ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ГЕНЕРАТОРА. СИСТЕМА ПРАНА ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ

АВТОР:

О.А. ЗАХАРОВ
АО «РОТЕК»

Данные мониторинга и диагностики являются основой определения технического состояния высоковольтного оборудования и формирования графиков ремонтов такого оборудования. Мировой опыт показывает, что с точки зрения экономики такой мониторинг целесообразно осуществлять с помощью удаленного онлайн-мониторинга объектов. При этом все узлы генератора могут контролироваться в онлайн-режиме. В настоящее время для каждого узла современного генератора создана соответствующая измерительная база, что позволяет оснастить генераторы датчиками и системами мониторинга и диагностики в любой (по объему контроля) вариации и комплектации.

Ключевые слова: удаленный мониторинг и диагностика; объект наблюдения; уровень автоматизации человекомашинной системы; прямые и косвенные параметры контроля; генератор; ПРАНА.

Современный турбогенератор

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением развития и применения методов технической диагностики и мониторинга применительно к объектам энергетики является уменьшение (устранение) наиболее частых повреждений оборудования, а также повреждений, связанных со значительным недоотпуском электроэнергии. Но, как показывает мировой [1, 2] и российский опыт [3, 4], существующие автоматизированные системы контроля (АСК) технологических параметров энергетического объекта в неполном объеме диагностируют элементы и узлы установок, поздно выявляют дефекты, применяют недостаточно чувствительные методы диагностики, у них отсутствуют возможности прогнозирования технического состояния.

Недостатки и ограниченность существующих систем АСК, а также развитие вычислительной техники, методов обработки данных и алгоритмов машинного обучения сформировали основные направления развития мониторинга и диагностики:

- система онлайн-мониторинга и диагностики — создание и внедрение на практике взаимосвязанного комплекса аналитических действий на базе непрерывного мониторинга и диагностики технических параметров интересующего объекта;
- система обработки баз данных — возможность оперирования сколь угодно большими объемами данных, поступающими с объекта, для реализации сколь угодно разнообразного прикладного контента, в том числе для конечного пользователя;
- ситуационный центр экспертов по направлениям — профильное распределение человеческого ресурса в части экспертной аналитики по конкретным видам оборудования вне зависимости от географии расположения объектов;
- интегрированная система измерений — слияние в единый комплекс функционала следующих элементов:
    - датчиков физических измерений,
    - каналов передачи этих измерений на более высокий уровень,
    - средств конвертации физических измерений в «цифру»,
    - математического аппарата преобразования «цифры» в отчетную визуальную информацию для пользователей различного уровня.

Каждое из этих направлений находит практическое развитие в компании АО «РОТЕК» в рамках реализации системы ПРАНА — автоматизированной информационной системы непрерывного удаленного мониторинга и прогнозирования технического состояния промышленного оборудования, разработанной с целью повышения эффективности работы и снижения эксплуатационных затрат путем перехода от системы проектного производства работ (ППР) к ремонтам по фактическому состоянию. Система в масштабе реального времени осуществляет автоматический сбор и обработку данных от штатного измерительного оборудования систем управления и контроля, а также комплексную поузловую диагностику на основе одной из вариаций метода подобия, анализируя теплотехнические и вибрационные изменения контролируемых параметров. При функционировании системы предусмотрены экспертные оценка допустимости дальнейшей эксплуатации и рекомендации по мероприятиям технического обслуживания и ремонта. (Более подробно о системе ПРАНА и ее методах см. [5].)

В 2016–2020 гг. осуществлены работы по подключению к ПРАНА и оказанию услуг по удаленному мониторингу энергетических объектов. Это позволило уточнить круг задач при реализации систем диагностики и удаленного мониторинга. В частности, как показал опыт мониторинга и диагностики любого энергетического оборудования, качество и оптимальность дальнейшего обслуживания посредством внедренной системы удаленного мониторинга и диагностики (СУМД) ПРАНА напрямую зависит от предпроектного обследования (ППО) объекта наблюдения (ОН). Определены параметры, характеризующие автоматизацию процесса мониторинга и диагностики, объем косвенных показаний для идентификации конкретного дефекта, проблемы недостаточности оснащения приборами контроля некоторого оборудования.

ПРОЦЕСС ПРЕДПРОЕКТНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В общем виде ППО представлен на рис. 1.

ППО одновременно ведется по двум направлениям и аспектам последующего обслуживания:

1) мониторинг, в ходе которого оцениваются имеющиеся архивные данные массивов параметров по объему и типу (сколько и каких аналоговых и дискретных сигналов), глубине ретроспективы (какой временной период записан с приемлемой частотой

ОБЩАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ППО

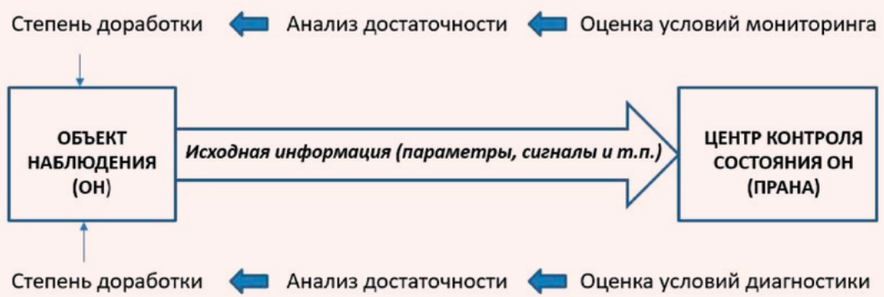


Рис. 1

дискретности и по какому массиву параметров), дискретности передачи сигналов;

2) диагностика, при которой оцениваются данные об особенностях эксплуатации, о режиме работы, графике ремонтов, наличии и/или сроках поставки запасных частей (комплектующих) и сведения об аварийности за прошедший период (оптимально за 3–5 лет).

Специалисты ПРАНА, анализируя данную информацию и учитывая дополнительные пожелания собственника ОН (в форме технического задания), формируют окончательный проект доработки ОН под требуемый горизонт мониторинга и оптимально достаточное оснащение средствами и системами диагностики (в форме технических решений).

Доработка присутствует всегда, так как для ПРАНА необходима сформированная специальным образом АСУ верхнего уровня для ОН, расположенная у собственника. Кроме того, необходимо создание канала передачи данных от ОН до ПРАНА, отвечающего следующим обязательным условиям: защита от постороннего вмешательства и запрет любого воздействия на ОН со стороны ПРАНА. Это так называемая базовая доработка.

Для большинства ОН требуется существенная доработка, включающая в себя как установку дополнительных датчиков и систем мониторинга и диагностики, так и интеграцию информации у собственника на выходе с ОН (до контура АСУ верхнего уровня).

СОЗДАНИЕ ОЦИФРОВАННОГО ОБЪЕКТА НАБЛЮДЕНИЯ

Рисунок 2 иллюстрирует трансформацию первичного ОН в оцифрованный объект в результате реализации технических решений и работы специалистов компании-правообладателя. Именно оцифрованный ОН и является искомым конечным продуктом, на основе которого ПРАНА оценивает техническое состояние ОН и выдает рекомендации по дальнейшей эксплуатации.

ПРОЦЕСС ТРАНСФОРМАЦИИ ОН ДЛЯ ПРАНА

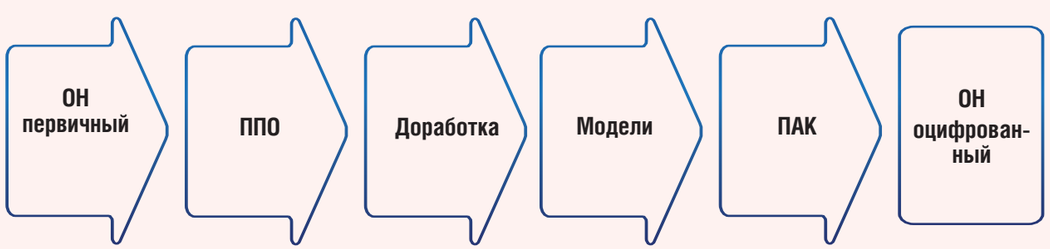


Рис. 2

Блоки «ППО» и «Доработка» упомянуты выше и понятны. Требуют пояснения блоки «Модели» и «ПАК» (программно-аппаратный комплекс).

Блок «Модели» подразумевает процесс формирования эталонных массивов параметров (баз данных, БД) мониторинга ОН для каждого из характерных режимов работы как установившихся (на разных нагрузках), так и переходных (останов, выбег, пуск). При этом следует учесть тот факт, что «эталонность» массива не зависит от первоначального состояния ОН, так как в любой момент времени и на любом этапе эксплуатации можно найти условно-приемлемый срез БД, который будет являться отправной точкой для оценки изменения технического состояния ОН в сторону ухудшения (деградации).

Блок «ПАК» представляет собой математический аппарат, который использует многомерные векторные статистические модели, где для создания эталонной модели применяется метод, основанный на идеологии контрольных Т2-карт Хотеллинга.

ПРАНА — ЧЕЛОВЕКО-МАШИННАЯ СИСТЕМА

ПРАНА представляет собой классическую человекомашинную систему (ЧМС), состоящую из ПАК и технических специалистов по моделиро-

ОСНОВНОЙ ФУНКЦИОНАЛ ЧМС И УРОВЕНЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРАНА НА ТЕКУЩИЙ МОМЕНТ

ПАК: 70–75 %	САЦ: 25–30 %
Выявляет отклонения технического состояния объекта от модели	Фиксирует отклонения и проводит предварительный анализ (отбраковку) необходимости дальнейшего учета и анализа отклонения
Оценивает «тяжесть» и составные части (параметры) отклонения, выявляет основные параметры, которые привели к отклонению от модели	Предварительно оценивает и уточняет причины возникновения отклонения (в том числе при помощи оперативных переговоров с персоналом ОН)
Рассчитывает (при задании дополнительных условий) некоторые возможные сценарии (регрессии во времени, тепловые поля, износ подшипников)	Формирует окончательный анализ произошедшего отклонения с указанием возможных угроз и последствий и направляет рекомендации персоналу ОН в виде информационных сообщений

Таблица 1

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ФУНКЦИОНАЛ ЧМС И УРОВЕНЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРАНА

ПАК: 90 %	САЦ: 10 %
Анализирует входную информацию на наличие, полноту и корректность	Фиксирует отклонения
Блокирует аномальные (некорректные) входные сигналы и/или создает временно заменяющие «квазисигналы»	При необходимости уточняет причины возникновения отклонения (в том числе при помощи оперативных переговоров с персоналом ОН)
Выявляет отклонения состояния модели, определяет необходимость переключения на другую (соответствующую изменившимся условиям) модель, осуществляет это переключение	Формирует и направляет окончательный вариант рекомендации персоналу ОН в виде информационного сообщения
Оценивает «тяжесть» и составные части (параметры) отклонения	
Рассчитывает возможные сценарии, определяет временные отрезки, исходя из степени аварийной угрозы	
Создает предварительный вариант «рекомендации» (заготовки информационного сообщения) для персонала ОН	

Таблица 2

ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕФЕКТОВ ГЕНЕРАТОРОВ

Дефект (подвид)	Прямые параметры	Косвенные параметры
Снижение изоляции обмотки статора	ЧР в обмотке статора. Токи утечки в изоляции на генераторном напряжении	Продукты гидролиза в газе. Термоконтроль узлов генератора
Снижение изоляции обмотки ротора	Сопротивление изоляции цепей возбуждения	Вибрация контактных колец ротора
Витковые замыкания обмотки ротора	Сопротивление обмотки ротора. Электромагнитная индукция	Вибрация подшипников и вала. Термоконтроль узлов генератора
Нарушение паяных соединений обмоток	ЧР в обмотке статора. Радиочастоты	Продукты пиролиза в газе. Примеси меди в охлаждающей воде
Нарушение работы щеточно-контактного аппарата	Вибрация контактных колец ротора. Радиочастоты	Термоконтроль узлов генератора

Таблица 3

ванию, оперативно-диспетчерскому мониторингу и экспертной оценке (САЦ). Для оценки и динамики развития автоматизации ПРАНА предлагается ввести метрику отношения ПАК/САЦ. Табл. 1 характеризует основной функционал ЧМС и уровень автоматизации ПРАНА на текущий момент. Оценка получена на базе опроса экспертов, которые используют систему ПРАНА для мониторинга оборудования.

Одной из задач развития ПРАНА является повышение уровня автоматизации. На основе полученного опыта выделены базовые мероприятия, которые позволят существенно увеличить автоматизацию:

- повышение качества и полноты передаваемой с объекта первичной информации в процессе мониторинга технического состояния агрегатов;
- минимизация «плохих сигналов» с объекта при их появлении за счет фильтрации и временной замены на «квазисигналы»;
- переход на полную автоматизацию процесса смены моделей при изменении режима работы по каждому агрегату с помощью «параметров-маркеров»;
- создание библиотек корреляционных параметров и алгоритмов дорасчета при невозможности прямых измерений.

Реализация этих задач в первую очередь состоит в поиске решений по предварительной обработке данных с помощью статистики и методов машинного обучения. В случае определения их недостоверности происходит временное исключение их из системы мониторинга и прогностики. На основе накопленной статистики отклонений в техническом состоянии объекта экспертами проекта ПРАНА сформированы отличительные признаки недостоверности сигналов в отличие от тех случаев, когда поведение значения параметра характеризует реальное развитие деградаций технического состояния объекта. Работы по автоматизации знаний экспертов планируется завершить в течение 2021 г. Усовершенствование системы ПРАНА приведет, по предварительным оценкам, к повышению уровня автоматизации ЧМС на 15–20 % (табл. 2).

ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ГЕНЕРАТОРОВ

Теперь, когда сделаны необходимые пояснения к методам ПРАНА, перейдем непосредственно к прикладной теме нашей статьи — диагностике генераторов. В настоящее время к ПРАНА подключено 28 турбогенераторов. В основном это генераторы типа ТФ-50, ТФ-63, ТФ-80, ТЗФП-160, ТЗФГ-180, 50WY21Z-095.

Выше было отмечено, что большинство ОН требуют существенной доработки в процессе подготовки «ОН оцифрованный». Для генераторов эта доля достигает 90 %. Без существенной доработки наиболее эффективно и корректно диагностируется состояние системы охлаждения и подшипников скольжения. Для остальных узлов необходимо внедрение дополнительных подходов, связанных и с физическим моделированием, и с машинным обучением, так как мы логично переходим к необходимому разделению параметров мониторинга и диагностики ОН на:

- прямые, т. е. непосредственно зависящие от определенных дефектов и четко указывающие на «очаги» зарождения и/или развития уже имеющихся деградаций;
- косвенные, т. е. требующие создания дополнительных методик и алгоритмов оценки, а также учета коррелирующих факторов по имеющимся параметрам.

Большой интерес вызывает диагностика электромагнитных и электродинамических дефектов. Так как в онлайн-режиме данные дефекты практически не охвачены мониторингом, необходима привязка к косвенным параметрам. Уже существует ряд подобных решений с использованием как физического моделирования [6], так и статистических подходов [7], что дает уверенность в возможности реализации диагностики дефектов на базе косвенных параметров.

В табл. 3 показана взаимосвязь прямых и косвенных параметров основных дефектов (категории «электромагнитные») генераторов.

СУЩЕСТВУЮЩАЯ ПРОБЛЕМАТИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Резюмируя, можно сказать, что, имея данные по термоконтролю и вибрации подшипников и создав необходимый программный «продукт», можно очень точно определять изменения во всех узлах генератора.

Понятно, что использование данного подхода — вынужденная мера, которая призвана нейтрализовать недостатки существующего состояния оснащения генераторов, эксплуатируемых в России, приборами и средствами контроля.

В действительности все узлы генератора могут контролироваться в онлайн-режиме, что иллюстрирует рис. 3. При этом в мировой практике для каждого из узлов создана соответствующая измерительная база, что позволяет оснастить генераторы датчиками и системами

ПРИМЕР МАКСИМАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ВСЕХ УЗЛОВ ГЕНЕРАТОРА В ОНЛАЙН-РЕЖИМЕ С УЧЕТОМ НАЛИЧИЯ СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ БАЗЫ

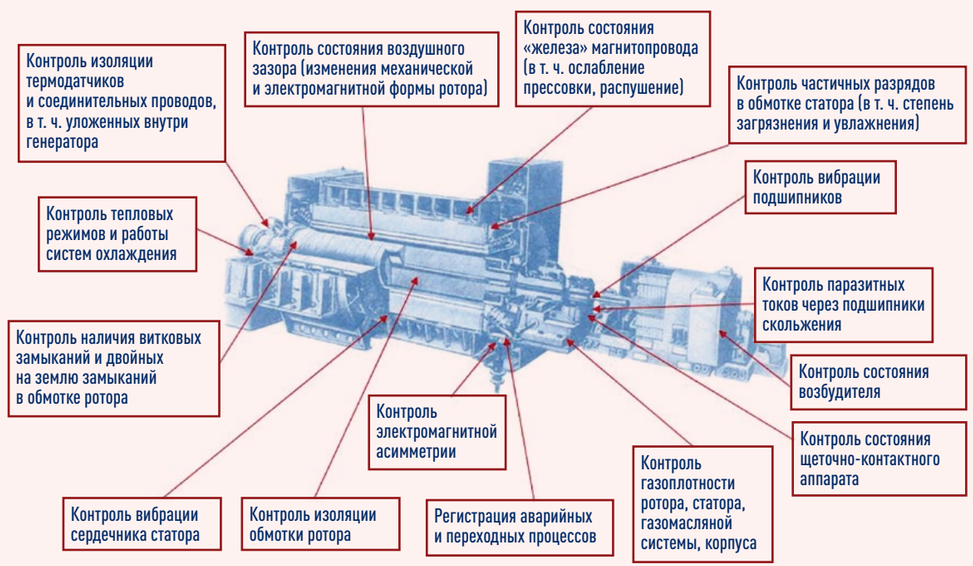


Рис. 3

мониторинга и диагностики в любой (по объему контроля) вариации и комплектации.

На практике при оснащении генераторов приходится учитывать два существенных ограничения:

1) необходимость импортозамещения;

2) нарушение целостности ОН при существенной доработке и соответственно дополнительные затраты на проектирование, монтаж и последующую эксплуатацию систем «диагностической обвязки».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты первых пяти лет реализации проекта по удаленному мониторингу и прогнозированию состояния генераторов позволили на практическом опыте выявить дальнейшие пути развития проекта ПРАНА в области генераторов и сформировать следующие целевые функции на ближайшее время.

1. Взаимодействие и стимулирование развития отечественной базы средств и систем мониторинга и диагностики генераторов.

Примерные технические требования к этим средствам и системам таковы:

- автономность (энергонезависимость) на период не менее одного года;
- встроенная система самодиагностики работоспособности в целом и поэлементно с выдачей звуковых и световых сигналов на автоматизированном рабочем месте (АРМ) оперативно-технического персонала;
- миниатюрность и возможность крепления к любой точке агрегата без конструктивных вмешательств либо иных изменений целостности корпуса и узлов агрегата;
- беспроводная передача значений измеряемых параметров на АРМ оперативно-технического персонала.

2. Совершенствование систем типа BIG DATA, в том числе для применения в полном объеме имеющихся косвенных параметров.

Предлагаются следующие основные базовые мероприятия, позволяющие значительно повысить автоматизацию:

- повышение точности прогнозирования математических моделей за счет внедрения интеллектуальных систем фильтрации данных, в том числе с использованием опыта эксперта по диагностированию недостоверных сигналов;
- интеграция в систему ПРАНА дополнительных инструментов, реализующих физическое моделирование и методы машинного обучения, с целью диагностики дефектов на основе косвенных параметров.

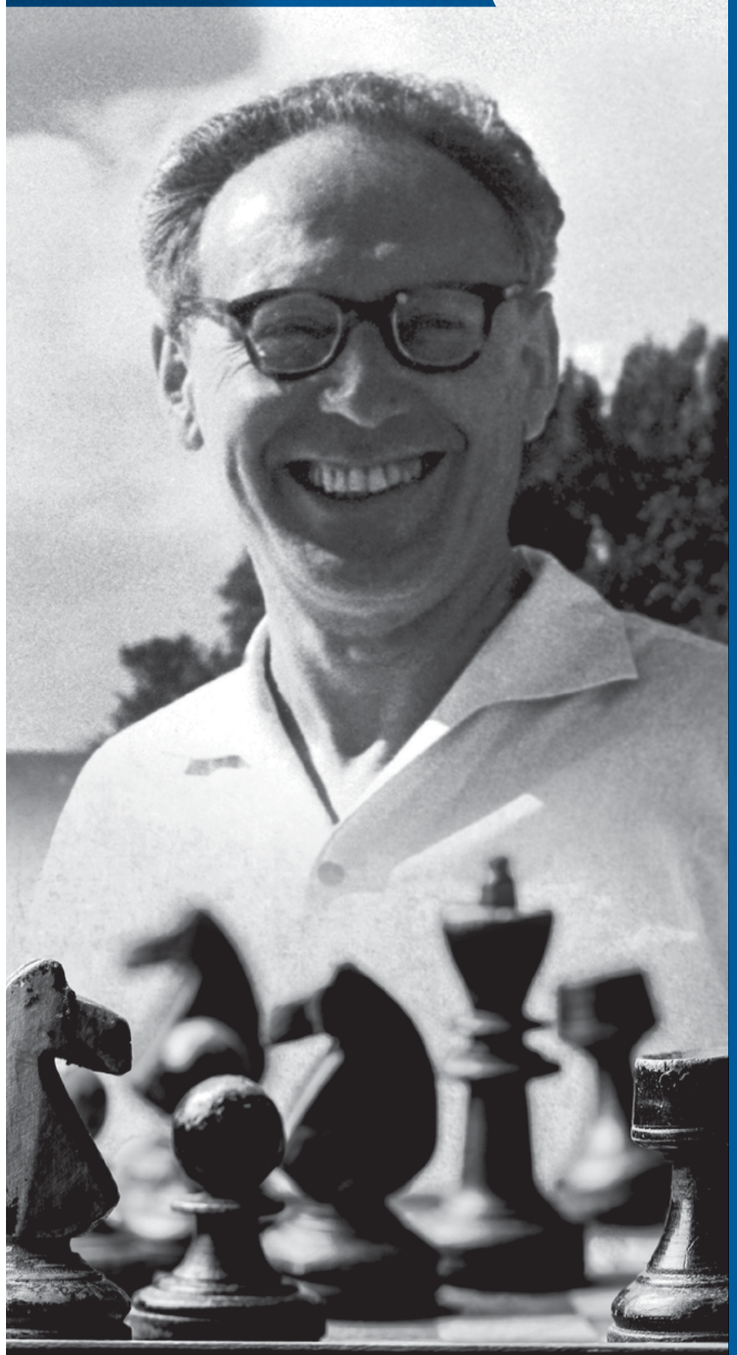
3. Включение на стадии изготовления в техническое задание на изготовление и поставку генераторов обязательного условия по оснащению необходимыми средствами мониторинга и диагностики.

Реализация данных задач, организация удаленных центров мониторинга и прогнозирования по принципу ПРАНА позволит четко, своевременно и объективно оценивать техническое состояние генераторного оборудования как в целом, так и по каждому узлу с выдачей соответствующих рекомендаций по дальнейшей эксплуатации административно-техническому персоналу объектов генерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bembe J.R. Management of condition monitoring and diagnostic technology to optimize large turbo-generator rotor maintenance. PhD thesis. Johannesburg: University of Johannesburg, 2013.
2. Balasubramanian A., Ranganath Muthhu. Model Based Fault Detection and Diagnosis of Doubly Fed Induction Generators — A Review//Energy Procedia. 2017. Vol. 117. P. 935–942.
3. Беляков В.В., Бинько Г.Ф., Виницкий Ю.Д. и др. Перспективы цифровизации контроля текущего технического состояния и развития методов предиктивной диагностики турбогенераторов на электрических станциях//Материалы конференции РНК СИГРЭ, 2019. URL: http://www.cigre.ru/activity/conference/a1/papers/
4. Кузнецов Д.В., Поляков Ф.А., Сокур П.В. Актуальные вопросы разработки методов онлайн-мониторинга и диагностики турбогенераторов при решении задач повышения надежности и продления срока службы//Материалы конференции РНК СИГРЭ, 2019. URL: http://www.cigre.ru/activity/conference/a1/papers/
5. Интернет-ресурс: https://prana-system.com/
6. Jichao Hanab, Ping Zheng. Numerical analysis of end part temperature in the turbogenerator end region with magnetic shield structure under the different operation conditions//International Journal of Thermal Sciences. 2018. Vol. 132. P. 267–274.
7. Pak KinWong, ZhixinYang, ChiManVong, JianhuaZhong. Real-time fault diagnosis for gas turbine generator systems using extreme learning machine//Neurocomputing. 2014. Vol. 128. P. 249–257.

ноябрь 2021



XI
Открытый
шахматный турнир
энергетиков
памяти М. М. Ботвинника

2021

ШАХМАТНЫЙ ТУРНИР ЭНЕРГЕТИКОВ

Приглашаем команды энергетиков поддержать нашу добрую традицию и принять участие в ежегодном открытом шахматном турнире!

Состоится личное и командное первенство по правилам ФИДЕ для быстрых шахмат.

НАБИРАЙТЕ ЧЕТЫРЕХ ИГРОКОВ
И РЕГИСТРИРУЙТЕ КОМАНДУ
НА САЙТЕ ТУРНИРА
WWW.TURNIR.NTC-POWER.RU

реклама