Необходимы дополнительные затраты на обслуживание.

В данной работе рассматриваются новые технические решения по построению ВЭУ с реактивными синхронными машинами (РСМ) с анизотропной магнитной проводимостью [1]. Ротор РСМ выполняется с постоянными магнитами (ПМ) или без ПМ. Трудоемкость обслуживания ВЭУ снижена, так как у РСМ нет контактных колец. Если в РСМ для начального возбуждения машины используются ПМ, то на холостом ходу при сильном ветре им соответствует пониженное напряжение статора — пожароопасность системы также снижена.

Одна из возможных схем ВЭУ при выполнении РСМ без ПМ представлена на рис. 1. ВЭУ содержит ВК, редуктор Р, РСМ, преобразователь частоты ПЧ с активным выпрямителем АВ и транзисторным инвертором АИН, трансформатор Тр. В звене выпрямленного напряжения ПЧ имеется конденсатор С и аккумуляторная батарея АВ, предназначенная для начального возбуждения генератора (в случае его выполнения без ПМ).

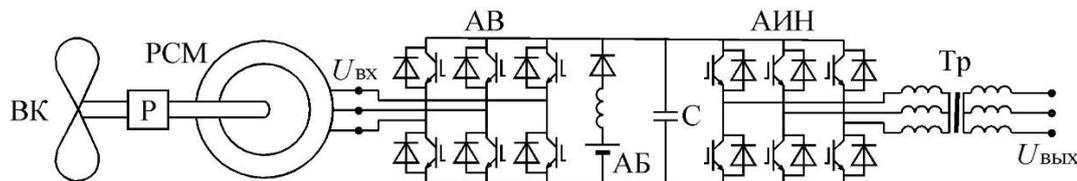


Рис. 2. ВЭУ с низковольтными РСМ и ПЧ

В системе рис. 1 АИН и Тр обеспечивают на выходе ВЭУ трехфазную систему напряжений со стандартными параметрами частоты и действующего значения. При переменной частоте вращения ВК и ротора РСМ АВ поддерживает на выходе

стабилизированное постоянное напряжения. При этом пониженной частоте вращения ВК соответствует некоторая допустимая форсировка токов фаз РСМ и АВ, повышенным частотам вращения ВК соответствуют пониженные величины токов фаз.

Разработаны алгоритмы векторного управления РСМ, АВ и ВЭУ в целом. Выполнены компьютерные модели РСМ, работающих на трехфазную систему регулируемых напряжений, а также модели ВЭУ с РСМ и ПЧ. Математическое описание РСМ и устройств ПЧ выполнено по методологии расчета сложных систем по подсистемам, взаимосвязанным зависимыми источниками напряжения и тока [1]. Указанный подход к моделированию обеспечивает минимизацию затрат машинного времени на расчеты. В частности, при шаге расчета процессов в РСМ 2 мкс электромеханический переходный процесс длительностью 20 с рассчитывается за 15 с на персональной ЭВМ средней производительности.

При математическом описании РСМ использованы ее схема замещения, представленная на рис. 2. РСМ представлена в виде ряда подсхем, связанных зависимыми источниками напряжения и тока. В подсхемах использованы обозначения: неподвижные оси α и β ; вращающиеся оси: продольная d и поперечная q ; частота вращения ротора ω ; угол поворота ротора τ ; индуктивности намагничивания по осям dq L_{ad} , L_{aq} ; индуктивности рассеяния контуров ротора L_{kd} , L_{kq} ; активные сопротивления контуров ротора R_{kd} , R_{kq} ; индуктивности рассеяния и активные сопротивления фаз статора L_s и R_1 ; токи, напряжения и ЭДС фаз i_n , u_n и e_n ($n=1,2,3$); ЭДС и активные сопротивления, учитывающие потери энергии в стали статора e_α , e_β , R_μ . На рис.2 указано расположение ПМ по оси q с полюсами N и S , при вращении ротора ПМ создают ЭДС по оси d и источник тока i_{md} . При отсутствии ПМ в РСМ $i_{md}=0$.

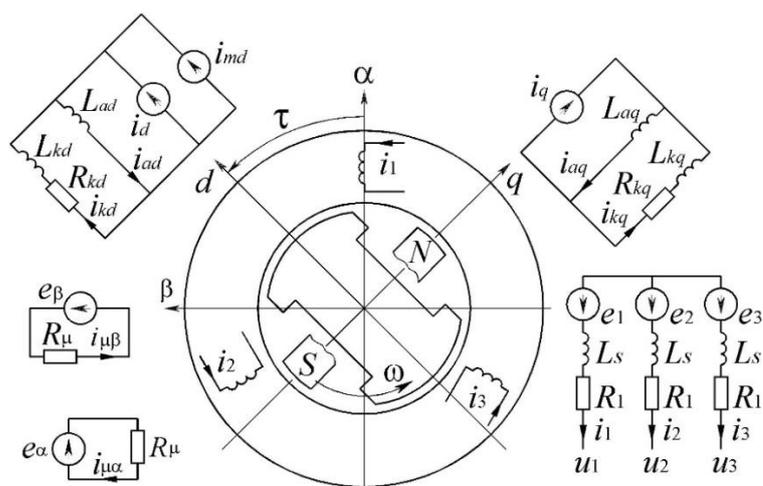


Рис. 3. Схема замещения РСМ с ПМ

Математическое описание РСМ выполнено по аналогии с описанием синхронных машин традиционного исполнения [1]. Компьютерные модели систем с РСМ разработаны на

языке C++. В моделях реализовано двухзонное векторное управление, позволяющее поддерживать заданное напряжение статора в заданном диапазоне частот вращения ВК.

Некоторые расчеты выполнены для ВЭУ с РСМ мощностью 500 кВт напряжением 660 В. Машина разработана в АО «Силовые машины» для применения в режиме двигателя, параметры определил Чесноков Г.А. при расчетах с использованием ANSYS [3]. Машине свойственны значительные различия индуктивностей намагничивания по продольной и поперечной осям и значительная их зависимость от тока, а также от сдвига вектора тока относительно поперечной оси машины. Эта машина в ВЭУ работает генератором.

На рис. 3 представлена диаграмма изменения параметров РСМ при ее включении и последующем регулировании параметров с выходом на мощность нагрузки 500 кВт при напряжении фаз 400 В. Как видно из рис. 3, при пониженной частоте вращения ВК обеспечивается напряжение статора, близкое к номинальному за счет увеличения токов фаз, а также за счет изменения фазы вектора токов относительно поперечной оси ротора — угла

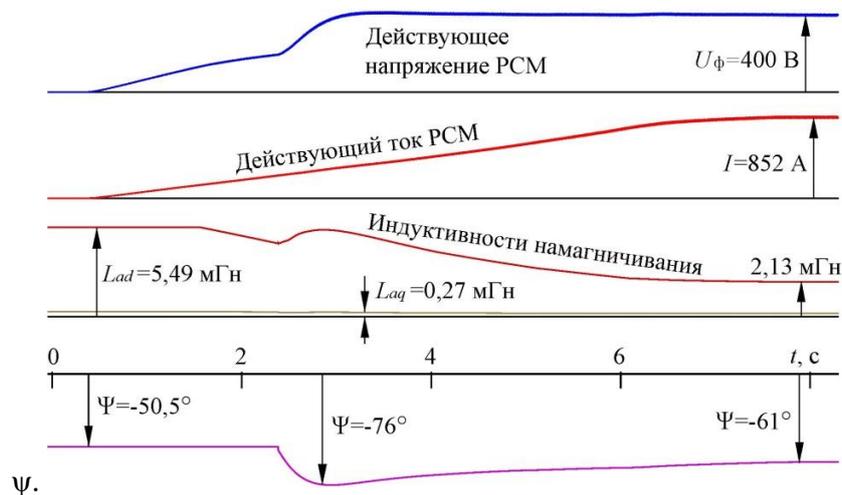


Рис. 4. Включение РСМ при скорости ВК 80%

В рассматриваемом переходном процессе в РСМ существенно изменяются индуктивности намагничивания. В модели РСМ эти изменения учтены при использовании сплайн-аппроксимации кривых. Рассчитаны режимы работы РСМ при других мощностях и частотах.

Разработанные модели РСМ и алгоритмы управления предполагается использовать также в ВЭУ с высоковольтными ПЧ (каскадными, модульными многоуровневыми и др.).

К новизне работы можно отнести новую область применения РСМ.

К научной новизне работы можно отнести математическое описание ВЭУ с РСМ с ПМ и без ПМ, разработку алгоритмов управления РСМ в ВЭУ, разработку комплекса компьютерных моделей ВЭУ с РСМ, результаты исследований ВЭУ с РСМ.

Описанные исследования проводятся в связи с выполняемой в АО «Силовые машины» НИОКР «Разработка РКД ВЭУ 5,3 МВт».

Предполагается, что выявленная новая область применения РСМ позволит расширить номенклатуру изделий АО «Силовые машины».

Список использованных источников:

1. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Хомяк В.А., Хайров Д.А. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016.

2. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам // СПб., изд-во «Ладога», 2020 г. — 336 с.

3. Пронин М.В., Григорян А.С., Чесноков Г.А., Воронцов А.Г. Моделирование реактивной синхронной машины с анизотропной проводимостью ротора в ANSYS и по методологии взаимосвязанных подсистем / Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. — № 3. С. 72–77.

Анализ влияния различных факторов на значения крутильных частот и результаты расчета на внезапное короткое замыкание турбины ПТ-60-130/13

Савиковский А.В.

АО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: крутильные частоты, внезапное короткое замыкание, ANSYS, валопровод, генератор.

Keywords: torsional frequencies, sudden electrical short, ANSYS, shaft line, generator.

Одной из основных задач при расчете валопровода паровой турбины на прочность является расчет при аварийном режиме — внезапном коротком замыкании (ВКЗ) [1]. Объектом исследования является валопровод паровой турбины ПТ-60-130/13, которая модернизирована на основе типовой турбины ПТ-60-130 с модификацией ротора высокого давления (РВД). При проектировании исходной конструкции турбины в нормативных документах не было требований по отстройке крутильных частот. Это может приводить к наличию крутильной частоты, близкой к 50 Гц, что необходимо учитывать при модернизации «старых» турбин.

Целью работы является анализ влияния различных факторов (жесткости соединения роторов, а также характеристик генераторов) на крутильные частоты и результаты расчета на ВКЗ валопровода. Гипотезой работы является то, что моделирование насадных муфт РВД-

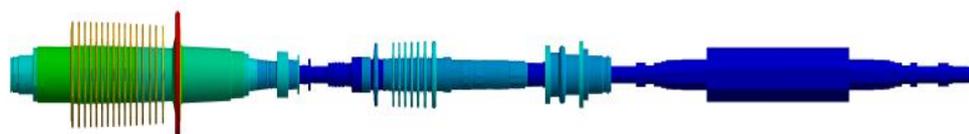
РСНД, а также РСНД-РГ слабо влияет на значения крутильных частот, а электромагнитный момент ВКЗ влияет сильнее, чем момент инерции генератора на результаты расчета ВКЗ.

Новизной исследования является анализ влияния жесткости соединения роторов на крутильные частоты, а также анализ характеристик генератора на результаты расчета ВКЗ.

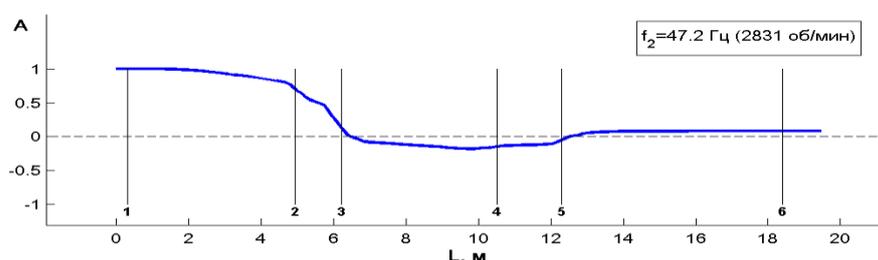
Задачами исследования являются:

- а) построение упрощенной балочной модели валопровода в ПО Matlab и ее верификация на основе осесимметричной твердотельной модели в ПО ANSYS;
- б) расчет крутильных частот и расчет на ВКЗ исходной геометрии валопровода;
- в) анализ влияния жесткости соединения РВД-РСНД, а также жесткости соединения РСНД-РГ (насадные муфты или цельнокованные фланцы) на крутильные частоты;
- г) анализ влияния момента инерции турбогенератора и его электромагнитного момента (э/м) на результаты расчета внезапного короткого замыкания валопровода.

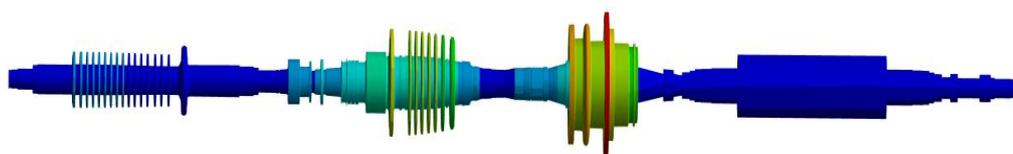
Для расчета осесимметричной модели в ПО ANSYS использовался метод конечных элементов; для расчета в ПО Matlab сначала вычислялись крутильные частоты и потом проводился расчет на ВКЗ методом разложения по собственным формам [2]. Расчет крутильных частот и расчет на ВКЗ проводился согласно РТМ [3], при этом допустимый коэффициент запаса при расчете на ВКЗ принимался 1.35. В целях верификации балочной модели проводилось сравнение крутильных частот осесимметричной модели в ANSYS и балочной модели в Matlab. Результаты сравнения крутильных частот, близких к частоте сети и двойной частоте сети (50 Гц и 100 Гц), приведены на рис. 1.



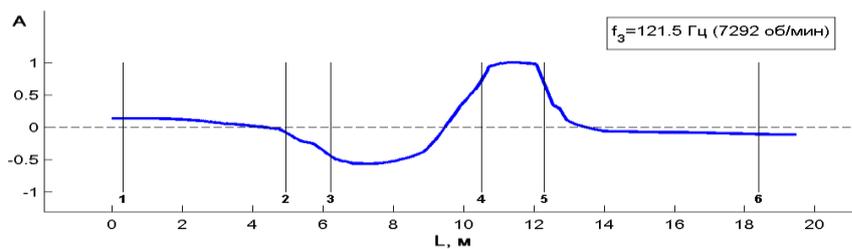
2 крутильная частота, ANSYS: 47.6 Гц



2 крутильная частота, Matlab: 47.2 Гц



3 крутильная частота, ANSYS: 127.3 Гц



3 крутильная частота, Matlab: 121.5 Гц

Рис. 1. Сравнение крутильных частот балочной модели и модели в ПО ANSYS.

Результаты сравнения моделей показывают адекватность и корректность построенной в ПО Matlab балочной модели по сравнению с исходной моделью в ANSYS.

При расчете существует проблема моделирования жесткости соединения роторов с насадными деталями. Поэтому анализировалось влияние жесткости соединения роторов РВД-РСНД, а также РСНД-РГ на значение крутильной частоты около рабочей частоты вращения 3000 об/мин и потому сравнивались данные крутильные частоты для 3 вариантов моделей ANSYS: а) цельнокованные фланцы РВД-РСНД и РСНД со стороны РГ, б) цельнокованные фланцы РВД-РСНД, насадные муфты соединения РСНД-РГ, в) насадные муфты соединений РВД-РСНД и РСНД-РГ. Насадные муфты моделировались путем частичного их контакта с валом. Результаты расчета крутильной частоты около частоты сети (50 Гц) приведены в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение 3-х вариантов моделей ANSYS.

	цельнокованные фланцы РВД-РСНД и РСНД-сторона РГ	цельнокованные фланцы РВД-РСНД, насадная муфта РСНД-РГ	2 насадные муфты РВД-РСНД и РСНД-РГ
Значение крутильной частоты, Гц	49.0	48.2	47.6

Для последующих расчетов был выбран вариант с 2 насадными муфтами и для него анализировалось влияние момента инерции ротора генератора и величина э/м ВКЗ генератора на результаты расчета ВКЗ: а) с генератором ТВФ-60-2 и э/м ВКЗ для ТВФ-60-2, б) с генератором ТВФ-60-2 и э/м ВКЗ для ТЗФП-2-МУЗ, в) с генератором ТЗФП-2-МУЗ и э/м ВКЗ для ТЗФП-2-МУЗ и г) с генератором ТЗФП-2-МУЗ и э/м ВКЗ ТВФ-60-2. Сравнивались результаты расчета ВКЗ для задней шейки РСНД и передней шейки генератора, как для мест с меньшими запасами по ВКЗ. Результаты сравнения приведены в табл. 2 и 3.

Табл. 2. Влияние момента инерции и э/м генератора для генератора ТВФ-60-2.

	Ген ТВФ-60-2, э/м ТВФ-60-2	Ген ТВФ-60-2, э/м ТЗФП-2-МУЗ	Ген ТЗФП-2-МУЗ, э/м ТВФ-60-2
Кз для шейки РСНД	1.21	0.67	2.57
Кз для шейки РГ	1.50	0.80	2.54

Табл. 3. Влияние момента инерции и э/м генератора для генератора ТЗФП-2-МУЗ.

	Ген ТЗФП-2-МУЗ, э/м ТЗФП-2-МУЗ	Ген ТЗФП-2-МУЗ, э/м ТВФ-60-2	Ген ТВФ-60-2, э/м ТЗФП-2-МУЗ
Кз для шейки РСНД	1.45	2.57	0.67
КЗ для шейки РГ	1.48	2.54	0.80

Вариантные расчеты показали, что для выполнения условий прочности при КЗ для шейки РСНД, в случае применения генератора ТВФ-60-2, необходимо уменьшить заднюю шейку РВД с 330 мм до 300 мм.

Результаты исследования показали, что жесткость соединения муфт роторов влияет на значение крутильной частоты около 50 Гц. При моделировании в ANSYS насадных муфт в соединениях роторов нужно учитывать их частичный контакт с валом. Анализ показал, что изменение момента инерции ротора влияет больше, чем э/м момент ВКЗ. В рассмотренном варианте модернизации рекомендовано уменьшить диаметр шейки РВД, либо заменить генератор на ТЗФП-2МУЗ.

Список использованных источников:

1. Бовсуновский А.П. Крутильные колебания валопровода паровой турбины при нештатных режимах работы турбогенератора // Проблемы прочности. — 2012. — №. 2. — С. 85–100.
2. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. — М.: Высш. школа, 1980. — 408 с.
3. РТМ 108.021.13-83. Расчет валопровода турбоагрегата на внезапное короткое замыкание: М-во энергетического машиностроения, 1984.

Методы машинного обучения для диагностики неисправностей ветряных турбин:

сравнительное исследование

Семенов Д.В. , Демидова Г.Л.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Ключевые слова: ветряная турбина, машинное обучение (ML), нейронные сети, сеть долгой краткосрочной памяти (LSTM), метод опорных векторов (SVM), LGBM, диспетчерское управление и сбор данных (SCADA), бустинг (XGBoost)

В этом исследовании рассматривается применение различных моделей машинного обучения (ML) для диагностики неисправностей в ветряных турбинах с особым упором на предварительную обработку данных (SCADA) для обеспечения наиболее точного обучения модели. Были использованы сразу несколько алгоритмов, в их числе: LGBM, Дерево решений

(DT), Случайный лес (RF), Сеть долгой краткосрочной памяти (LSTM) и Метод опорных векторов (SVM). Результаты показывают, что классификатор LGBM, в частности Модель 2, продемонстрировали наилучшую общую производительность, стабильное достижение высоких показателей F1 по различным типам неисправностей. Модели, диагностирующие неисправности в ветрогенераторе, перебои в подаче электроэнергии и неисправности воздушного охлаждения достигли точности обучения 90,5%, а общая точность модели — 70%. Однако при диагностировании перебоев в электросети и системе возбуждения генератора возникли проблемы из-за их низкой частоты в наборе данных, что повлияло на точность модели. В исследовании особое внимание уделяется разработке надежного подхода к многоклассовой классификации. Эти результаты дают информацию для оптимизации систем диагностики неисправностей в ветряных турбинах, точности балансировки и практической реализации в реальных условиях.

Гипотеза.

Могут ли алгоритмы машинного обучения успешно справляться с задачей многоклассовой классификации SCADA-данных?

Методы и алгоритмы.

- 1) Предварительная обработка данных.
- 2) Выбор признаков.
- 3) Использование алгоритмов машинного обучения:
 - a) Light Gradient Boosting Machine (LGBM),
 - b) Decision Tree (DT),
 - c) Random Forest (RF).
 - d) Long Short-Term Memory network (LSTM),
 - e) Support Vector Machine (SVM).

Результаты.

В этом исследовании производительность оценивалась с помощью показателей точности, полноты, F1-показателя. В таблице 1 представлен только F1-показатель, так как он обеспечивает комплексную оценку, объединяя точность и полноту в один показатель. F1-показатель вычисляется как среднее гармоническое точности и полноты, обеспечивая сбалансированную оценку производительности. Более высокий F1-показатель отражает лучший компромисс между точностью и полнотой, подчеркивая общую эффективность модели.

Таблица 1.

Метод	Точность обучения (%)	Точность модели Score (%)	AF F1-score	EF F1-score	FF F1-score	GF F1-score	MF F1-score	NF F1-score
LGBM1	88.59	68	0.42	0.71	0.60	1.00	0.13	0.76
LGBM2	90.5	70	0.63	0.55	0.63	1.00	0.25	0.91
DT	69	63	0.32	0.4	0.65	0.93	0.12	0.79
DT1	70	69	0.58	0.54	0.68	0.96	0.14	0.82
RF	79	72	0.55	0.53	0.69	1.00	0.31	0.88
LSTM	88.39	77	0.65	0.75	0.69	0.95	0.00	0.89
SVM	87.95	73	0.56	0.62	0.67	1.00	0.33	0.89

LGBM1 показал точность обучения 88,59% и точность модели 68%. Его показатели F1 по классам варьируются от 0,42 для AF до 0,76 для NF. **LGBM2** показал точность обучения 90,5% и точность модели 70%. Он продемонстрировал более высокие показатели F1 для AF (0,63) и NF (0,91) по сравнению с **LGBM1**. **DT** показал точность обучения 69% и точность модели 63%, при этом значения F1-показателей варьировались от 0,32 для AF до 0,79 для NF. **DT1** показал более высокую точность обучения 70% и точность модели 69%. Его значения F1-показателей были заметно лучше, особенно для GF (0,96) и NF (0,82). **RF** обеспечил точность обучения 79% и точность модели 72% с высокими показателями F1 для GF (1,00) и NF (0,88). **LSTM** обеспечил точность обучения 88,39% и точность модели 71,67%. У него были высокие показатели F1 для большинства классов, особенно для GF (0,95). **SVM** обеспечил точность обучения 87,95% и точность модели 73%. Модель показала высокие значения F1-меры, особенно для GF (1,00) и NF (0,89). Модель **SVM** показала самый высокий показатель точности модели — 73%, за ней следует модель **RF** с показателем 72%. Это говорит о том, что **SVM** и **RF** хорошо справились с задачей по общей точности. Модель **LGBM2** показала самый высокий показатель точности обучения — 90,5%, что указывает на то, что она хорошо соответствует обучающим данным. Однако показатель точности модели 70% говорит о некотором переобучении или снижении производительности на тестовом наборе данных. Модели **LGBM1**, **LGBM2**, **RF** и **SVM** продемонстрировали высокие показатели F1 для класса GF (1,00), что указывает на идеальную классификацию для этого класса. Это показывает, что эти модели эффективно справляются с этим конкретным классом. У **LGBM1** были более низкие показатели F1 для классов AF и MF, что говорит о трудностях с точной классификацией этих категорий по сравнению с другими моделями. **DT1** и **RF** также хорошо справились с задачей для класса GF, показав высокие значения F1, что говорит об

эффективной работе с этим классом. Класс MF стабильно показывал более низкие значения F1 во всех моделях, что отражает трудности с эффективной классификацией этого недостаточно представленного класса. **LGBM1** и **DT** хуже всего справлялись с этим классом, что говорит о необходимости улучшения стратегий классификации для редких классов.

Выводы.

В этом исследовании были разработаны различные модели машинного обучения для диагностики неисправностей в ветряных турбинах, уделяя особое внимание подготовке данных из систем SCADA. Модель 2 классификатора Light Gradient Boosting Machine (LGBM) оказалась наиболее эффективной, обеспечивая стабильно высокую производительность по всем типам неисправностей. Несмотря на это, модели испытывали трудности с диагностикой неисправностей, связанных со сбоям в электросети (MF) и возбуждением (EF), которые показали самые низкие значения F1. Это ограничение связано с относительно низкой частотой возникновения таких неисправностей в наборе данных, что повлияло на обучение модели. При рассмотрении каждого типа неисправности по отдельности алгоритмы диагностики неисправностей потенциально могут обеспечить точность более 99%. Однако основной целью было разработать надежный алгоритм многоклассовой классификации, который хорошо работает с различными типами неисправностей. Результаты этого исследования дают ценную информацию для улучшения систем диагностики неисправностей, подчеркивая важность балансировки производительности модели по различным классам для достижения практических и надежных результатов в реальных условиях.

Список использованных источников:

[1] Hahn, B., Durstewitz, M., and Rohrig, K. (2007). "Reliability of Wind Turbines," in *Wind Energy* (Springer), 329–332. doi:10.1007/978-3-54033866-6_62

[2] Y. Zhao, Z. Qiu, Y. Zhang, H. Quan, Z. Wei and X. Zhu, "Detection of Defects in Wind Turbin Blade Based on Cascaded Adaptive Hybrid Attention Network," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 99349-99361, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3429632.

[3] Y. Zhao, Z. Song, D. Li, R. Qian and S. Lin, "Wind Turbine Gearbox Fault Diagnosis Based on Multi-Sensor Signals Fusion," in *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 96-109, July 2024, doi: 10.23919/PCMP.2023.000241.

[4] K. Xia, Y. Liu and S. Yuan, "Arc Fault Diagnosis Method for Brush Slip Ring System of Doubly-Fed Induction Generator Based on Image Recognition," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 93848-93858, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3424567.

[5] M. Lashkevich, Y. Ali, E. Stolyarov, K. Fedorova, E. Kulik and A. Anuchin, "Current Regulation in Multiphase Open-End Winding Machines under Open Circuit Fault," 2023 22nd

International Symposium on Power Electronics (Ee), Novi Sad, Serbia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/Ee59906.2023.10346196.

[6] M. Homaeinezhad and O. Beik, "Development of a Generalized Multilevel SVM and Capacitor Voltage Balancing Strategy for Multiphase Three-Level NPC Converters," in *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 5, pp. 1059-1070, 2024, doi: 10.1109/OJPEL.2024.3429412.

[7] Maldonado-Correa, J.; Martín-Martínez, S.; Artigao, E.; Gómez-Lázaro, E. , "Using SCADA Data for Wind Turbine Condition Monitoring: A Systematic Literature Review," *Energies* 2020, 13, 3132. <https://doi.org/10.3390/en13123132>

[8] Pandit R, Astolfi D, Hong J, Infield D, Santos M. , "SCADA data for wind turbine data-driven condition/performance monitoring: A review on state of-art, challenges and future trends," *Wind Engineering*. 2023;47(2):422441. doi:10.1177/0309524X221124031

[9] K. Leahy, R. L. Hu, I. C. Konstantakopoulos, C. J. Spanos and A. M. Agogino, "Diagnosing wind turbine faults using machine learning techniques applied to operational data," 2016 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM), Ottawa, ON, Canada, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICPHM.2016.7542860.

[10] X. Qian, T. Sun, B. Wang and Y. Zhang, "A Weighted kNN Fault Detection Based on Multistep Index and Dynamic Neighborhood Scale Under Complex Working Conditions," in *IEEE Access*, vol. 11, pp.

49183-49192, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3272001.

[11] Q. Lu, W. Ye and L. Yin, "Parallel Multiple CNNs With Temporal Predictions for Wind Turbine Blade Cracking Early Fault Detection," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 111, 2024, Art no. 3511511, doi: 10.1109/TIM.2024.3370786.

[12] L. Cao, Z. Qian, H. Zareipour, Z. Huang and F. Zhang, "Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox Based on Deep Bi-Directional Long Short Term Memory Under Time-Varying Non-Stationary Operating Conditions," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 155219-155228, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2947501.

[13] Prince Waqas Khan, Chan Yeob Yeun, Yung Cheol Byun. , "Fault detection of wind turbines using SCADA data and genetic algorithmbased ensemble learning Engineering Failure Analysis," Volume 148, June 2023, doi:10.1016/j.engfailanal.2023.107209

[14] Teng, W.; Ding, X.; Tang, S.; Xu, J.; Shi, B.; Liu, Y. Vibration Analysis for Fault Detection of Wind Turbine Drivetrains—A Comprehensive Investigation. *Sensors* 2021, 21, 1686. <https://doi.org/10.3390/s21051686>

[15] Bindingsbø OT, Singh M, Øvsthus K and Keprate A (2023) Fault detection of a wind turbine generator bearing using interpretable machine learning. *Frontiers in Energy Research, Sec. Wind Energy*, 2023, pp.1-19, doi: 10.3389/fenrg.2023.1284676

[16] Upma Singh, M. Rizwan , “SCADA system dataset exploration and machine learning based forecast for wind turbines Results in Engineering,” Volume doi:10.1016/j.rineng.2022.100640 16 , December 2022,

[17] A. S. Rao, B. V. Vardhan and H. Shaik, "Role of Exploratory Data Analysis in Data Science," 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatre, India, 2021, pp. 1457-1461, doi: 10.1109/ICCES51350.2021.9488986.

[18] Elreedy, D., Atiya, A.F. & Kamalov, F. A theoretical distribution analysis of synthetic minority oversampling technique (SMOTE) for imbalanced learning. *Mach Learn*, 113, <https://doi.org/10.1007/s10994-022-06296-4> 4903–4923 (2024).

[19] F. Alzamzami, M. Hoda and A. E. Saddik, "Light Gradient Boosting Machine for General Sentiment Classification on Short Texts: A Comparative Evaluation," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 101840-101858,

2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2997330.

[20] J. Liu, Z. Wu, L. Xiao and H. Yan, "Learning Multiple Parameters for Kernel Collaborative Representation Classification," in *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 31, no. 12, pp. 5068-5078, Dec. 2020, doi: 10.1109/TNNLS.2019.2962878.

[21] I. D. Mienye and N. Jere, "A Survey of Decision Trees: Concepts, Algorithms, and Applications," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 8671686727, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3416838.

[22] T. Sinha Roy, J. K. Roy and N. Mandal, "Conv-Random Forest-Based IoT: A Deep Learning Model Based on CNN and Random Forest for Classification and Analysis of Valvular Heart Diseases," in *IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement*, vol. 2, pp. 1-17, 2023, Art no. 2500717, doi: 10.1109/OJIM.2023.3320765.

[23] G. Demidova, D. Privalov, D. Semenov, D. Lukichev, Z. Liu and A. Anuchin, "Fault Detection in Electric Drives Based on LSTM Autoencoder Model Machine Learning Approach," 2024 IEEE 25th

International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2024, pp. 1670-1675, doi: 10.1109/EDM61683.2024.10615179.

[24] K. -P. Lin and M. -S. Chen, "On the Design and Analysis of the Privacy Preserving SVM Classifier," in *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 23, no. 11, pp. 1704-1717, Nov. 2011, doi: 10.1109/TKDE.2010.193.

Микрогенерация как альтернативный источник энергии

Слепец И.А.

ООО «Севергрупп», Санкт-Петербург

Ключевые слова: умные сети, микрогенерация, возобновляемые источники электроэнергии

Key words: Smart grid, microgeneration, renewable energy sources

На сегодняшний день многие энергосистемы построены по схеме «централизованного энергоснабжения», подразумевающей использование высокого напряжения и создания крупномасштабных энергосетей. В таких сетях локальные сбои могут иметь очень большое влияние на всю систему и приводить к масштабным отключениям питания. Многие государства начали внедрять системы Smart Grid (далее SG) и строить распределенные энергосистемы вместо централизованных систем. Цели модернизации и перехода к умным технологиям связаны с поиском новых возможностей обеспечения альтернативными возобновляемыми источниками электроэнергии.

Скорость изменения различных факторов настолько высока, что своевременное реагирование на изменение перспективных направлений, является залогом успеха для любой компании. После объявления всеобщей цифровизации и развития умных сетей есть ряд направлений в области энергетики, которые вызывают больше вопросов, чем активное развитие. Например, такой областью для развития компании выступает микрогенерация. Основные вопросы — это законность данной деятельности и возможность использовать микрогенерацию конечному пользователю, а производителю, соответственно, наличие спроса на продукцию; техническую возможность для учета произведенной электрической энергии в режиме потребления/генерации и наличия доступности оборудования для создания таких сетей.

Мировая концепция построения SG подразумевает использование возобновляемых источников электроэнергии за счет интеграции локальных микро-энергосетей (микрогенерации), что позволяет отказаться от традиционных поставщиков электричества, например, атомных или угольных электростанций, или резервировать их. Повышается надежность сети, обеспечивая незаметное для потребителя переключение на другой источник при отказе основного. Но микрогенерация, как альтернативный источник электрической энергии в России слабо пропагандируется и нету достаточной информации о ее возможностях.

В рамках работы проведена оценка перспективной возможности развития микрогенерации и участия ООО «Силовые машины» в ее развитии. Оценка включила в себя определение законности и технической возможности реализации оборудования для микрогенерации.

При анализе нормативных актов определено, что согласно Федеральному закону от 27.12.2019 № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон от 26 марта 2003 года № 35-ФЗ "Об электроэнергетике" в части развития микрогенерации» у потенциального покупателя оборудования производства СМ есть законные основания генерировать и продавать электрическую энергию. Но для того чтобы потребитель был заинтересован в приобретении оборудования необходимо создать условия для учета электрической энергии не только в одностороннем режиме (потребления), но и в режиме генерации.

В результате анализа информации, представленной на официальных сайтах производителей приборов учета, определено, что на рынке имеются приборы учета способных вести учет в режимах и потребления и генерации. Например, у производителя Энергомера: СЕ208 с индексами С2 и S7, СЕ302 S33 503-Ю; МАЯК 103АРТ, МАЯК 302АРТ.

На данный момент существует заинтересованность СМ в производстве оборудования для возобновляемых источников энергии, в первую очередь, в области ветроэнергетики ^[1] и запущен проект по производству ветроустановки на 5,3 МВт.

Таким образом, развитие умных сетей дает старт для развития перспективных направлений в области возобновляемых источников электроэнергии в том числе и для микрогенерации, а ООО «Силовые машины», являясь лидером создания оборудования для генерации, может стать лидером в создании оборудования для микрогенерации.

Список использованных источников:

1. «Силовые машины» планируют выпускать ветроустановки / Энергетика и промышленность России [Электронный ресурс] // <https://www.eprussia.ru/news/base/2024/7269379.htm> (Дата обращения: 28 января 2025).

Изменение газодинамической устойчивости при износе лопаток компрессора ГТД Стрепетков Р.М. УУНиТ, Уфа

Ключевые слова: компрессор, газодинамическая устойчивость, лопатки компрессора, ГТД, ГТУ, пылезащита.

Key words: compressor, gas-dynamic stability, compressor blades, gas turbine engine, gas turbine unit, dust protection.

Целью данной работы является обзор методов, предотвращающих износ лопаток компрессора и изменение его газодинамической устойчивости в запыленной атмосфере.

Опыт эксплуатации авиационной техники показывает, что одной из самых частых причин отказа ГТД является нарушение его устойчивой работы вследствие износа лопаток компрессора. Существенное влияние на износ лопаток оказывает песок, попадаемый в

компрессор при работе двигателя в запыленной атмосфере, например, при полете вертолета низко над землей. Для решения данной проблемы были разработаны различные методы для предотвращения попадания твердых частиц в компрессор двигателя.

Сущность гипотезы исследования: при помощи известных методов по борьбе с попаданием пыли в компрессор, избавиться от проблемы абразивного износа лопаток, при этом оставив характеристики двигателя близким к первоначальным.

Объектом исследования является компрессор с ВК-2500.

Для достижения целей исследования были сформулированы следующие задачи:

1. Анализ характера воздействия.
2. Сбор данных по имеющимся методам защиты ГТД от попадания в него пыли.
3. Анализ эффективности каждого метода защиты.
4. Сравнение характеристик двигателя до и после применения методов защиты.

Метод исследования делится на 4 этапа:

1. Поиск материала по исследованиям воздействия запыленной атмосферы на компрессор.

На данном этапе необходимо проанализировать исследования по воздействию песка на износ лопаток компрессора и устойчивость его работы. Это поможет определить условия для оценки эффективности методов защиты.

2. Поиск информации по имеющимся методам защиты и оценке их эффективности.

При выборе методов защиты следует опираться на следующее:

- 1) При каких условиях он применяется (пассивная пылезащита или защита при критических условиях работы).
- 2) Узконаправленность метода (имеет ли метод широкое распространение или применяется только для работы в определенных условиях).

3. Определение эффективности выбранных методов.

Особенно важными критериями при определении эффективности методов будут служить:

- 1) Количество пыли, которое возможно отсеять при данном методе от попадания в компрессор.
- 2) Самоочищаемость конструкции от пыли.
- 3) Частота обслуживания и ремонтпригодность конструкции.
- 4) Технологичность метода (насколько сильно будет усложнена изначальная конструкция при использовании выбранного метода защиты).

4. Сравнение характеристик двигателя до и после использования выбранных методов.

Сравнение характеристик двигателя до и после использования выбранных методов защиты позволяет определить целесообразность дальнейшего применения и усовершенствования выбранных методов.

5. Анализ результатов.

Вывод по результатам сравнения дает понимание, получилось ли доказать гипотезу исследовательской работы, найти метод по борьбе с абразивным износом лопаток в следствии попадания пыли в компрессор, при этом оставив характеристики двигателя близкими к первоначальным.

В процессе решения поставленных задач были сделаны следующие выводы:

1. Наиболее эффективным и технологичным методом защиты лопаток компрессора от абразивного износа в следствии попадания пыли является применение роторных систем или же установке дополнительный ступени, перед входом в компрессор, способная разогнать частицы пыли по периферии плоскости вращения, при этом не препятствуя попаданию воздуха в компрессор.

2. Еще одним эффективным методом по очистке воздуха перед компрессором от пыли является установка управляемых сеток перед ним. Данный способ позволяет снизить количество попадаемой в компрессор пыли, при минимальных изменениях в конструкции двигателя и изменениях его характеристик. Недостаток данного метода- невозможность к самоочищению.

Новизна и оригинальность данной работы состоит в том, что использование данных методов защиты в компрессорах ГТУ дает ряд преимуществ:

1. Традиционные методы защиты лопаток компрессора от абразивного износа вследствие попадания на них пыли основаны на установке агрегата перед компрессором для фильтрации воздуха не могут гарантировать абсолютной защиты от пыли после определенного срока наработки, при этом сама конструкция агрегата имеет большие габариты и сложности в изготовлении. Преимуществом новых методов является их эффективная совместная работа при малых габаритах конструкции.

2. Еще одним достоинством новых методов является их высокая технологичность. То есть данные методы способны показывать высокую эффективность работы при сравнительно малых изменениях в конструкции двигателя.

Результаты, полученные в данной работе в перспективе, будут применяться при производстве ГТЭ-160:

Доклад сопровождается технологической документацией, чертежами, 3Д-моделью.

Список использованных источников:

1. Комплексная защита газотурбинного двигателя, эксплуатирующегося в запыленной атмосфере и морской среде, Еникеев Г. Г. // УГАТУ, Уфа, Вестник УГАТУ, 2013.
2. Иноземцев А. А., Нихамкин В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок // Москва, Машиностроение, 2008.
3. Экспериментальное исследование неустойчивых режимов работы ступени осевого компрессора, Чигрин В.С. // Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского, Харьков, 2015.
4. Энциклопедия по машиностроению XXL // <https://mash-xxl.info/>.

**Унификация паровых котлов, работающих на твердом топливе
с двухтопливными ПГУ**

Табаков Д.Н.

ПАО ТКЗ «Красный котельщик», Таганрог

Ключевые слова: котел, ГТУ, ПГУ.

В современном мире есть много примеров различных вариантов исполнения парогазовых установок (ПГУ), но в основном они базируются на степени бинарности 1, т. е. сжигается 1 вид топлива, что в ГТУ, что в паровом котле или на синтез-газе. Новизна предложенной темы заключается в том, что паровой котел будет работать на спектре различных по составу углей, в составе блока ПГУ, нивелируя проблемы низкого КПД блоков ТЭС и сжигание непроектных топлив на ТЭС. Литературный обзор по работающим установкам такой схемы показал, что публикаций по данной тематике крайне мало. Ранее была описана методика унификации, на которую опирается работа. Степень бинарности разработанной установки с двухтопливной ПГУ без унификации составляет от 0,3 до 0,1, так как преимущественно сжигается уголь, что является также положительным решением, так как он стоит дешевле газа.

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что одним из важнейших подходов, изучаемых для достижения этих целей, является интеграция комбинированных парогазовых установок. Сочетая газовые турбины и паровые в одном энергетическом блоке, работающие на высоких и низких температурах цикла, можно повысить эффективность топлива и достичь более высокого коэффициента полезного действия (КПД) в 55–65%, у обычного блока ТЭС 38–43%. Так же в настоящее время в паровых котлах на станциях идет тенденция сжигать не проектное топливо, так как оно дешевле, или же месторождение, под которое проектировалась

станция, иссякло, и уголь доставляют из других мест. Так как завод при проектировании парового котла производил расчеты на проектное топливо и гарантийный режим рассчитан на него, то при сжигании другого вида ухудшаются характеристики парового котла.

На первом этапе была предложена и рассчитана надстройка действующей электростанции — НчГРЭС, на примере одного блока, путем установки двух ГТЭ-65, по одной на каждый корпус котла ТПП-210А. Вследствие этого происходит увеличение единичной электрической и тепловой мощности блока в целом. Рассмотрена реализация схемы двухтопливной ПГУ с преимущественным сжиганием угольной пыли. Уходящие газы одной ГТУ разделяются на 2 потока, один сбрасывают в горелки и сбросные сопла одного корпуса котлоагрегата, второй направляют на сушку угольной пыли, после транспортирую к горелкам. Так как при этом отсутствует потребность в РВП, принято решение заменить его на теплофикационный экономайзер, включенный в теплосеть.

Для ГТУ рассмотрено и рассчитано решение, повышающее ее эффективность и ПГУ в целом. Одним из вариантов рассмотрено разбиение компрессора на 2 цилиндра и промежуточное охлаждение циклового воздуха между ними. Охлаждающая вода также включена в теплосеть. Для повышения КПД ГТУ и ПГУ рассмотрен промежуточный подвод к цикловому воздуху теплоты вне самой ГТУ. Определены КПД двухтопливной ПГУ, коэффициент бинарности и целесообразность применения такой схемы. В экономической части рассчитан срок окупаемости для надстройки станции и выбору оптимального варианта по условиям эксплуатации.

Промежуточное охлаждение циклового воздуха приводит к уменьшению мощности, затрачиваемой на привод компрессора, уменьшению работы, затрачиваемой на сжатие воздуха до нужного давления. Все это приводит к увеличению мощности, развиваемой газовой турбиной.

Применение промежуточного подвода теплоты к воздуху, подаваемому в камеру сгорания ГТУ, по расчетным данным, позволяет избежать повышения расхода топлива и привести его значение к исходному варианту или при различном подогреве воздуха уменьшить его расход. Воздух подогревается в дополнительно установленных поверхностях нагрева котла, один из вариантов — это воздушные ширмы на выходе из топки или в ГПК. Моделирование данной схемы выполнено с использованием программы Boiler Designer. Схема смоделирована для исходного варианта котлоагрегата, верифицировалась на правильность расчета с программой ТРАКТ (заводской расчет) и далее уже скорректирована для нужных задач.

В результате проведенных работ, актуальность темы повышающей КПД блока подтвердилась расчетами, а также намечен план дальнейших действий. Согласно технико-экономическому расчету, срок окупаемости предложенной схемы составит около 7 лет.

В настоящее время проводится работа по анализу работы парового котла П-67 при работе на спектре 5 разных по составу бурых углей, в исходном варианте котлоагрегата, без изменений поверхностей нагрева. Исследования проводились в ПО Boiler Designer.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что разбежка адиабатической температуры горения в топке парового котла невелика, и даже снижается при использовании некоторых углей из спектра исследуемых. По параметрам газов в тракте котла разбежки не велики, по рабочей среде так же, паропроизводительность выдерживается при сжигании углей из выбранного спектра.

Список использованных источников:

1. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е, переработанное и дополненное. НПО ЦКТИ, СПб, 1998, 256 с. с ил.
2. Методы унификации паровых стационарных котлов по топливу. Часть 1. Л., 1986. 40 с.
3. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. Изд-во МЭИ Москва 2002 г, 584 с. С ил.

Стандартизация систем искусственного интеллекта и их практическое применение в предиктивной диагностике Тропинова А.А., Кобзарь Е.Н., Маннанов Э.Р.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: искусственный интеллект, стандартизация, предиктивная диагностика

Key words: artificial intelligence, standardization, predictive diagnostics

Актуальность

Системы искусственного интеллекта (ИИ) все больше становятся неотъемлемой частью энергетического машиностроения и стремительно меняют индустрию. Интеллектуальные системы позволяют оптимизировать процессы, повышать эффективность производства и улучшать управление энергоресурсами. Однако с ростом использования ИИ возникает необходимость в стандартизации этих систем. В данной статье рассматриваются подходы к стандартизации и применения систем ИИ как в России, так и за рубежом, а также проводится сравнение практик, существующих в этих странах.

Цель работы — рассмотреть проблемы стандартизации систем искусственного интеллекта (ИИ) и эффективного использования ИИ в энергетике на примере систем предиктивной диагностики.

Гипотеза

ИИ позволяет решать множество задач, включая прогнозирование спроса на энергоресурсы, оптимизацию работы оборудования и управление энергосистемами. Внедрение решений на основе ИИ снижает затраты и повышает надежность работы энергосистемы, что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов и растущей конкуренции.

Практическое применение ИИ в энергетическом машиностроении включает в себя интеллектуальные системы управления, предиктивную диагностику, оптимизацию и автоматизацию производства (или конкретных технологических процессов), разработку автономных технологий. Например, системы, использующие машинное обучение, могут анализировать данные в режиме реального времени, чтобы выявлять аномалии и предотвращать сбои оборудования.

General Electric (GE) использует аналитику и машинное обучение для создания цифровых двойников и последующего предиктивного обслуживания своих турбин и генераторов. Это позволяет прогнозировать возможные неисправности и выполнять техническое обслуживание, сокращая время простоя оборудования [1].

Mitsubishi Heavy Industries применяет ИИ для анализа данных с электростанций в режиме реального времени. Цифровое решение TOMONI™ оптимизирует ключевые параметры управления, позволяет увеличить эффективность и надежность энергетического оборудования, а также способствует более плавному переходу к генерации с помощью возобновляемых источников энергии [2].

ABB разрабатывает цифровой продукт Ability™, который представляет собой портфель цифровых решений для промышленности и энергетики. Он основан на использовании алгоритмов машинного обучения и применяется для оценки состояния и диагностики оборудования, а также повышения эффективности и снижения электропотребления [3].

Schneider Electric разрабатывает единую платформу EcoStruxure™, которая позволяет оптимизировать различные технологические процессы, используя машинное обучение и искусственный интеллект. В частности, она применяется для повышения энергоэффективности и снижения производственных затрат на производствах и в энергогенерации [4].

Компания Siemens разрабатывает платформу Mindsphere™, используемую для анализа данных в режиме реального времени с применением искусственного интеллекта. Это помогает оптимизировать производственные процессы и повысить энергоэффективность установок и агрегатов. Также Siemens применяет ИИ в проектировании газовых турбин. Используя алгоритмы искусственного интеллекта, компания анализирует и моделирует термодинамические процессы, что позволяет создавать более эффективные и компактные решения [5].

Westinghouse Electric Company использует ИИ систему HiVE™ для мониторинга и диагностики систем безопасности атомных электростанций. Алгоритмы машинного обучения анализируют данные в режиме реального времени, тем самым повышая безопасность и оперативность реагирования на аномалии [6].

В рамках проекта «Цифровая АЭС» компания «Росатом» активно внедряет системы ИИ для моделирования и анализа работы ядерных реакторов. Используются технологии для прогнозирования возможных инцидентов и улучшения мониторинга [7].

Ростех развивается в сторону цифровой инженерной платформы, в том числе с использованием искусственного интеллекта для оптимизации производственных процессов и управления качеством продукции [8].

«Севергрупп» для подбора и оценки компетенций персонала применяет системы на базе ИИ, которые называются Sever.AI и Potok.IO [9].

«Силовые машины» применяет ИИ для предиктивной диагностики и оценки технического состояния турбоагрегатов. Внедрение такой системы позволяет спланировать ремонтные работы и сократить количество аварийных остановов. Также использование системы предиктивной диагностики помогает не только снизить затраты, но и оптимизировать производственные процессы предприятия с целью уменьшения издержек [10].

Перечисленные примеры показывают, что энергомашиностроительные компании заинтересованы в применении новых технических решений с целью повысить производительность и сократить расходы с помощью интеллектуальной аналитики и управления данными.

Объектами исследования являются системы ИИ в области развития систем предиктивной диагностики.

Задачи работы

Для достижения поставленной цели требуется:

1. Рассмотреть проблему стандартизации систем искусственного интеллекта и озвучить направления развития стандартизации в России в предметной области.

2. Проанализировать существующие подходы к внедрению ИИ в производство на примере отечественных и зарубежных компаний.

3. Разработать практические рекомендации по стандартизации на примере системы предиктивной диагностики для энергообъектов.

Исследование выполнено на основе систематического обзора и **специальных методов**, таких как унификация, типизация и симплификация.

Стандартизация искусственного интеллекта

Стоит отметить, что в странах мира технический уровень в вопросах разработки, применения ИИ и стандартизации различен.

Стандартизация включает в себя деятельность, связанную с разработкой и изменением государственных стандартов, которые устанавливают взаимосвязанные правила разработки, проектирования, распространения и классификации ИИ с целью установления требований, регулирующих разработку, сопровождение и эксплуатацию ИИ для унификации, тем самым повышая эффективность разработки новых и модернизации существующих ИИ.

В ЕС стандартизация ИИ реализуется посредством законопроекта AIA [11], целью которого является ужесточение требований к системам искусственного интеллекта и их соответствие данным стандартам.

На международном уровне существует несколько ключевых организаций, работающих над стандартизацией ИИ, таких как Международная организация по стандартизации (ISO), Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). Например, они разрабатывают стандарты в области ИИ, охватывающие терминологию, этику, практические примеры использования ИИ, взаимосвязь ИИ с развитием информационных систем, качество данных, безопасность машин и оборудования, требования к органам, осуществляющим аудит и сертификацию систем ИИ, последствия использования ИИ, области принятия решений, безопасность, кибербезопасность и защита конфиденциальности и др.

Наиболее значимые стандарты в этой области [12–31].

В Российской Федерации за стандартизацию и техническое регулирование отвечает Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Данная организация как разрабатывает собственные, так и адаптирует международные стандарты к специфике отечественной экономики. Приказом Росстандарта от 25 июля 2019 г. № 1732 сформирован специальный технический комитет по стандартизации № 164 «Искусственный интеллект». Основная цель — повышение эффективности работ по стандартизации в области ИИ на национальном, межгосударственном и международном уровнях [32].

В соответствии с Национальной стратегией развития в Российской Федерации на период до 2030 года был издан Указ Президента № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» от 10 октября 2019 года. Указ направлен на формирование и развитие национальной системы ИИ в России с целью обеспечения технологического лидерства страны в этой области. 15 февраля 2024 года для ускорения развития ИИ в России был принят Указ № 124 «О внесении изменений в Указ Президента № 490». Указ № 124 представил более комплексный подход к вопросам развития ИИ в России, обозначил контроль и координацию между государственными органами, научными учреждениями и частным сектором, описал развитие и применение ИИ в ключевых отраслях науки и техники, акцентировал внимание на развитии научной базы и кадров, а также установил этические и правовые стандарты.

Начиная с 2020 года в России было принято несколько стандартов, регулирующих использование ИИ в различных отраслях науки и техники. Важнейшими на сегодня действующими стандартами в области ИИ являются [33–36].

Классификация систем искусственного интеллекта

Классификация систем ИИ может осуществляться по различным критериям. Зарубежные методы классификации ИИ часто основаны на четких подкатегориях и типах, что способствует лучшему пониманию функциональности и применимости технологий. Например, ISO предоставляет классификации автономных систем, которые могут быть использованы как в производственных процессах, так и в управлении энергосистемами. Также существуют более разнообразные системы классификации, помогающие создавать более точные и адаптивные решения. Обычно в международных стандартах предусмотрены четкие категории, такие как уровень автономности, типы задач (например, классификация, регрессия, кластеризация) и области применения. Это обеспечивает более эффективное взаимодействие между различными системами и их компонентами, что особенно важно в контексте интеграции ИИ в энергосистемы.

В России классификация ИИ часто базируется на общих принципах и менее формализована из-за отсутствия четких критериев по применимости. Большинство классификаций основано на общем понимании технологий, что затрудняет их применение в конкретных областях, таких как энергетическое машиностроение. В результате это приводит к смутному пониманию особенностей систем и трудностям их внедрения и развития. Например, отсутствие четких критериев для классификации систем ИИ в энергетическом машиностроении может мешать эффективному применению технологий и препятствовать технологическим инновациям.

В зарубежных компаниях, активно использующих ИИ в энергетическом машиностроении, уровень внедрения стандартов и классификаций находится на высоком уровне, что позволил уже добиться значительных результатов в процессах оптимизации. Они используют передовые методы управления проектами, помогающие снизить риски и повысить качество результатов.

В России, несмотря на наличие разработок и интереса к внедрению ИИ, уровень применения стандартов и классификаций в реальных проектах все еще недостаточный. Это обусловлено отсутствием единого подхода и четких норм, что негативно сказывается на эффективности реализации проектов. Однако усилия по внедрению зарубежного опыта и адаптации международных стандартов постепенно начинают приносить свои плоды, что открывает новые перспективы для развития отрасли.

Одной из ключевых проблем является недостаток четкой и всеобъемлющей нормативной базы, регулирующей разработку и эксплуатацию ИИ в энергетическом машиностроении. Это ведет к тому, что разработчики и пользователи вынуждены опираться на старые или неполные стандарты, что порождает правовые и технологические риски.

Недостаток квалифицированных кадров также значительно влияет на сложности в процессе стандартизации. Дефицит специалистов, обладающих знаниями в области ИИ и энергетического машиностроения, ограничивает возможности для эффективной работы над стандартами и классификациями. Подготовка и переквалификация кадров должны стать приоритетом для отрасли.

Этические аспекты внедрения ИИ также актуальны. Проблемы безопасности, конфиденциальности данных и ответственности за принимаемые системой ИИ решения требуют дальнейшего обсуждения и разработки универсальных подходов. Важно, чтобы российская практика учитывала как лучшие международные примеры, так и специфические условия отечественного рынка. Это позволит создать более сбалансированный и адаптивный подход.

Практические рекомендации по стандартизации на примере системы предиктивной диагностики

Для развития систем предиктивной диагностики энергетического оборудования на крупных электростанциях стоит принять во внимание существующую нормативную документацию [37 - 40], накопленные данные анализа состояния оборудования и предложить следующий подход в вопросе стандартизации:

1. Классификация энергообъектов

1.1. Тип используемого топлива: тепловые и атомные, гидро, возобновляемые источники.

1.2. Мощность и унификация используемых агрегатов: объединение схожих или однотипных узлов в обособленные группы.

1.3. Режим работы по типу нагрузки: базовый, пиковый, регулирование.

2. Единый стандарт данных и их передача

2.1. Параметры: определение и сортировка величин по значимости для контроля при оценке состояния энергетического оборудования, таких как температура, давление охлаждающих сред и рабочих тел, вибрация, электрические параметры, разрядная активность и др.

2.2. Требования к данным измеряемых величин: обеспечение целостности данных, определение стандартных форматов для сбора данных, хранения данных с датчиков различных диагностических систем и других источников.

2.3. Метаданные: данные для описания контекста данных, таких как тип оборудования, дата и время сбора данных, условия эксплуатации.

2.4. Протоколы связи: описание стандартов протоколов для передачи данных между датчиками и контроллером, контроллером и сервером, между серверами.

3. Обработка данных и их интерпретация

3.1. Методы анализа: определение стандартных методов, алгоритмов для анализа данных, таких как машинное обучение, нейронные сети, предиктивное моделирование, статистические методы и др.

3.2. Требования к отчетной документации для интерпретации результатов анализа данных и предиктивной диагностики: точность, четкость, недвусмысленность, объективность представления результатов с прослеживаемостью изменений для выявления тенденций, не противоречащим [41, 42].

3.3. Требования к программным компонентам: формирование функциональных требований, требований к домену, требований к интерфейсу и дизайну для визуализации данных, обеспечения юзабилити и работы с результатами анализа.

4. Области применения ИИ в предиктивной диагностике в энергомашиностроении

4.1. Разработка системы контроля и предупреждения: предупреждения о возможных отказах для минимизации аварийных ситуаций.

4.2. Мониторинг состояния оборудования: анализ данных с целью выявления дефектов и предсказания отказов.

4.3. Прогнозирование срока службы и остаточного ресурса контролируемых узлов и/или оборудования в целом: разработка и совершенствование цифровых моделей и двойников в режиме реального времени для прогнозирования оставшегося срока службы оборудования на основе накопленных данных.

4.4. Оптимизация сроков текущего и планового технического обслуживания: планирование ремонтных кампаний для своевременного изготовления и закупки запасных частей, инструментов и принадлежностей.

5. Работоспособность и безопасность ИИ

5.1 Обеспечение гарантий функциональной корректности систем ИИ, применяемой в системах предиктивной диагностики

5.2. Методы и средства оценки подтверждения безопасности систем ИИ для систем предиктивной диагностики.

5.3. Безопасность данных: внедрение стандартов шифрования и регламентация доступа к необработанным данным (процедуры идентификации и аутентификации при работе с системой предиктивной диагностики)

Результаты работы

1. Рассмотрена проблема стандартизации систем искусственного интеллекта и озвучены направления развития стандартизации в России в предметной области.

2. Проанализированы существующие подходы к внедрению ИИ в производство на примере отечественных и зарубежных компаний.

3. Разработаны практические рекомендации по стандартизации на примере системы предиктивной диагностики для энергообъектов.

Основные выводы по проделанной работе

Стандартизация систем искусственного интеллекта в энергетическом машиностроении — это сложный многоуровневый процесс, требующий комплексного подхода и сотрудничества всех заинтересованных сторон. Учет этических и юридических вопросов (принятие ответственности за риски и последствия для общества в результате применения ИИ), активное сотрудничество между правительством и бизнесом, а также постоянные и существенные инвестиции в исследования и разработки являются ключевыми факторами для успешного развития отрасли.

Следующим важным фактором является увеличение инвестиции как со стороны государства, так и частного сектора в исследования и разработки в области ИИ для энергетического машиностроения.

Создание четкой нормативно-правовой базы и внедрение стандартов, соответствующих специфике российской экономики, будут способствовать эффективному развитию ИИ в энергетическом машиностроении, обеспечивая эффективность и устойчивость отрасли в условиях постоянно меняющегося технологического ландшафта.

Новизна и оригинальность работы

В результате выполнения работ впервые детально освещены вопросы стандартизации на примере системы предиктивной диагностики.

Ценность работы для компании заключается в практической применимости результатов исследований и рекомендаций в качестве первичного предложения и основы для начала работ по стандартизации систем предиктивной диагностики с использованием систем ИИ.

Перспектива использования результатов работы в компании

Одним из основных направлений развития стандартизации в России является адаптация существующих международных стандартов к реалиям внутреннего рынка. Это не только упростит интеграцию с уже существующими международными системами и позволит сэкономить время на их разработку, но и повысит качество и безопасность принятых стандартов. Также это позволит создать единое пространство для обмена технологиями и знаниями на международном уровне.

Помимо адаптации к международным стандартам, важна разработка собственных нормативных документов, исходя из потребностей и особенностей национальной отрасли. Это создаст больше возможностей для инновационного развития и укрепит позиций России на мировом рынке.

Внедрение искусственного интеллекта в энергетический сектор, безусловно, поднимает ряд этических и юридических вопросов, касающихся использования данных, принятия решений и их последствий для общества и окружающей среды. Необходимость обсуждения этических вопросов становится актуальной в контексте потенциальных рисков, которые могут возникнуть в результате использования технологий ИИ. Например, определение ответственности за ошибки, допущенные системами ИИ, или проблемы, связанные с конфиденциальностью потребительских данных, требуют комплексного подхода и разработки четких правил и стандартов.

В обсуждениях по вопросам этики должны участвовать все заинтересованные стороны: разработчики, пользователи, регулирующие органы, исследователи и представители общественности. Это позволит создать более прозрачные и справедливые механизмы

взаимодействия, что, в свою очередь, повысит доверие к технологиям и их внедрению в практику.

Успешная стандартизация и внедрение ИИ в энергетическом секторе требуют активного сотрудничества государственных органов и бизнеса. Важно создать платформу для обмена информацией, стратегиями и передовым опытом. Совместные инициативы могут включать создание рабочих групп и организацию различных мероприятий, направленных на обсуждение актуальных вопросов стандартизации и внедрения ИИ в каждом конкретном случае.

Государство может сыграть важную роль в развитии вспомогательной инфраструктуры, поддерживая тестирование и внедрение новых технологий. Это не только способствует развитию бизнеса, но и повышает международную конкурентоспособность России в сфере энергетических технологий.

Не менее важным фактором является увеличение инвестиций как со стороны государства, так и частного сектора в исследования и разработки в области ИИ для энергетического машиностроения. Это поможет стимулировать инновации и поддержать создание новых стандартов и подходов, соответствующих современным требованиям и задачам отрасли.

Институты и университеты должны участвовать в научных проектах, связанных с внедрением ИИ, чтобы обеспечить не только теоретическую, но и практическую базу для будущих разработок и стандартов. Поддержка стартапов, работающих в этой области, также может привести к быстрому внедрению новых технологий и стандартов.

Список использованных источников:

1. General Electric URL: <https://www.ge.com/>
2. Mitsubishi Heavy Industries URL: <https://www.mhi.com/>
3. ABB AG URL: <https://global.abb/>
4. Schneider Electric SE URL: <https://www.se.com/ww/en/>
5. Siemens AG URL: <https://www.siemens.com/en/>
6. Westinghouse Electric Company URL: <https://westinghousenuclear.com/>
7. "Digital NPP" Rosatom company URL: <https://digitalrosatom.ru/>
8. State Corporation "Rostec" URL: <https://rostec.ru/>
9. Severgroup URL: <https://severgrupp.ru/>
10. Power machines URL: <https://power-m.ru/>
11. Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No

300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828 (Artificial Intelligence Act) (Text with EEA relevance)

12. ISO/IEC 22989:2022(en) Information technology — Artificial intelligence — Artificial intelligence concepts and terminology

13. ISO/IEC TR 24368:2022(en) Information technology — Artificial intelligence — Overview of ethical and societal concerns

14. ISO/IEC TS 4213:2022(en) Information technology — Artificial intelligence — Assessment of machine learning classification performance

15. ISO/IEC 5339:2024(en) Information technology — Artificial intelligence — Guidance for AI applications

16. ISO/IEC TR 24372:2021(en) Information technology — Artificial intelligence (AI) — Overview of computational approaches for AI systems

17. ISO/IEC TS 25058:2024(en) Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Guidance for quality evaluation of artificial intelligence (AI) systems

18. ISO/IEC 5259-3:2024(en) Artificial intelligence — Data quality for analytics and machine learning (ML) — Part 3: Data quality management requirements and guidelines

19. ISO/TR 22100-5:2021(en) Safety of machinery — Relationship with ISO 12100 — Part 5: Implications of artificial intelligence machine learning

20. ISO/IEC 24668:2022(en) Information technology — Artificial intelligence — Process management framework for big data analytics

21. ISO/IEC 42001:2023(en) Information technology — Artificial intelligence — Management system

22. ISO/IEC DIS 42006(en) Information technology — Artificial intelligence — Requirements for bodies providing audit and certification of artificial intelligence management systems

23. ISO/IEC 38507:2022(en) Information technology — Governance of IT — Governance implications of the use of artificial intelligence by organizations

24. ISO/IEC TR 24027:2021(en) Information technology — Artificial intelligence (AI) — Bias in AI systems and AI aided decision making

25. ISO/IEC 5392:2024(en) Information technology — Artificial intelligence — Reference architecture of knowledge engineering

26. ISO/IEC TR 27563:2023(en) Security and privacy in artificial intelligence use cases — Best practices
27. ISO/IEC TR 24030:2024(en) Information technology — Artificial intelligence (AI) — Use cases
28. ISO/IEC 8183:2023(en) Information technology — Artificial intelligence — Data life cycle framework
29. ISO/IEC/IEEE 42010 Software, systems and enterprise — Architecture description
30. ISO/IEC/IEEE 29119-1:2022(en) Software and systems engineering — Software testing — Part 1: General concepts
31. ISO/IEC 27002:2022(en) Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security controls
32. Technical committee for standardization №164 URL: <https://tc164.ru/>
33. GOST R 59276–2020 Artificial Intelligence Systems. Methods of Ensuring Trust. General Provisions
34. GOST R 59277–2020 Artificial Intelligence Systems. Classification of Artificial Intelligence Systems
35. GOST R 59278–2020 Information support for the product life cycle. Interactive electronic technical manuals using artificial intelligence and augmented reality technologies. General information
36. Kuprikov N.M., Bashkirova E.A. Issues of Standardization in the Field of Artificial Intelligence, *Kompetentnost' / Competency (Russia)*, 2022, no. 3, pp. 14–18. DOI: 10.24412/1993878020223-14-18
37. GOST R ISO 9001-2015 Quality management systems. Requirements
38. GOST 15467-79 Product-quality control. Basic concepts. Terms and definitions
39. GOST 18322-2016 Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions
40. GOST R ISO 10303-242-2019 Industrial automation systems and integration. Product data representation and exchange. Part 242. Application protocol. Managed model-based 3D engineering
41. GOST R ISO 13381-1-2016 Condition monitoring and diagnostics of machines. Machine condition prognosis. Part 1. General guidelines
42. GOST R ISO 13379-1-2015 Condition monitoring and diagnostics of machines. Data interpretation and diagnostics techniques. Part 1. General guidelines

**Исследование характеристик работы проектируемого для сжигания донецкого
длиннопламенного угля котла е-530-13.8-560кт в зависимости от нагрузки**
Уланов Э.А., Березина М.Д., Хохлов Д.А.
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Ключевые слова: котел, топка, уголь, тепловой расчет, пылесистема, нагрузка, Boiler Designer.

В настоящее время, несмотря на рост популярности возобновляемых источников энергии, основная часть энергии все же генерируется на станциях, сжигающих органическое топливо — уголь и газ. По оценкам Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, даже при ускорении темпов добычи угля имеющихся запасов в России хватит еще на более чем 100 лет. По этой причине разработка и исследование работы пылеугольных блоков и по сей день остаются актуальными задачами.

Но при тепловом расчете пылеугольного котла необходимо учитывать не только сам котел, но и его пылесистему. Поскольку котел влияет на пылесистему, а пылесистема влияет на котел, то необходимо проводить совместные расчеты котла и пылесистем. Если производить расчеты по отдельности, то придется потратить много времени на итерационные расчеты, поскольку связь между двумя расчетами возможно осуществлять вручную. Следовательно, необходимо применять программные средства расчета. Решением проблемы стал программный комплекс Boiler Designer, в котором стало возможно проводить совместный тепловой расчет котла и пылесистемы [1, 2].

В работе рассматривается совместная работа котла и пылесистемы. Котел Е-530-13,8-560КТ спроектирован для сжигания донецкого длиннопламенного угля. Котел однобарабанный, вертикально-водотрубный, имеет П-образную компоновку и работает с уравновешенной тягой. Котел оборудован четырьмя молотковыми мельницами тангенциальными (ММТ).

В работе исследуются характеристики работы котла Е-530-13.8-560КТ в зависимости от нагрузки. Многовариантные совместные тепловые расчеты котла и пылесистемы (ПС) были выполнены при помощи программы Boiler Designer. На рисунке 1 представлена расчетная схема воздушного тракта котла. Она состоит из отдельных стандартных элементов. Сушка топлива организуется при помощи элемента «Пылесистема». Сушильный агент состоит из холодного и горячего компонентом. Доли этих компонентов регулируются так, чтобы вентиляционный расход на был постоянным. За это отвечает элемент «Регулятор».

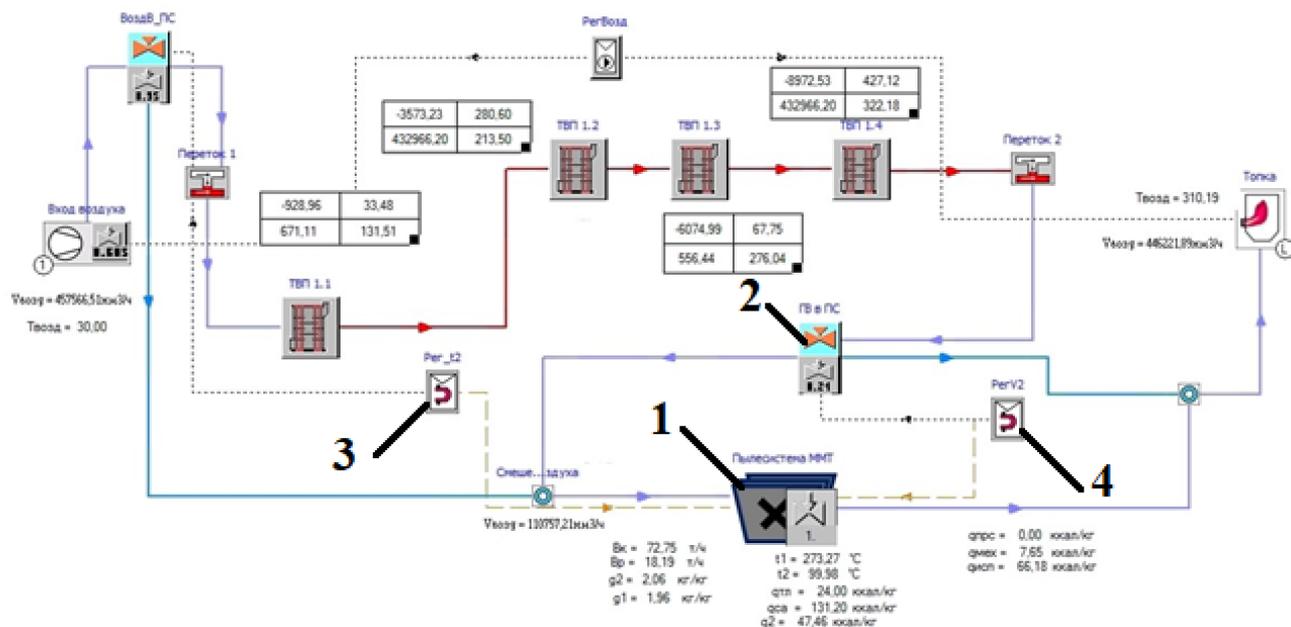


Рисунок 1. Схема воздушного тракта с пылесистемой котла E-530-13.8-560 в программе Boiler Designer. 1 — элемент «Пылесистема»; 2 — клапан подачи горячего воздуха; 3, 4 — регуляторы температуры и вентиляционного расхода

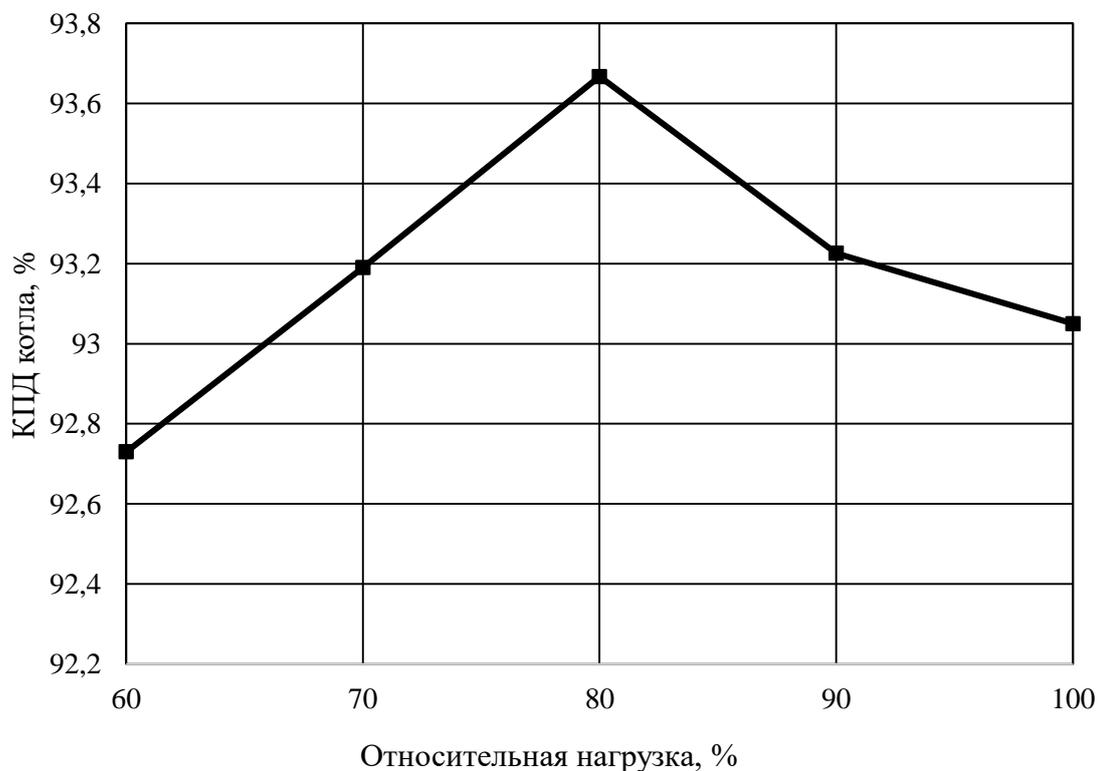


Рис. 2. Зависимость КПД котла от нагрузки



Рис. 3. Зависимость температуры уходящих газов от нагрузки

Установлено, что при нагрузке 80% и менее целесообразно отключить одну ММТ, что позволяет увеличить КПД котла с 93,2% до 93,66%. На рисунке 3 видно, что при отключении мельницы уменьшается температура уходящих газов, что влияет на потерю q_2 . Также было установлено, что на нагрузке менее 60% для достижения параметров перегретого пара требуется дальнейшее увеличение α_t . Однако, это приведет к проблемам с горением и существенному снижению КПД. Следовательно, расчеты котла Е-530-13.8-560КТ и его пылесистемы показали, что котел регулируется в диапазоне нагрузок от 100 до 60% при работе 4 и 3 мельниц. На пониженных нагрузках коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α_t варьируется от 1.25 до 1.46, в то время как на нагрузках 90–100% он составляет $\alpha_t = 1.2$. В связи с этим увеличиваются потери с уходящими газами q_2 , что приводит к уменьшению КПД котла.

Практическая ценность и новизна исследования состоит в поиске оптимальных режимов работы конкретного оборудования. Каждый котел имеет свои особенности регулирования, так как они спроектированы на разные топлива, имеют различные конструкции. Следовательно, исследование режима работы на пониженной нагрузке необходимо на каждом котле. Данную расчетную модель возможно распространить на любые пылеугольные котлы, что существенно сэкономит время, а также снизит вероятность возможных ошибок.

Список использованных источников:

1. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ СОВМЕСТНОГО РАСЧЕТА КОТЛА И ЕГО ПЫЛЕСИСТЕМ. Супранов В.М., Доверман Г.И., Петров И.Г., Плешанов К.А. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА. 2022. № 2. С. 33–41. DOI: 10.1134/S0040363622020060.
2. NEW OPPORTUNITIES FOR BOILER PLANTS CALCULATION SUPRANOV V.M., PLESHANOV K.A., KHOKHLOV D.A., DOVERMAN G.I., PETROV I.G.

**Создание мобильной системы сбора и обработки данных
для испытаний насосного оборудования****Утин Д.В., Кузнецов Я.И.**

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: насосное оборудование, стендовые испытания, измерительная аппаратура

Key words: pumping equipment, bench tests, measuring equipment

В рамках расширения продуктовой линейки АО «Силовые машины», освоения компетенций в области проектирования насосных агрегатов и комплексной поставки насосных агрегатов собственного производства возникла необходимость разработки высокоэффективных питательных, оросительных и конденсатных насосов на заданные параметры.

Разрабатываемые насосы должны заместить изделия внешних поставщиков, тем самым повысить надежность энергетического оборудования и нивелировать риски несвоевременной отгрузки оборудования заказчику. Продукция носит импортозамещающий характер, так как в сегменте российского рынка насосного оборудования для энергетики преобладают иностранные поставщики.

Для исследования и отработки вновь создаваемых насосов необходимо определение их основных характеристик в ходе испытаний на стенде. Согласно ГОСТ 6134-2007 этими характеристиками являются: напорная, энергетическая, кавитационная, вибрационная.

Целью испытаний насосов являются:

- отработка конструкции разрабатываемых насосов для достижения современного мирового уровня по КПД, напору и подаче;
- определение характеристик насосов в широком диапазоне подач для подтверждения расчетных параметров;
- по результатам испытаний в конструкцию могут быть внесены изменения заводом изготовителем, с последующим проведением стендовых испытаний, для подтверждения прогнозных характеристик насосов.

Стенд для испытаний насосов создан на базе малого кавитационного стенда лаборатории водяных турбин ЛМЗ, предназначенного для исследования моделей высоконапорных гидротурбин и насос-турбин. Во время испытаний гидротурбин сбор и

обработка информации осуществляется автоматически с помощью специально разработанного измерительно-вычислительного комплекса (ИВК), к которому подключены интеллектуальные датчики. ИВК имеет закрытую архитектуру программного обеспечения, не позволяющую адаптировать ее для испытаний насосов, а диапазоны измерений датчиков не соответствуют диапазону предполагаемых измерений.

Перед коллективом ЛВТ возникла задача по созданию ИВК для сбора и обработки данных при проведении испытаний насосного оборудования. С целью сокращения сроков и затрат на проведение испытаний принято решение об использовании имеющихся в лаборатории компонентов.

На первом этапе проведен анализ диапазонов изменения основных параметров, на основе которого подобраны подходящие средства измерений, обеспечивающие высокую точность измерений. Измерительные приборы следует подбирать исходя из требований по точности измерений, указанных в ГОСТ 6134-2007 «Насосы динамические. Методы испытаний». Согласно ГОСТ, суммарная погрешность измерения расхода не должна превышать $\pm 2\%$, напора и крутящего момента $\pm 1,5\%$, частоты вращения $\pm 0,5\%$. Суммарная погрешность определения КПД должна составлять не более $\pm 3\%$. Исходя из этих требований выбраны аналоговые, частотные, дискретные датчики, обеспечивающие минимальную погрешность измерений. Средства измерений переданы в отдел главного метролога для проведения калибровки, в целях подтверждения их соответствия метрологическим характеристикам.

Затем производился подбор измерительно-вычислительного комплекса для сбора и обработки данных. Основные требования, предъявляемые к комплексу: скорость сбора и обработки данных; корректность обработки/сбора; минимальная задержка в отображении показаний; возможность записи и экспорт данных; возможность настройки под требуемые задачи; возможность юстировки измерительных устройств; совместимость с разнообразными средствами измерений.

В ЛВТ имеется несколько мобильных ИВК различных производителей. На основе вышеуказанных требований выбран ИВК Dewesoft R2DB, производство Словения. Системы Dewesoft для сбора данных имеют модульную конструкцию, надежны и просты в использовании, преобразователи сигналов поддерживают практически любые датчики, запись показаний происходит одновременно с 16 каналов. Программное обеспечение Dewesoft X, давно признанное самым универсальным и удобным в мире, позволяет гибко адаптировать пользовательский интерфейс.

Подключение средств измерений к ИВК осуществлялось с помощью соединительных кабелей с двумя разъемами. Кабели требуемой длины, специально изготовленные сотрудниками лаборатории, имеют двойной слой защиты от электромагнитных волн в виде фольгированного алюминия. С обеих сторон кабеля установлены разъемы, соответствующие ответным гнездам на ИВК и датчиках.

В ПО Dewesoft X создан проект испытаний одного из видов насосного оборудования. Произведены настройки каждого измерительного канала, такие как схема подключения, измеряемая величина, диапазон измерения, характеристики питания, физическая величина, единицы измерения, калибровочная зависимость и др.

Кроме результатов прямых измерений в процессе испытаний для каждого режима работы с помощью настраиваемых математических функций в реальном времени определялись производные величины, такие как напор, расход, КПД и различные характерные коэффициенты. Это позволило легко определять в какой точке рабочей характеристики в данный момент времени испытывается оборудование и облегчило регулирование стенда для выхода на режим при повторных испытаниях.

Для удобства оператора настроены экранные формы, позволяющие представлять показания в виде цифровых и графических виджетов. Все стандартные дисплеи можно настраивать прямо в процессе измерения, а также отображение можно изменить и позднее, не изменяя собранные данные.

После проведения испытаний проведена обработка полученных данных с последующим экспортом в формат стандартной электронной таблицы MS Excel.

В результате разработанная система получилась довольно гибкой, имеющей большое количество настроек, что позволит расширять ее возможности в дальнейшем, путем подключения новых измерительных устройств, и использовать ее и в других проектах по испытанию насосного оборудования.

Список использованных источников:

1. ГОСТ 6134-2007. «Насосы динамические. Методы испытаний».

Исследование тепловой схемы энергетической установки по циклу Аллама
Федоров А.А., Барсков В.В.
 СПбПУ, Санкт-Петербург

Ключевые слова: цикл Аллама, энергетическая установка, сверхкритический диоксид углерода

Целью исследования является разработка полузамкнутой тепловой схемы энергетической установки по циклу Аллама [1, 2]. Задачей исследования являлось определение оптимальных параметров рабочего тела и их зависимость на эффективность цикла.

Была разработана упрощенная схема цикла Аллама для определения исходных данных для расчета оборудования входящего в цикл. Схема представлена на рисунке 1.

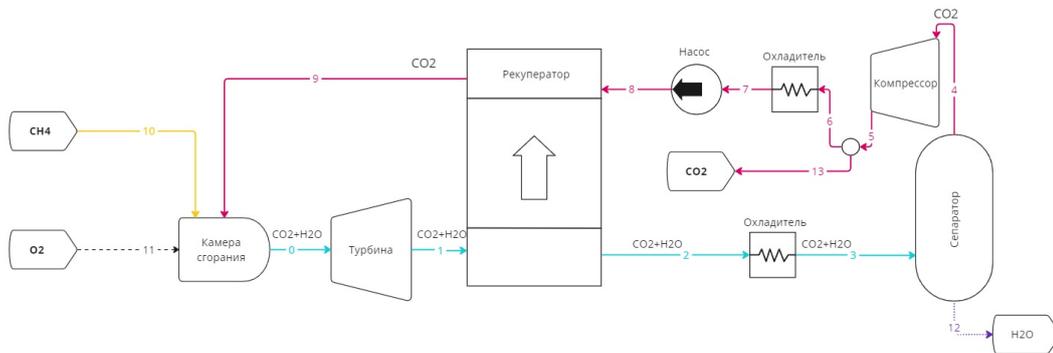


Рис. 8. Расчетная схема цикла Аллама

Установка состоит из турбины, рекуператора, сепаратора воды, углекислотного компрессор, насоса, охладителей и камеры сгорания. Диоксид углерода с примесью воды, нагретый в камере сгорания, поступает на вход турбины, в которой расширяется, производя работу. После турбины отработавший газ поступает на вход горячего контура рекуперативной системы, где отдает тепло углекислому газу и, проходя через охладитель, в котором меняется фазовое состояние воды, поступает на сепаратор. В нем отводится сконденсировавшаяся влага, осушенный диоксид углерода поступает в компрессор, в котором газ сжимается до сверхкритического состояния. По пути до теплообменника сверхкритический диоксид углерода отбирается в виде товарной углекислоты. Затем газ, проходя через теплообменник, охлаждается до жидкой фазы. Жидкий диоксид углерода поступает в насос, в котором повышается давление, после этого рабочее тело в жидкой фазе поступает на вход в рекуператор с холодной стороны. В рекуператоре сжатый диоксид углерода в жидкой фазе нагревается, и происходит фазовый переход в сверхкритическое состояние. Подогретый и

сжатый диоксид углерода поступает в камеру сгорания, в которой происходит горение топлива (метана) в углекислотной среде с подачей чистого кислорода.

По уравнению состояния Р. Спэна и У. Вагнера [3, 4] получены параметры в контрольных точках цикла. Определены характеристики цикла для оптимальной точки ($P_4 = 2710000.0$ Па, $\pi_n = 3.55$; $T_0 = 1282.0$ К; $\mu = 0.85$; $dt_3 = 196.4$ К; $dt_6 = 17.0$ К) представлены в таблице 1. Для достижения оптимальной точки проводится однокритериальная оптимизация, целевой функцией которой является эффективность цикла [5–7]. При данных параметрах эффективность цикла достигает 54.7%.

Таблица 1. Параметры в контрольных точках расчетной схемы

Контрольная точка	Температура, К	Давление, Па	Фазовое состояние
0	1282,00	26412625	Сверхкритическое
1	938,77	2910552	Сверхкритическое
2	399,25	2765024	Сверхкритическое
3	305,58	2737374	Двухфазное состояние
4	305,58	2710000	Газообразное
5	399,75	7746165	Сверхкритическое
6	399,75	7746165	Жидкое
7	287,13	7668703	Жидкое
8	304,04	27223897	Жидкое
9	843,56	26951658	Сверхкритическое

В ходе исследования тепловой схемы и проведения оптимизации для нахождения лучшего показателя эффективности цикла, выяснилось, что соблюдения фазовых состояний в контрольных точках является трудной задачей вследствие соблюдения критериев температурного напора и фазового состояния.

На основе данных исследований возможно начало детальной проработки оборудования входящего в цикл Аллама. Для создания высоко эффективной, экологичной и малогабаритной энергетической установки.

Список использованных источников:

1. Allam R.J. et al. The oxy-fuel, supercritical CO₂ Allam cycle: new cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions. 2014.
2. Allam R. et al. Demonstration of the Allam Cycle: An Update on the Development Status of a High Efficiency Supercritical Carbon Dioxide Power Process Employing Full Carbon Capture // Energy Procedia. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 114. P. 5948–5966.
3. Span R., Wagner W. A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa. 1996.

4. Bell I.H. et al. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open source thermophysical property library coolprop // *Ind Eng Chem Res.* 2014. Vol. 53, № 6. P. 2498–2508.
5. Bergstra J., Yamins D., Cox D.D. Making a Science of Model Search: Hyperparameter Optimization in Hundreds of Dimensions for Vision Architectures. 2013. Vol. 28.
6. Ozaki Y. et al. Multiobjective tree-structured parzen estimator for computationally expensive optimization problems // *GECCO 2020 - Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference.* Association for Computing Machinery, 2020. P. 533–541.
7. Bergstra J. et al. Algorithms for Hyper-Parameter Optimization // *Neural Information Processing Systems.* 2011.

**Разработка базы данных физико-механических свойств диэлектрических материалов торцевых зон турбогенераторов
Федотов Н.А.¹, Маннанов Э.Р.²**

1 — СПбПУ, 2 — АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: изоляция, статорные обмотки турбогенераторов, физико-механические свойства, испытания материалов

Key words: insulation, stator windings of turbogenerators, physical and mechanical properties, material testing

Актуальность

В настоящее время практически отсутствуют актуальные данные по физико-механическим свойствам элементов конструкций диэлектрических материалов торцевых зон и структурированная база данных, что может снижать достоверность выполняемых расчетов и сравнительного анализа.

В связи с этим актуальной задачей является определение физико-механических свойств диэлектрических материалов конструкции статора в исходном состоянии, а также в условиях длительного воздействия рабочих температур с оценкой возможного срока службы и изменения свойств конструктивных элементов в условиях длительного воздействия рабочих температур.

Учитывая, что в настоящее время не существует стандартизированных методик для испытания подобных материалов, требуется разработка методик проведения испытаний и расчетных методов оценки срока службы с изменением свойств конструктивных элементов в условиях длительной эксплуатации.

Цель работы — разработка структурированной базы данных физико-механических свойств диэлектрических материалов торцевых зон статоров турбогенераторов, наполненной актуальными данными свойств, применяемых в конструкции турбогенераторов материалов.

Гипотеза

Статор турбогенератора в процессе эксплуатации подвергается разнонаправленным механическим и тепловым воздействиям, уровень которых может быть различен в зависимости от типа турбогенератора и от месторасположения элемента в конструкции. Применяемые конструктивные элементы должны обеспечивать необходимую работоспособность конструкции в условиях длительной эксплуатации. Известно, что полимеры в условиях эксплуатационных воздействий могут существенно и разнонаправленно изменять физико-механические свойства, что связано как с деструкцией полимера, так и с процессами нарастания полимеризации в условиях повышенных температур. Возможность проведения расчетов динамических характеристик в существующих и разрабатываемых математических и численных моделях обеспечивается, в том числе, использованием актуальных физико-механических характеристик применяемых конструктивных материалов.

Объектом исследования является система изоляции статорных обмоток турбогенераторов и ее компоненты.

Задачи работы

1. Разработать актуальный перечень исследуемых материалов и конструктивных элементов, виды и условия нагружений, исходя из условий эксплуатации оборудования.
2. Разработать методики проведения испытаний и конструкцию образцов.
3. Исследовать наиболее значимые для расчетной модели физико-механические свойства материалов и элементов конструкций в условиях варьирования компонентного состава материалов и температурных воздействий.
3. Разработать методику ускоренного теплового старения.
4. Исследовать изменение свойств материалов и элементов конструкций в условиях ускоренного старения.
5. Выполнить оценку работоспособности материалов в условиях длительных эксплуатационных воздействий.

Исследования, направленные на определение физико-механических свойств диэлектрических материалов торцевых зон турбогенераторов, выполнялось путем применения **экспериментальных методов**.

Результаты работы

1. Разработаны методики испытаний физико-механических свойств материалов и элементов конструкций в условиях варьирования компонентного состава материалов и температурных воздействий — планируется использовать в дальнейшем при проведении испытаний и обработке результатов собственными силами.

2. Разработаны методики ускоренного теплового старения диэлектрических материалов торцевых зон турбогенераторов.

3. Разработана база данных физико-механических свойств диэлектрических материалов торцевых зон статоров турбогенераторов — планируется к использованию при расчете вибрационных нагрузок в статорах и разработке уточненных требований к материалам и конструктивным элементам.

4. Выполнена оценка работоспособности конструкционных материалов.

Основные выводы по проделанной работе

1. На 1 этапе работ были разработаны методики определения физико-механических характеристик диэлектрических материалов торцевых зон статора ТГ.

2. Разработана методика проведения теплового старения, позволяющая оценивать поведение материалов при различных значениях ККТ.

3. Изготовлено ≈16200 испытательных образцов для проведения теплового старения.

4. В процессе определения физико-механических характеристик установлено:

- в исходном состоянии при повышении температуры наблюдается значительное снижение физико-механических характеристик, исследуемых материалов, особенно холодного отверждения;

- на 1 этапе старения материалы, отверждаемые при комнатной температуре, проходят процесс дополнительного отверждения с увеличением физико-механических характеристик.

В связи с этим требуются дополнительные исследования кинетики отверждения;

- процесс теплового старения начинается после 1-го цикла старения;

5. Построены диаграммы долговечности и определен ресурс материалов торцевых зон по установленному ККТ при чисто тепловом старении.

6. Все материалы, кроме ППМ-609, соответствуют классу нагревостойкости F при условии полного отверждения.

7. Определены ТКЛР для материалов в исходном состоянии. Однако расшифровка зависимостей требует дополнительных исследований.

Новизна и оригинальность работы

Впервые в отечественной практике разработаны:

- методики испытаний физико-механические свойств материалов и элементов конструкций в исходном состоянии в условиях варьирования компонентного состава материалов и температурных воздействий;

- методики ускоренного теплового старения диэлектрических материалов торцевых зон турбогенераторов.

Впервые в АО «Силовые машины»:

- разработана база данных физико-механических свойств диэлектрических материалов торцевых зон статоров турбогенераторов, наполненная актуальными данными свойств, применяемых в конструкции материалов турбогенераторов;

- определены физико-механические свойства торцевых зон статоров турбогенераторов.

Ценность работы и перспективы использования для компании заключаются в практической применимости нового продукта и результатов исследований в направлениях:

- повышение достоверности и точности механических расчетов, выполняемых для определения вибрационных состояний конструкций и обеспечения повышенной эксплуатационной надежности с целью снижения рекламационных издержек;

- получение исключительных прав на методики и результаты работ.

Параметрическое моделирование узла коллектора сливного Харитонов Е.А.

ГУАП, АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: моделирование, параметризация, сборка, коллектор, NX, TeamCenter.

Key words: modeling, parametrization, assembly, manifold, NX, TeamCenter

На современном рынке производителей электрооборудования очень важно оптимизировать, сокращать затраты и сроки проектирования, повышать качество изделий, чтобы оставаться конкурентоспособными. Создание параметризованных моделей — это перспективное направление, которое позволит предприятию соответствовать темпам текущего экономического развития страны.

Актуальным вопросом для СКБ ПТ является возможность увеличения процента параметризации сборки турбогенератора машины с водяным охлаждением обмотки статора. Для этого необходимо создать отдельно параметризованные сборочные узлы, и одним из таких узлов является коллектор сливной. Такие параметризованные модели должны сокращать трудозатраты на создание сборок, снижать вероятность возникновения

конструкторских ошибок, упрощать и ускорять создание чертежей, что в целом должно благоприятно влиять на производительность предприятия и себестоимость готовой продукции, что является ценностью данной работы.

Цель настоящей работы — создание параметризованного шаблона сливного коллектора.

За базу разработки принят узел коллектора сливного турбогенератора с водородно-водяным охлаждением мощностью 1000 МВт.

Работа над сливным коллектором включала в себя такие задачи как создание:

1. Параметризованного кольца, способного менять диаметр, толщину стенки, количество сегментов.
2. Параметризованных отверстий для параметризованных сборок «Труба» и «Патрубок».
3. Параметризованных сборок «Труба» и «Патрубок».
4. Сборочных и подетальных параметризованных чертежей.

На данный момент создана рабочая модель сливного коллектора, показанная на рисунке.

Сливные коллекторы используются в турбогенераторах с водяным охлаждением обмотки статора, и на данный момент для каждого нового турбогенератора этот узел разрабатывается «с нуля». Данную работу приходится выполнять довольно часто. Ранее подобных шаблонов не создавалось, а потому работу можно считать уникальной.

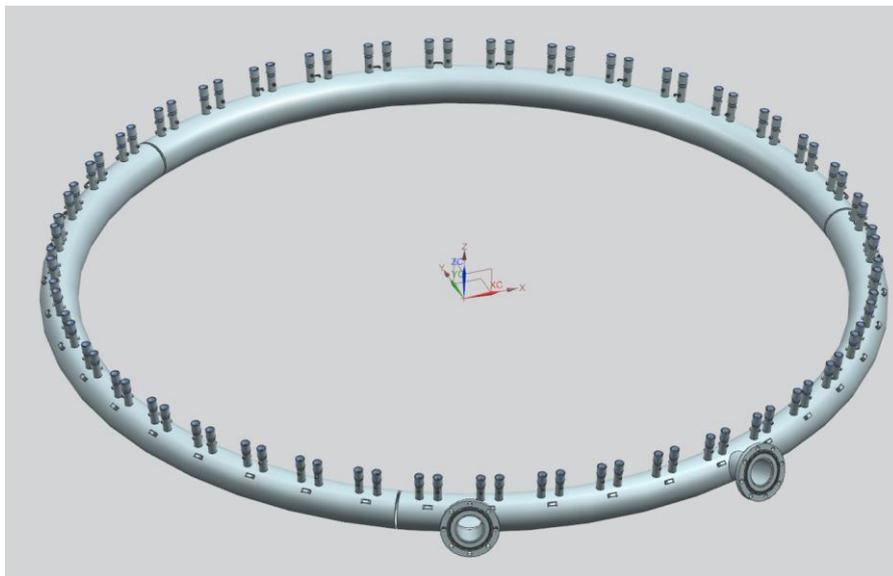


Рис. Шаблон сливного коллектора

Сливные коллекторы используются в турбогенераторах с водяным охлаждением обмотки статора, и на данный момент для каждого нового турбогенератора этот узел

разрабатывается «с нуля». Данную работу приходится выполнять довольно часто. Ранее подобных шаблонов не создавалось, а потому работу можно считать уникальной.

Создание шаблонов для крупных узлов — довольно трудоемкая работа, сопряженная с большим количеством трудностей, однако появление таких шаблонов выводит работу конструкторского бюро на новый уровень, так как позволяет автоматизировать часть работы. Это значит, что инженер сможет работать быстрее и уделять больше внимания другим конструкторским проблемам. Также за счет проработанного шаблона снижается негативное влияние так называемого человеческого фактора.

Основное назначение сливного коллектора — организовать подачу дистиллята для охлаждения обмотки статора. Коллектор состоит из двух или трех сегментов, скоб, патрубков, штуцеров, труб, фланцев и т. д.

Коллекторы для подачи и слива дистиллята должны быть выполнены из материалов, стойких к воздействию коррозии; иметь защиту дистиллята от внешней среды; оборудованы основным и резервным теплообменниками для охлаждения дистиллята.

В ходе моделирования были преодолены сложности, связанные со многими ключевыми элементами коллектора:

1. Отверстия под патрубки, которые нельзя вырезать простым инструментом NX, так как они имеют сложную поверхность сопряжения для последующей возможности качественной сварки.
2. Отверстия под штуцера. При попытке их разместить оказалось, что была выбрана логика построения, несовместимая с операцией, которая была необходима для корректного размещения этих отверстий.
3. Создание двух-трех секторов коллектора, поскольку некоторые операции конфликтовали с операциями, создающими отверстия.

Итерационным путем была определена такая логика построения, которая позволяла всем элементам изменяться и отображаться корректно.

В дальнейшем планируется выпуск полного комплекта конструкторской документации. Чертежи также будут параметризованы, что позволит сократить время и трудозатраты на выпуск конструкторской документации для новых машин.

Подключение к описанной выше работе сотрудника студенческого КБ и его обучение с помощью куратора и сотрудников профильного сектора, позволяет повысить компетенции будущего инженера и сделать задел для работы всего конструкторского отдела СКБ. Дело в том, что простые модели прощают ошибки. Но крупные модели с параметризацией — это совсем другое дело, в них должна четко соблюдаться логика построения, и нарушение этой

логики будет приводить к тому, что модель просто не будет работоспособна. Студент, разрабатывающий параметризованную модель, в любом случае столкнется с ошибками и нарушениями логики построения. Его задача — найти причину, понять, где он ошибся и как нужно было сделать иначе. Такие задачи вынуждают студента расти, создавать правильные логические цепочки. Благодаря особенности работы над параметризованными моделями студент вырабатывает важные качества, которые позже будут очень полезны для предприятия. Такой студент, став полноценным работником завода, будет совершать меньше ошибок и работать быстрее.

Окончательные результаты данной работы планируется применить на всех последующих турбогенераторов с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора.

Повышение технологичности, ремонтпригодности и эксплуатационной надежности паровой турбины с валоповоротным устройством

Чуважов Д.И.

АО «Силловые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: валоповоротное устройство, паровая турбина, технологичность, ремонтпригодность, эксплуатационная надежность

Key words: shaft turning device, steam turbine, manufacturability, maintainability, operational reliability

Целью данной конструкторской работы является повышение технологичности, ремонтпригодности и эксплуатационной надежности паровой турбины с валоповоротным устройством (далее ВПУ).

Гипотеза работы заключается в том, что новая конструкция ВПУ позволит устранить существующие недостатки и повысить указанные характеристики паровой турбины, что приведет к снижению эксплуатационных расходов и увеличению надежности оборудования.

Объектом работы является ВПУ паровой турбины.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) анализ существующих конструкций ВПУ и выявление их недостатков;
- 2) разработка новой конструкции ВПУ с улучшенными характеристиками;
- 3) изготовление изделия по разработанной конструкторской документации (далее

КД) и отгрузка готового изделия заказчику с последующим вводом в эксплуатацию.

Методы работы включали расчет геометрии механических передач, разработку 3D-модели изделия, прочностной расчет корпуса ВПУ и выпуск КД в одной из САД систем.

В результате работы была разработана и утверждена КД на новое ВПУ, которое было изготовлено в соответствии с разработанной документацией и отгружено заказчику на

станцию, где впоследствии успешно введено в эксплуатацию. Также несколько изделий в данный момент находятся на стадии монтажа на других станциях.

Делая выводы по проделанной работе, можно сказать, что старая конструкция ВПУ, используемая на ЛМЗ, имела ряд существенных недостатков, таких как:

- 1) необходимость слесарной пригонки зубчатой передачи последней ступени редуктора после центровки ВПУ относительно ротора турбины;
- 2) необходимость совместной обработки деталей корпуса ВПУ с деталями корпуса подшипника турбины;
- 3) невозможность ревизии, обслуживания и ремонта упоров ВПУ и собачек ротора без полной выемки и разборки ВПУ, вскрытия цилиндров и демонтажа ротора.

Конструкция нового ВПУ лишена всех этих недостатков, что позволило:

- 1) сократить цикл производства изделия;
- 2) уменьшить время, необходимое на сборку и установку ВПУ в турбину;
- 3) обеспечить возможность ревизии и замены упоров ВПУ и собачек на роторе без разборки и выемки ВПУ;
- 4) изготавливать ВПУ как отдельный модуль и устанавливать его в любую турбину с подходящим фланцем ротора.

Новизна и оригинальность работы заключаются в уникальных технических решениях, таких как:

- 1) смещение межосевой линии зубчатой передачи последней ступени редуктора относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось вращения зубчатого колеса, на угол, находящийся в диапазоне $35\text{--}65^\circ$;
- 2) выполнение всех механических передач редуктора в общем корпусе;
- 3) выполнение упоров под собачки на зубчатом колесе обгонной муфты в виде отдельных съемных элементов.

Указанные технические решения позволили:

- 1) повысить эксплуатационную надежность паровой турбины с ВПУ за счет снижения вероятности утечки смазочной среды через горизонтальный разъем турбины в машинный зал, и как следствие, вероятность возгорания при попадании смазки на горячие узлы турбины;
- 2) повысить технологичность за счет исключения необходимости множественной слесарной пригонки зубчатой передачи последней ступени редуктора после центровки и необходимости совместной обработки корпуса ВПУ с крышками подшипников;

3) повысить ремонтпригодность за счет возможности смещения ВПУ в собранном состоянии вдоль оси ротора без его выемки, что позволяет организовать доступ к собачкам на роторе для их ревизии, замены и пригонки к упорам при центровке ВПУ относительно ротора;

4) повысить ремонтпригодность за счет возможности осуществлять замену или ремонт при износе рабочей поверхности упоров на зубчатом колесе обгонной муфты без выемки и разборки ВПУ.

Технические решения, используемые в новой конструкции ВПУ, являются уникальными, что позволило получить патент на изобретение RU 2808187 С1.

Ценность работы для компании «Силовые машины» заключается в повышении качества продукции и снижении затрат на закупку ВПУ новой конструкции на 11–12%, т. к. в настоящий момент изготовление всех ВПУ осуществляется по внешней кооперации.

Перспектива использования результатов работы заключается в том, что новая конструкция ВПУ предполагает линейку разных ВПУ под разные диаметры фланца ротора. На данный момент выпущена документация для 4 ВПУ новой конструкции (диаметры фланца ротора 944, 1070 и 1760 мм). При этом между ВПУ на разные диаметры фланца достигается унификация КД порядка 60–70%, выраженная в форматах А4. Также планируется выпуск КД на ВПУ для турбин мощностью до 100 МВт и турбин типа К-1000 (диаметр фланца ротора 1241 мм).

На данный момент ВПУ новой конструкции уже отгружен и введен в эксплуатацию на Пермской ГРЭС, ст. 1, отгружен и выполняется монтаж на Сургутской ГРЭС, ст. 13, отгружен на Сургутскую ГРЭС-1, ст. 16. Также несколько ВПУ данной конструкции находятся в резерве на складе под проекты Нижневартовская ГРЭС, ст. 2, Ново-Салаватская ТЭЦ, ст. 7 и т. д.

Анализ аэродинамических свойств расчетных моделей компрессоров

ГТЭ-170.1 и ГТЭ-170.2

Шипунов В.В.

АО «Силовые машины», Самара

Ключевые слова: ГТЭ-170.1, ГТЭ-170.2, аэродинамика, компрессор

Key words: GTE-170.1, GTE-170.2, aerodynamics, compressor

Целью данной работы является исследование аэродинамических свойств расчетных моделей компрессоров ГТЭ-170.1 и ГТЭ-170.2, а именно исследование влияния параметров расчетных моделей на параметры компрессора.

Основная гипотеза настоящего исследования заключается в том, что анализ влияния отдельных параметров расчетных моделей на параметры компрессора позволит детальнее изучить процессы, протекающие в компрессоре, а также поможет выявить риски реализации параметров компрессора.

Объектом исследования являются расчетные модели компрессоров ГТЭ-170.1 и ГТЭ-170.2.

Задачи работы заключались в исследовании расчетных свойств расчетных моделей, таких как плотность вычислительной сити; влияние осевых зазоров в компрессоре, тип и положение «ротор-статор» интерфейсов; модель турбулентности и отдельные настроек решателя; шероховатость элементов проточной части.

Метод работы заключался в расчете напорных веток компрессоров ГТЭ-170.1 и ГТЭ-170.2 с различными настройками расчетных моделей. После этого выполнялся анализ результатов расчета с определением параметров как всего компрессора, так и отдельных венцов. Расчеты выполнялись в ПО Fine/Turbo и ПО CFX [1].

По результатам работы выявлено, что наиболее существенное влияние на параметры компрессора оказывает тип и положение «ротор-статор» интерфейса, смещение интерфейсов входной группы ступеней в сторону выходных кромок на 15...20% (от осевого зазора) приводит к увеличению запаса ГДУ на $\Delta K_y = 4,5\%$ и к увеличению КПД компрессора на $\Delta \eta_k = 0,019$. При использовании неотражающего «ротор-статор» интерфейса диагностируется максимальное значение КПД компрессора.

Проведен анализ срывов в исследуемых компрессорах при использовании различных моделей. Выявлено, что механизм исчерпания ГДУ в расчетных моделях в различном ПО имеет отличия, т. е. срывные явления возникают в разных венцах.

Отдельно выполнен анализ влияния шероховатости на параметры компрессора в различных расчетных моделях. Выявлено, что рассмотренные модели прогнозируют одинаковое качественное влияние шероховатости на основные параметры компрессора. Наиболее консервативную оценку влияния шероховатости на КПД компрессора дает модель в ПО CFX. При этом модель ПО FINE\Turbo диагностирует существенное влияние шероховатости на запас ГДУ.

По результатам работы сформированы рекомендации по выбору параметров расчетных моделей, а также учету шероховатости элементов проточной части элементов компрессора.

Стоит заметить, что ранее в АО «Силовые машины» не проводился подробный анализ влияния параметров расчетных моделей на параметры компрессоров ГТЭ-170.1 и ГТЭ-170.2. Данный факт подчеркивает оригинальность выполненной работы.

Ценность настоящей работы заключается в том, что полученные результаты, в частности влияние расчетных параметров модели на параметры компрессора, помогут сократить время идентификации расчетных моделей компрессоров ГТЭ-170.1 и ГТЭ-170.2.

Перспективой использования результатов работы является то, что сформированные в данной работе рекомендации по настройке расчетных моделей могут быть использованы при расчете других компрессоров. Также результаты данного исследования дополняют компетенции АО «Силовые машины» в области разработки проточных частей компрессоров энергетических ГТУ.

Список использованных источников:

1. Михеев М.Г., Шипунов В.В. Анализ аэродинамических свойств компрессора ГТЭ-170.1 // Перспективы развития двигателестроения. Международная научно-техническая конференция имени Н.Д. Кузнецова 2023 г. Сборник докладов. Том 2. с. 62–63.

Модернизация конструкции предохранительного клапана рычажно-грузового типа паровой турбины Шубина Т.В.

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

Ключевые слова: предохранительный клапан, паровая турбина, модернизация конструкции

Key words: safety valve, steam turbine, design upgrade

Предохранительные клапаны паровых турбин предназначены для автоматического выпуска рабочей среды (пара) из системы при повышении давления сверх установленного.

Целью работы является разработка усовершенствованной конструкции предохранительного клапана рычажно-грузового типа паровой турбины, обеспечивающей требуемые технические характеристики и обладающая всеми признаками надежности оборудования.

Гипотеза работы заключается в том, что модернизация конструктивных элементов существующей конструкции предохранительного клапана позволит спроектировать и изготовить на базе ЛМЗ клапан с требуемыми характеристиками и надежностью для применения его в проектах паровых турбин.

Объект работы — предохранительный клапан рычажно-грузового типа.

Задачи работы:

1) Анализ недостатков существующих конструкций предохранительных клапанов паровых турбин.

2) Разработка 3D модели предохранительного клапана рычажно-грузового типа модернизированной конструкции.

3) Проведение прочностных расчетов для подтверждения соответствия разработанной конструкции требуемым техническим характеристикам и надежности.

4) Разработка конструкторской документации на предохранительный клапан.

5) Подтверждение работоспособности конструкции на натурных испытаниях.

Методы работы включали разработку 3D модели и конструкторской документации с помощью САД системы КОМПАС-3D, проведение прочностного расчета в системе ANSYS.

Результатом работы является разработка конструкторской документации усовершенствованной конструкции предохранительного клапана рычажно-грузового типа на основании проведенного анализа существующих конструкций.

Основные выводы по проделанной работе:

1) Анализ существующих конструкций предохранительных клапанов выявил, что применение рычажно-грузовых клапанов паровых турбин предпочтительнее пружинных.

2) Обеспечение герметичности оборудования достигается за счет качественной притирки уплотняющих поверхностей седла и тарелки.

3) Успешные гидравлические испытания клапана на прочность, герметичность и работоспособность являются основаниями для ввода клапана в эксплуатацию.

4) Низкая технологичность оборудования увеличивает трудоемкость изготовления и снижает его экономичность.

Новизна и оригинальность работы заключается в применении усовершенствованных элементов конструкции:

1) Съёмное седло с уплотнительным пояском взамен наплавки уплотнительного пояса непосредственно на корпусе позволило снизить трудоемкость притирки уплотняющих поверхностей седла и тарелки, повысить ремонтпригодность конструкции.

2) Модернизированная конфигурация уплотнительных поясков взамен притирки по плоскости позволила обеспечить необходимые параметры герметичности предохранительного клапана.

3) Съёмные заглушки для гидравлических испытаний взамен приварных позволили снизить трудоемкость операции, повысив технологичность и экономичность.

4) Дополнительные ужесточения корпуса, седла и тарелки предохранительного клапана позволили обеспечить требуемую прочность конструкции.

Ценность работы для компании заключается в возможности изготовления разработанного предохранительного клапана модернизированной конструкции на базе ЛМЗ и

применения в проектах изготовления и модернизации паровых турбин взамен покупных предохранительных клапанов, которые использовались ранее.

Предохранительный клапан модернизированной конструкции успешно прошел функциональные гидравлические испытания и уже изготовлен и поставлен для паровых турбин Атырауской ТЭЦ, ПАО «Северсталь». В процессе производства находится предохранительный клапан модернизированной конструкции для Минской ТЭЦ.

В перспективе на основе данного модернизированного клапана планируется разработка двухседельного предохранительного клапана рычажно-грузового типа, конструкция которого позволит уменьшить массу и габариты оборудования, сохранив при этом начальные основные технические характеристики.

Алфавитный указатель

- Александров М.А., 7
 Алексеенко Е.А., 9
 Аминев Р.Р., 10
 Аюпов Р.Т., 10
 Балыков О.С., 110
 Баранов В.С., 110
 Баранова А.А., 12
 Барсков В.В., 141, 203
 Бекузин В.И., 15
 Березина М.Д., 18, 197
 Бобрик А.А., 19
 Богданова Н.А., 21, 24
 Быков Л.В., 43, 85
 Волков Н.С., 27
 Горынцев М.Г., 31
 Градусов А.Д., 34
 Давлетгареева Е.И., 37
 Демидова Г.Л., 173
 Дмитриев А., 49
 Доржиева Б.С., 41
 Ежов А.Д., 43, 85
 Елисеев Е.И., 49
 Жохов Н.Ю., 53
 Забенько Е.В., 97
 Зарифжонов Ж.Ф., 56
 Золотухин А.С., 59
 Золотухина Е.Ю., 63
 Зуйкин Р.Е., 66
 Зырянов И.В., 69
 Иванов А.А., 70
 Иванов Н.С., 76
 Ильин И.В., 49
 Исаков А.А., 73
 Кадеров В.А., 76
 Калинин Д.И., 78
 Карпычев А.В., 82
 Киселёв В.П., 43, 85
 Классен А.Д., 27
 Климин С.Н., 123
 Кобзарь Е.Н., 185
 Ковалёв В., 89
 Кожевников Г.Д., 97
 Колесников А.А., 92
 Кондаков А.С., 95
 Коновалов А.В., 7
 Королев Д.Д., 97
 Кривченков Ю.М., 103
 Крылов Д.М., 99
 Кузнецов Я.И., 200
 Кузьменко Ю.П., 101
 Липатов И.А., 123
 Логвинова А.А., 103
 Луговская Л.А., 78
 Ляховский А.С., 109
 Ляшенко В.К., 106
 Мадея К.Р., 121
 Макаров А.А., 123
 Маннанов Э.Р., 110, 185, 205
 Марков М.А., 114
 Мельцын С.А., 123
 Михайлов Е.В., 121
 Могильников А.В., 123
 Молодчиков С.Е., 127
 Назаргулов А.Р., 129
 Никитин И.А., 131
 Никулин Д.А., 134
 Овчинников К.А., 136
 Островский М.А., 66
 Павлов Н.С., 139
 Парфенов К.А., 141
 Пегов В.Д., 144
 Петрушин Д.Е., 78
 Плодистый М.О., 145
 Попп А.А., 148
 Порохненко К.А., 109
 Порунов А.И., 150
 Пулин А.Г., 153
 Раднаев А.Б., 157
 Рашитов И.Р., 10
 Родькина Д.Д., 160
 Розбицкий Г.Г., 163, 167
 Савиковский А.В., 170
 Самохвалов А.Э., 103
 Семенов Д.В., 173
 Сержантова М.В., 99
 Слепец И.А., 179
 Стрепетков Р.М., 180
 Суханов В.А., 27
 Табаков Д.Н., 183
 Тимофеев К.М., 123
 Тропинова А.А., 185
 Уланов Э.А., 18, 197
 Утин Д.В., 200
 Федоров А.А., 203
 Федотов Н.А., 205
 Харитонова Е.А., 208
 Хохлов Д.А., 197
 Чемисов В.В., 148
 Чуважов Д.И., 211
 Шестаков А.О., 114
 Шипунов В.В., 213
 Шорохова З.Ф., 82
 Шубина Т.В., 215



Сборник трудов XIII Научно-технической конференции молодых инженеров «Энергия молодости» АО «Силовые машины»

Издательство «Перо»
109052, Москва, Нижегородская ул., д. 29-33, стр. 27, ком. 105
Тел.: (495) 973-72-28, 665-34-36
Подписано к использованию 14.05.2025.
Объем 16 Мбайт. Электрон. текстовые данные. Заказ 497.