Некоммерческое партнерство
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ
Единой энергетической системы»

111 250, Москва, проезд Завода Серп и Молот,
дом 10, офис 608, Тел. (495) +7 495 012 60 07
E-mail: dtv@nts-ees.ru, http://www.nts-ees.ru/
ИНН 7717150757

Основана в 1724 году

Российская Академия Наук
Секция по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по
системным исследованиям в энергетике

УТВЕРЖДАЮ
Президент, Председатель
Научно-технической коллегии,
д.т.н., профессор
_____ Н.Д. Рогалев
«22» марта 2021 г.

ПРОТОКОЛ № 1

совместного заседания Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике на тему: **«Особенности построения, эксплуатации и функционирования систем управления, мониторинга и диагностики газотурбинных установок отечественного производства на объектах распределённой энергетики»**

18 февраля 2021 года г. Москва

Присутствовали: члены секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», сотрудники НП «НТС ЕЭС», ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», НИК С6 РНК СИГРЭ, ООО «РТСофт-СГ», ФГБУН «ИНЭИ РАН», ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», ООО «Совтест АТЕ», ООО НПП «ЭКРА», ООО «Интеллектуальная энергия», ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ООО «Компания ДЭП», Общевойсковой академии ВС РФ, Ассоциации специалистов ВИЭ «Зеленый Киловатт», ООО «Газпром экспорт», ФГБОУ ВО «Нижегородский

ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», АО «Техническая инспекция ЕЭС», АО «Русатом Автоматизированные системы управления», ООО Калининградский инновационный центр «Техноценоз», всего **42** человека.

Со вступительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В.

Во вступительном слове было отмечено, что несмотря на значительный рост количества вводов объектов распределенной энергетики (РЭ), в том числе на базе газотурбинных установок как зарубежного, так и отечественного производства, вопросы мониторинга и диагностики указанных генерирующих установок в научно-технической литературе широко не освещается.

Эффективность функционирования систем мониторинга и диагностики генерирующих установок объектов РЭ напрямую связана с надежностью эксплуатации данных объектов в целом, что является крайне важным для их собственников. Это обусловлено тем, что данные системы позволяют выявлять развивающиеся дефекты на ранней стадии (стадии зарождения), не допуская их развития, что позволяет предотвращать возникновение аварий и снижать финансовые издержки на ремонт генерирующего оборудования.

Кроме того, актуальность применения систем мониторинга и диагностики на объектах РЭ с целью обеспечения надежности и бесперебойности производства электроэнергии обусловлена тем, что вопросу развития объектов РЭ уделено особое внимание в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г., а также в Доктрине энергетической безопасности России.

С докладом **«Особенности построения, эксплуатации и функционирования систем управления, мониторинга и диагностики газотурбинных установок отечественного производства на объектах распределённой энергетики»** выступил Назарычев Александр Николаевич – ректор ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», д.т.н., профессор.

Основные положения доклада приведены ниже. Презентация доклада прикладывается (**Приложение 1**).

1. Представлена актуальность темы доклада, заключающаяся в том, что в настоящее время наработка многих газотурбинных установок (ГТУ), эксплуатируемых на магистральных газопроводах, превысила 100000 ч, в то время как ресурс отдельных деталей и узлов значительно меньше (например, для лопаток назначенный ресурс варьируется в диапазоне от 18000 до 80000 ч). На сегодняшний день уже накоплена достаточно большая статистика по отказам ГТУ, при анализе которой можно выделить два типа дефектов,

классифицируемых по причинам возникновения: конструктивно-производственные (случайные отклонения в геометрии профиля, технологии изготовления узлов ГТУ; их регулировании) и эксплуатационные — неравномерность воздушного потока при отклонении режимов, различная наработка отдельных лопаток, а, следовательно, и износ.

Поэтому, наиболее остро стоит задача контроля изменений в техническом состоянии ГТУ на стадии зарождения любого дефекта деталей, узлов и систем из существующего множества, для выявления нежелательных тенденций и прогнозирования их развития с целью предотвращения возникновения аварий.

2. Представлены цели и задачи технического диагностирования ГТУ на объектах РЭ, в том числе произведено сравнение задач, регламентированных ГОСТ 20911-89, и альтернативного представления, таких как распознавание зарождающихся дефектов, управление их развитием, определение интегральных параметров технического состояния (ресурс, бальная оценка и т.д.).

3. Приведен перечень отечественных производителей ГТУ, среди которых АО «Уральский турбинный завод», ООО «ИНГК» (Искра Нефтегаз Компрессор), АО «ОДК - Газовые турбины», АО «КМПО» и др. Отмечено, что оборудование, производимое данными предприятиями, варьируется от газотурбинных двигателей и агрегатов до газотурбинных установок и электростанций.

4. Представлены методы контроля, используемые при оценке технического состояния ГТУ: акустический, тепловизионный, оптический, вибрационный, ультразвуковой, эмиссионный, радиолокационный, импульсный, ХАРГ в масле, физико-химический анализ масла и др. Все эти методы являются классическими и закреплены в нормативно-технических документах по управлению техническим состоянием оборудования объектов энергетики.

5. Сформированы цели и задачи в отношении автоматизированных систем мониторинга и диагностики состояния ГТУ, обладающих такими функциями, как распознавание зарождающихся дефектов, представление сценария их развития, а также прогнозирование остаточного ресурса ГТУ как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Среди задач следует отметить такие, как последовательный переход от системы ППР к системе ТОиР по фактическому техническому состоянию на основе риск-ориентированного подхода, развитие и унификация нормативно-технических документов в отношении систем мониторинга и диагностики, а также автоматизации процессов в системах управления производственными активами (СУПА).

6. Представлен алгоритм оценки технического ресурса, вероятности отказа и предельного срока эксплуатации оборудования. Отмечено влияние условий эксплуатации (облегченные, базовые, утяжеленные) на предельный срок службы, индекс технического состояния и остаточный ресурс оборудования.

Представлена связь такого параметра, как индекс технического состояния (ИТС), значения которого варьируются в диапазоне от 0 до 1, с качественной характеристикой технического состояния оборудования (критическое, неудовлетворительное, удовлетворительное, хорошее, очень хорошее), где 0 соответствует критическое состояние, а 1 – очень хорошее.

7. Отмечена необходимость автоматизации контроля технического состояния ГТУ, представлены разносторонние аспекты, которые необходимо учитывать при эксплуатации, проведении диагностики и планировании работ по техническому обслуживанию ГТУ, такие как история воздействий на ГТУ, производственные характеристики, планируемые операции на ГТУ и др.

Представлены перспективные технологии организации цифрового контроля, мониторинга и диагностики состояния ГТУ, пришедшие на замену классическим методам контроля, среди которых Интернет вещей, Big Data, виртуальная реальность, технологии искусственного интеллекта и др.

8. Представлены современные системы диагностики и мониторинга состояния ГТУ на примере реализации технических решений, приведенных в следующих патентах:

а) Патент RU 2313815, СИМЕНС АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ, 27.12.2007 «Устройство и способ для контроля технической установки, содержащей множество систем, в частности установки электростанций». В данном патенте применяется динамическая обучаемая модель для прогнозирования выхода из строя элементов объекта, в частности, энергетической установки.

В основе математической модели способа лежит нейронная сеть. Таким образом, взаимодействие между входными данными и субмоделями, построенными на их основе, в процессе эксплуатации установки улучшается, возникает переплетение параметров. Диагностический алгоритм, основанный на искусственном интеллекте, ищет в исторических или мгновенных рабочих, а также структурных параметрах установки взаимосвязи, такие как изменения одних величин, возникающие при изменении других величин. Вновь открытые взаимосвязи интегрируют затем посредством алгоритма, основанного на искусственном интеллекте, в динамическую модель в виде дополнительной графической характеристики и/или уравнении – и улучшают ее за счет этого.

Следует отметить, что недостатком данного решения является использование одной модели, а также принципа построения нейронной сети, для которой необходимы как большие вычислительные мощности, так и непрерывное обучение, обусловленное сложной моделью прогностики, что не позволяет быстро и точно выявлять возможные нарушения в работе ГТУ.

б) Патент US 20160160762, General Electric Company, 09.06.2016 «Система и способ для прогнозирования жизненного цикла работы газотурбинной

установки». Данная система содержит блок анализа технического состояния газовой турбины, определяющий его на основании измеряемых параметров, в частности, температуры, вибрационных показателей и др., которые обрабатываются с помощью физической модели газовой турбины.

Каждому из измеренных и полученных параметров ГТУ присваивается весовой коэффициент, на основании которых осуществляется контроль функционирования, и последующее сравнение с текущими параметрами газовой турбины для подстройки ее работы с целью увеличения жизненного цикла.

К недостаткам разработки можно отнести то, что данное решение не содержит моделирования процесса работы газовой турбины с помощью метода обучаемых моделей на базе эталонных выборок параметров контроля, в частности, техники оценки многомерных состояний MSET (Multivariate State Estimation Technique). Следовательно, это не позволяет быстро и точно определить возможное будущее нарушение в функционировании ГТУ с помощью оперативного обучения ее прогностической модели.

в) Патент RU 2016129046, АО «РОТЕК», 01.08.2017 «Способ и система удаленного мониторинга энергетических установок (СУМиД)». В способе для удаленного мониторинга и прогнозирования состояния технологических объектов, относящихся к турбоагрегатам, получают данные от объекта контроля; формируют на основании этих данных эталонную выборку показателей работы и строят матрицы состояния из компонентов точек выборки. На основании MSET метода с помощью матрицы состояния строят эмпирические модели прогнозирования состояния объекта, определяют по разности компонентов наблюдаемой точки и точки, моделирующей состояние объекта, компоненты невязок, определяют разладки, отображающие степень влияния показателей работы объекта на отклонение величин параметров объекта. Анализируют степень отклонения параметров объекта от показателей эмпирических моделей, выявленные разладки и ранжируют их. Обновляют на основании отфильтрованной выборки эмпирические модели и формируют сигнал отклонения параметра объекта контроля на основании обновленной модели, тем самым повышается точность прогнозирования.

9. Произведено сравнение современных систем мониторинга и диагностики, представленных в вышеуказанных патентах, с автоматизированной системой управления технологическими процессами (АСУ ТП). Выявлено, что по сравнению с АСУ ТП, современные системы диагностики и мониторинга являются инструментами анализа изменений в техническом состоянии объекта, служат не только для предотвращения аварийного события, но и информируют о возможной аварии заранее, обеспечивая возможность вывести объект в ремонт своевременно. Также необходимо отметить, что контроль технического

состояния ГТУ в таких системах осуществляется посредством построения различных функциональных, а также математических моделей (например, нейросетевые) и выполнения определённых алгоритмов на базе «искусственного интеллекта» в отличии от АСУ ТП. В системах АСУ ТП, как правило, контроль технического состояния основан на сравнении текущих значений параметров с их пределами и нормами, или с эталонными энергетическими характеристиками.

10. Рассмотрен один из дефектов, возникающих в синхронном генераторе – однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) в обмотке статора генератора. Отмечено, что данное повреждение является труднопрогнозируемым. Это повреждение в сетях с изолированной нейтралью вызывает перенапряжения на оставшихся двух фазах в статоре генератора, что может вызвать повторные пробои, приводящие к полномасштабному разрушению его обмоток. Перенапряжения опасны и для электроприемников потребителей. Предложено решение по предотвращению разрушений обмоток статора синхронного генератора при ОЗЗ – установка устройства резистивного заземления нейтрали, исключающее возникновение перенапряжений в статоре генератора, минимизируя повреждения при ОЗЗ. Это позволяет своевременно отключить синхронный генератор устройством релейной защиты и предотвратить негативное влияние перенапряжений на электроприемники потребителей.

В качестве примера производителя устройства резистивного заземления нейтрали рассмотрена компания «ЕГЕ-ЭНЕРГАН», описаны преимущества данного оборудования, представлены возможные технические решения.

11. Отмечено, что находящиеся в эксплуатации системы мониторинга и диагностики ГТУ имеют как преимущества, так и недостатки. Обоснована необходимость поиска новых решений в области мониторинга и диагностики ГТУ, дальнейшего изучения их физических, термодинамических и др. свойств для обеспечения их надёжного функционирования в течение срока службы.

В обсуждении доклада и прениях выступили: Илюшин П.В. (председатель секции), Безруких П.П. (РосСНИО), Конопляник А.А. (ООО «Газпром экспорт»), Гельфанд А.М. (НП «НТС ЕЭС»), Папков Б.В. (ГБОУ ВО «НГИЭУ»), «Щепетков С.К. (АО «Техническая инспекция ЕЭС»), Паздерин А.В. (ФГАОУ ВО «УрФУ»), Стенников В.А. (ФГБУН «ИСЭМ СО РАН»), Родионов В.А. (АО «РАСУ»).

Безруких П.П. – Председатель комитета ВИЭ РосСНИО, академик РИА, д.т.н.

Обратил внимание, что при оценке технического состояния оборудования газотурбинных электростанций, вырабатывающих в том числе тепловую

энергию, также должна проводиться оценка технического состояния котла-утилизатора.

Отметил, что при размещении объектов распределенной энергетики на базе газотурбинных установок в изолированных регионах особую важность представляют вопросы газоснабжения данных установок.

Обратил внимание, что по оценке специалистов стоимость систем мониторинга и диагностики должна находиться в диапазоне 3-6% от стоимости оборудования. Однако, в настоящее время для объектов распределенной энергетики небольшой единичной мощности стоимость систем мониторинга и диагностики может достигать до 25%, что зачастую влечет за собой отказ собственников оборудования от ее установки.

Гельфанд А.М. – Заслуженный работник ЕЭС России, член секции АСРЭ и РЭР НП «НТС ЕЭС».

Обратил внимание, что в распределенной энергетике системы мониторинга и диагностики зачастую выполняются индивидуально для каждого из агрегатов, при этом, если станция малоагрегатная, АСУ ТП на данных объектах может не применяться.

Отметил, что для каждого вида оборудования должны существовать типовые методики проведения оценки технического состояния, а непосредственно на объекте распределенной энергетики, на основании типовых методик, должны быть разработаны индивидуальные методики, учитывающие особенности данного объекта.

Обратил внимание, что большинство оборудования и комплектующих, применяемых в системах мониторинга и диагностики ГТУ, зарубежного производства. Требуется разработка и создание отечественных систем мониторинга и диагностики ГТУ, с учетом международного опыта.

Щепетков С.К. – Советник Генерального директора АО «Техническая инспекция ЕЭС».

Отметил, что в ряде случаев в качестве приводных двигателей ГТУ на объектах РЭ применяются авиационные агрегаты, преобразованные в энергетические. В связи с этим ремонт данных агрегатов на объекте либо значительно затруднен, либо возможен только на заводе-изготовителе.

Обратил внимание, что в настоящее время в отечественной энергетике отсутствуют нормативно-технические документы, регламентирующие оснащение объектов распределенной энергетики системами мониторинга и диагностики генерирующих установок, в т.ч. ГТУ.

Отметил, что разработка вышеуказанных нормативно-технических

документов осложнена формой собственности объектов распределенной энергетики.

Паздерин А.В. – заведующий кафедрой «Автоматизированные электрические системы» Уральского федерального университета, профессор, д.т.н.

Обратил внимание, что собственниками объектов распределенной энергетики, как правило, являются крупные промышленные предприятия, поэтому проведение корректной оценки технического состояния генерирующих установок может быть затруднено в связи с отсутствием необходимого опыта у эксплуатационного персонала.

Отметил, что общие принципы и подходы (представленные в докладе методы и алгоритмы) оценки технического состояния газотурбинных установок, также можно использовать при оценке другого электротехнического оборудования: генераторов, трансформаторов, воздушных линий электропередачи и др., с учетом их особенностей.

Папков Б.В. – профессор кафедры «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, профессор, д.т.н.

Отметил, что управление развитием дефекта включает в себя выявление первичных признаков дефекта, контроль изменения данных признаков, и последующее устранение дефекта.

Обратил внимание, что оборудование с дефектом сохраняет частичную работоспособность, поэтому одной из наиболее сложных задач является оценка вероятности отказа оборудования, вследствие наличия дефекта, с целью принятия решения о его выводе в ремонт.

Отметил, что индекс технического состояния для различного электротехнического и тепломеханического оборудования должен учитывать конструктивные особенности оборудования, а также вклад каждого функционального узла в общее состояние агрегата.

Родионов В.А. – Главный эксперт АО «Русатом Автоматизированные системы управления».

Обратил внимание, что крупные газотурбинные установки зарубежного производства оснащены системами мониторинга и диагностики. Кроме того, существуют требования по обеспечению удаленного доступа для персонала службы диагностики завода-изготовителя ко всем входным данным этой системы. Вышеуказанное требование обусловлено наличием гарантийных

обязательств завода-изготовителя на ГТУ, а информация с систем мониторинга и диагностики используется в целях организации контроля за эксплуатацией ГТУ.

Отметил, что одним из подходов к созданию нормативно-технических документов, стандартов и требований в области систем мониторинга и диагностики объектов распределенной энергетики является анализ опыта крупных компаний, в которых имеются нормативно-технические документы по созданию систем мониторинга и диагностики и диагностируемым параметрам.

Илюшин П.В. – Председатель секции «АСРЭ и РЭР», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н.

Обратил внимание, что на газотурбинных электростанциях не всегда применяются котлы-утилизаторы, например, на пиковых газотурбинных установках.

Отметил, что в распределенной энергетике отсутствуют нормативно-технические документы, обязательные к исполнению, учитывающие особенности эксплуатации различных типов генерирующих установок.

Обратил внимание, что частые пуски и остановы газотурбинных установок, а также высокие скорости набора нагрузки приводят к снижению аппаратной и элементной надежности, вследствие воздействия высоких температур в камере сгорания и на первые ступени газовой турбины.

Отметил, что коэффициенты готовности как у газотурбинных, так и у газопоршневых установок объектов РЭ, сопоставимы с коэффициентами готовности крупных газотурбинных и парогазовых установок, однако среднее время между вынужденными отключениями у них существенно меньше, т.е. они отключаются в несколько раз чаще по различным причинам.

Заслушав выступления и мнения экспертов по результатам дискуссии, совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НТК НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **отмечает:**

1. Важность и актуальность поднятого в докладе вопроса построения, эксплуатации и функционирования систем управления, мониторинга и диагностики газотурбинных установок.
2. Целесообразность и перспективность применения систем мониторинга и диагностики газотурбинных установок, в том числе отечественного производства, на объектах распределённой энергетики.
3. Положительное влияние наличия систем мониторинга и диагностики

газотурбинных установок на снижение показателей аварийности объектов распределённой энергетики, а также повышение надёжности и бесперебойности электроснабжения потребителей.

4. Необходимость внедрения программного обеспечения в киберзащищенном исполнении отечественного производства при создании систем мониторинга и диагностики газотурбинных установок, разработки новых алгоритмов и технических решений по мониторингу и диагностике, с учетом международного и отечественного опыта.

5. Обоснованность реализации мониторинга и диагностики не только механической части приводных газовых турбин в составе газотурбинных установок, но и всей генерирующей установки, включая синхронный генератор.

6. Важность и актуальность выбора способа заземления нейтрали синхронных генераторов газотурбинных установок и организации их релейной защиты от однофазных замыканий на землю.

Совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НТК НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **решило:**

1. Рекомендовать ФГАОУ ДПО «ПЭИПК» рассмотреть возможность распространения опыта построения и эксплуатации систем мониторинга и диагностики газотурбинных установок, с элементами адаптации, на объекты распределённой энергетики с газопоршневыми установками.

2. Рекомендовать собственникам объектов распределенной энергетики рассмотреть вопрос поэтапного оснащения системами мониторинга и диагностики эксплуатируемых газотурбинных установок для создания в дальнейшем гибкого ресурса по управлению, мониторингу и диагностике объектов распределённой энергетики.

3. Рекомендовать потенциальным собственникам объектов распределенной энергетики на основании технико-экономического обоснования предусматривать оснащение системами мониторинга и диагностики генерирующих установок на строящихся объектах на стадии их проектирования.

4. Рекомендовать ФГАОУ ДПО «ПЭИПК» организовать проведение научно-технической конференции с привлечением представителей экспертного сообщества из учреждений РАН, АЭН РФ, российских производителей газотурбинных и газопоршневых установок, собственников объектов распределенной энергетики на тему повышения надежности функционирования генерирующих установок за счет применения современных систем управления, мониторинга и диагностики.

5. Рекомендовать ФГАОУ ДПО «ПЭИПК» совместно с Ассоциацией малой энергетики сформировать перечень необходимых к разработке нормативно-технических документов в области систем управления, мониторинга и диагностики объектов распределенной энергетики.

С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил, что применение современных систем мониторинга и диагностики на объектах распределенной энергетики позволяет не только содействовать повышению надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей, но и снижению экономического ущерба от аварий на генерирующих установках, требующих замены дорогостоящих узлов. Кроме того, оснащение газотурбинных установок системами мониторинга и диагностики позволяет своевременно выявлять развивающиеся дефекты, выводить их во внеплановый, а не аварийный ремонт, что влияет как на величину штрафов на оптовом рынке электрической энергии и мощности, так и на показатели надежности данных установок и необходимые объемы резервов мощности в ЕЭС России.

Первый заместитель Председателя Научно-технической коллегии, д.т.н., профессор

_____ В.В. Молодюк

Председатель секции «АСРЭ и РЭР» НП «НТС ЕЭС», ученый секретарь Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике, д.т.н.

_____ П.В. Илюшин

Ученый секретарь Научно-технической коллегии, к.т.н.

_____ Я.Ш. Исамухамедов

Ученый секретарь секции «Активные системы распределения ЭЭ и РЭР» НП «НТС ЕЭС»

_____ Д.А. Ивановский