



Modern Approaches to Control the Technical Condition of Electrical Equipment in the Digital Transformation of Energy

Aleksandr NAZARYCHEV¹, Dmitry ANDREYEV²

¹ Petersburg power engineering institute of professional development, Saint-Petersburg, Russia;
e-mail: rector@peipk.spb.ru

² JSC “Zarubezhenergoprojekt”; Ivanovo, Russia;
e-mail: ada_dimon@mail.ru

Abstract

The article deals with topical issues of management of technical condition of electrical equipment. The goals, tasks, existing and prospective digital technologies for solving problems of technical condition management are described. Their influence on technical and corporate management processes is shown.

Keywords: Electrical equipment, technical condition, digital technologies, process control

Современные подходы управления техническим состоянием электрооборудования в условиях цифровой трансформации энергетики

Александр НАЗАРЫЧЕВ, Дмитрий АНДРЕЙЕВ

Техническая политика компаний энергетической отрасли направлена на обеспечение надежности и безопасности работы электрооборудования (ЭО), особенно это становится актуальным в условиях принятого курса на цифровую трансформацию энергетики [1]. Цель цифровой трансформации – изменение логики технологических процессов и переход энергетики на риск-ориентированное управление на основе внедрения цифровых технологий и анализа больших объемов данных. Основные задачи при реализации концепции цифровой трансформации заключаются в следующем:

1. Адаптировать компаний к новым условиям и возникающим вызовам.
2. Обеспечить надежное электроснабжение потребителей.
3. Повысить эффективность эксплуатации объектов энергетики.
4. Увеличить доступности электросетевой инфраструктуры.
5. Совершенствовать и развивать кадровый потенциал энергетики.
6. Диверсифицировать бизнес энергокомпаний за счет создания дополнительных сервисов.

В основу концепции цифровой трансформации энергетики положены следующие основные принципы:

- обеспечение наблюдаемости объектов энергетики и ведения режимов их работы;
- автоматизация управления технологическими и корпоративными процессами;
- применение принципов автоматизированного риск-ориентированного управления;
- построение цифровой СИМ-модели по единому отраслевому стандарту и информационное взаимодействие со всеми контрагентами субъектов электроэнергетики;

- интеграция и объединение информационных, технологических и корпоративных систем на различных иерархических уровнях управления.

Решение задач на основе приведенных принципов невозможно без определения фактического технического состояния (ТС) ЭО. Определяющее влияние на степень износа ЭО оказывают эксплуатационные факторы, которые действуют в различных условиях и режимах работы. Они приводят к развитию и накоплению дефектов, и к более раннему наступлению предельного состояния и отказу ЭО. Для обеспечения безопасной и эффективной работы, при управлении режимами эксплуатации и ремонта необходимо знать фактический уровень надежности ЭО с учетом воздействия реальных эксплуатационных факторов. Воздействуя на режимы и условия работы, а также применяя современные методы оценки ТС оборудования, можно эффективно и безопасно управлять процессом эксплуатации ЭО [2]. Поэтому актуальна разработка методов количественной оценки и прогнозирования показателей эксплуатационной надежности, позволяющих учесть основные факторы, влияющие на износ ЭО и с учетом этого выполнять активно – адаптивное управление ТС в рамках концепции цифровой трансформации.

В настоящее время для поддержания ТС ЭО как правило применяют систему планово-предупредительного ремонта (ППР), которая не всегда обеспечивает принятия оптимальных решений. Существующая система ППР в энергетике имеет существенные недостатки и не может обеспечивать надежность ЭО при возрастающих темпах его износа. Это объясняется тем, что система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) осуществляется без учета фактического ТС ЭО; планы-графики ППР не устанавливают приоритета вывода в ремонт ЭО; не учитываются технологические, материальные, временные, трудовые ограничения, не предусматривается рациональное управление процессом эксплуатации и более полное использование ресурса каждой единицы ЭО. Все это приводит к ухудшению технико-экономических показателей энергообъектов и снижению эксплуатационной надежности ЭО. В связи с этим действующая система ТОиР нуждается в совершенствовании на основе разработки системы ремонта с учетом фактического ТС ЭО [3].

Анализ существующих методов и средств технической диагностики ЭО показал, что их современный уровень и перспективы развития открывают реальные возможности применения стратегии ТОиР по ТС [4]. Наибольший эффект от использования такой системы достигается при эксплуатации сложного оборудования, ремонт которого связан с большими затратами, а отказ вызывает значительный ущерб. Основным принципом системы ТОиР по ТС является индивидуальное наблюдение за диагностическими параметрами, характеризующими ТС ЭО в процессе эксплуатации. Такая система ТОиР представляет собой совокупность правил, обеспечивающих заданное управление эксплуатацией ЭО на основе контроля его уровня надежности и ТС. В настоящее время разработана законодательная база по управлению ТС ЭО объектов энергетики [5, 6, 7, 8] на основе существующих методов контроля ТС. Наиболее часто используемые в энергетике методы контроля электрооборудования:

- акустический контроль;
- тепловизионный контроль;
- оптический контроль;
- вибрационный контроль;
- ультразвуковой контроль;
- эмиссионный контроль;
- радиолокационный контроль;
- импульсный контроль;
- ХАРГ в масле;

- контроль электрических параметров и анализ
- гармоник тока и напряжения;
- физико-химический анализ масла;
- контроль по интенсивности частичных разрядов.

Задачи функционирования цифровой ЭЭС должны в себя включать:

- анализ топологии и расчет установившегося режима в ЭЭС;
- автоматический расчет показателей надежности ЭО и схем электрических соединений объектов энергетики;
- выявление дефектов в ЭО подстанций и линий электропередач;
- дистанционное управление оперативными переключениями в нормальном и аварийном режимах в том числе из диспетчерских центров;
- автоматическое регулирование напряжения;
- автоматизированное снижение и восстановление нагрузки, в том числе по командам из ОДУ;
- перераспределение нагрузки путем реконфигурации распределительной сети;
- сглаживание «пиков» нагрузки в распределительной сети;
- управление устранением неисправностей;
- самодиагностика и самовосстановление после сбоев в работе отдельных элементов;
- управление распределенной генерацией для объектов, не отнесенных к объектам диспетчеризации.

Элементом ситуационного управления верхнего уровня является ситуационно-аналитический центр (САЦ). Основным элементом САЦ является ситуационно-аналитическая панель, созданная посредством интеграции технологических и корпоративных информационных систем на основе единой цифровой модели сети (СІМ). Существующие и перспективные цифровые технологии представлены в таблице 1 [1].

Таблица 1. Существующие и перспективные цифровые технологии

Решения	Существующие (2019-2024)	Перспективные (2025-2030)
Информационные системы управления	ADMS-системы с поддержкой функционала: SCADA, DMS, EMS, OMS, GIS, AMI, WFM, базирующиеся на модель сети с процессором топологий.	Сетецентрические двухконтурные онлайн и офлайн системы поддержки принятия решений (включая цифровое проектирование) цифровой сетевой компании, основанные на онтологии бизнес-процессов деятельности и математической модели сети как единой шины данных с элементами искусственного интеллекта (включая предиктивную риск-ориентированную аналитику).
Цифровые подстанции	Различные архитектуры построения вторичных цепей защит и автоматики (централизованной, распределенной, комбинированной) с применением протокола IEC 61850. Преимущественно с традиционной архитектурой	Компактные Plug-n-Play центры питания, работающие преимущественно с применением цифровых каналов связи. Вероятно, иной архитектуры по первичным цепям, не требующие специальной длительной наладки при вводе в эксплуатацию, выполненные по цифровым проектам. Имеющие в своем составе интеллектуальное

	вторичных цепей. На существующих технических решениях в части коммутационного, измерительного и распределительного оборудования, терминалов защит и автоматики.	коммутационное оборудование, цифровые системы измерений и контроллеры присоединений (интегрированные функции защит и автоматики, учета и передачи данных), вероятно не требующие индивидуальной настройки системы предиктивной диагностики.
Системы автоматизации процессов ликвидации аварий воздушных (кабельных) сетей	Преимущественно распределенная автоматизация воздушных сетей с применением автоматических пунктов секционирования, управляемых разъединителей и индикаторов короткого замыкания. Централизованная (с применением индикаторов аварийных событий) автоматизация кабельных сетей. С интеграцией в ADMS-системы.	Адаптивные автокластерные (состоящие из элементарных автоматизированных ячеек) сети оптимальной топологии, рассчитанной с применением цифровых моделей сети, с интеллектуальными автоматическими устройствами (не требующими индивидуальных настроек), а также неавтоматическими, необслуживаемыми делителями сети, интегрируемые в онлайн и офлайн системы поддержки принятия решений.
Интеллектуальные системы учета и энергомониторинга	Системы АИИС КУЭ (АМИ) и интеллектуальные приборы учета электроэнергии. Системы энергомониторинга узлов нагрузки на границах балансовой принадлежности и узлах нагрузки сетей. С интеграцией в соответствующие задачи ADMS-систем.	Интеллектуальные системы энергомониторинга и управления энергопотреблением. Измерительные контроллеры на уровне конечных потребителей, поддерживающие технологии промышленного интернета вещей (в части передачи данных), с интеграцией в онлайн и офлайн системы поддержки принятия решений, а также, вероятно, технологии распределенных реестров для реализации смарт контрактов. Измерительные контроллеры энергомониторинга.

Перспективные технологии для цифровой трансформации энергетики

- Технологии интеллектуального учета электроэнергии;
- Интернет вещей;
- Большие данные (Big Data);
- Цифровые двойники;
- Технологии визуального восприятия и принятия решений;
- Дистанционное сканирование для создания 3D моделей элементов сети;
- Виртуальная реальность (симуляция 3D изображения);
- Дополненная реальность;
- Технологии искусственного интеллекта;
- Распределенный реестр (Blockchain);
- Машинное обучение.

Рассмотрим отдельные технологии цифровой трансформации, возможное влияние и эффекты от применения в энергетике таблице 2 [1].

Таблица 2. Возможное влияние и эффекты от применения перспективных цифровых технологий в энергетических компаниях

Технология	Возможное влияние	Эффекты
Онтологические модели деятельности (Business Ontology)	Постепенная цифровизация (оптимизация) деятельности по основным бизнес-процессам компании.	Снижение себестоимости всех бизнес-процессов компании.
Цифровые двойники (Digital Shadows)	В рамках развития онлайн и офлайн систем поддержки принятия решений создание математических моделей сети, объектов и процессов.	Снижение операционных затрат и развитие новых видов бизнеса для компании.
Промышленный интернет вещей (IoT)	Существенное снижение CAPEX и OPEX на сбор данных от удаленных объектов и устройств в сети, в том числе качественное увеличение объема этих данных.	Снижение операционных затрат и развитие новых видов бизнеса для компании.
Большие данные (Big Data)	Существенное повышение прозрачности деятельности, качественное насыщение данными онлайн и офлайн систем поддержки принятия решений.	Оптимальность принятия решений по оперативной и перспективной обстановке. Дополнительные эффекты за счет общей обработки технологических и корпоративных данных.
Машинное обучение (Machine Learning)	Автоматизированная обработка массивов данных в рамках задач онлайн и офлайн систем поддержки принятия решений при наличии соответствующих математических алгоритмов.	Оптимальность принятия решений по оперативной и перспективной деятельности.
Распределенные реестры (Blockchain)	Исключение посредников в цепочке реализации кВт.ч до конечного потребителя, переход на автоматизированные Smart-контракты, развитие сервиса для активных потребителей и распределенной энергетики.	Развитие новых видов сервисов (бизнеса) сетевых компаний для субъектов рынка.

Разработка нормативно-методического обеспечения в части развития системы управления ТС ЭО включает в себя:

- Методика оценки интегрального показателя технического состояния (ИПТС).
- Методика определения последствий отказа электрооборудования (ЭО).
- Методика определения вероятности отказа ЭО с учетом ИПТС.
- Методика расчета ресурса ЭО с учетом ИПТС.
- Методика оценки уровня риска с учетом ИПТС ЭО.
- Методика приоритизации ЭО для целей организации ТОиР и ТПиР.
- Методика оценки стоимости жизненного цикла (ЖЦ) ЭО.
- Методика планирования сроков ТОиР с учетом ИПТС, оценки последствий отказов, рисков и приоритизации ЭО.
- Методика планирования объемов ТОиР с учетом ИПТС, оценки последствий отказов, рисков и приоритизации ЭО.
- Методика расчета затрат на ТОиР.
- Методика оценки предельных сроков эксплуатации ЭО с учетом ИПТС.

- Методика планирования объемов ТПиР в части замены ЭО с учетом рисков и стоимости жизненного цикла
- Методика расчета затрат на ТПиР в части замены ЭО.

Влияние цифровых технологий на технологические и корпоративные процессы управления ТС ЭО приведена в таблице 3 [1].

Таблица 3. Влияние цифровых технологий на технологические и корпоративные процессы управления ТС ЭО

Процессы	Технологии	Эффекты
Оказание услуг по передаче электроэнергии	Технологии интеллектуального учета электроэнергии Интернет вещей (IoT) Big Data Технологии визуального восприятия и принятия решений Технологии искусственного интеллекта Распределенный реестр (Blockchain)	Снижение потерь электроэнергии Повышение эффективности капитальных и операционных затрат (ОРЕХ/CAPEX) Повышение надежности Дополнительные сервисы для потребителей
Технологическое присоединение	Цифровые двойники Интернет вещей (IoT) Big Data Технологии визуального восприятия и принятия решений Технологии искусственного интеллекта	Сокращение сроков технологического присоединения Сокращение ОРЕХ
Оперативно-технологическое и ситуационное управление	Цифровые двойники Технологии визуального восприятия и принятия решений Технологии искусственного интеллекта Big Data Технологии интеллектуального учета электроэнергии	Повышение надежности Возможность предиктивного информирования о появлении угрозы отключения электросетевого оборудования
Техническое обслуживание и ремонты / Техническое перевооружение и реконструкция	Цифровые двойники Big Data Дистанционное сканирование для создания 3D моделей элементов сети Дополненная реальность Виртуальная реальность (симуляция 3 D изображения или полноценной среды)	Повышение эффективности капитальных и операционных затрат (ОРЕХ/CAPEX) Повышение адаптивности Повышение надежности
Инвестиционная деятельность	Big Data	Сокращение CAPEX Повышение прозрачности формирования инвестиционных программ Создание системы контроля за реализацией инвестиционных программ в автоматизированном режиме
Капитальное строительство	Цифровые двойники Big Data	Сокращение CAPEX; Повышение адаптивности Создание системы контроля за реализацией инвестиционных

	Виртуальная реальность (симуляция 3 D изображения или полноценной среды)	программ в автоматизированном режиме
Финансы, экономика и бухгалтерский учет	Big Data	Автоматизированное формирование отчетности Создание системы контроля за реализацией бизнес-планов Повышение адаптивности
Закупочная деятельность	Big Data Технологии искусственного интеллекта	Автоматический расчет усредненных нормативов цен Оптимизация процесса подготовки и размещения закупочных процедур Подведении итогов конкурсных процедур на основе технологии искусственного интеллекта
Управление рисками	Big Data Технологии искусственного интеллекта	Автоматическое формирование реестра рисков и их влияние на бизнес Онлайн мониторинг рисков Рекомендации по нивелированию рисков
Правовое обеспечение	Big Data Технологии искусственного интеллекта	Повышение адаптивности
Управление собственностью	Big Data Технологии искусственного интеллекта	Повышение адаптивности
Система управления производственными активами	Цифровые двойники Big Data Технологии искусственного интеллекта	Автоматический расчет индекса технического состояния и отклонений по нему Повышение адаптивности Жизненный цикл оборудования в цифровом виде Автоматическое формирование планов ТОиР и Тпир
Реализация услуг	Big Data Технологии искусственного интеллекта Распределенный реестр (Blockchain)	Повышение доступности (уменьшение срока технологического присоединения) Новые сервисы для потребителей
Логистика	Big Data Технологии искусственного интеллекта Распределенный реестр (Blockchain)	Повышение эффективности операционных затрат (ОРЕХ) Повышение адаптивности

Основные эффекты от реализации концепции цифровой трансформации дадут возможность энергетическим компаниям отрасли более эффективно реализовывать инвестиционные программы и увеличивать доходность своего бизнеса. Кроме того [1], обеспечение готовности инфраструктуры к развитию новых вызовов, повышение параметров качества и надежности энергоснабжения потребителей, а также:

- увеличение скорости и качества принятия решений на всех уровнях управления компании;
- снижение потерь за счет своевременного выявления бездоговорного и неучтенного потребления электроэнергии;

- сокращение издержек на текущую эксплуатацию оборудования (ОРЕХ) – переход от планового ремонта к ремонту по состоянию;
- оптимизация логистики поставки оборудования;
- повышение уровня компетенции персонала.

У потребителей ожидается повышение качества и доступности услуг по передаче электрической энергии и технологическому присоединению, а также возможность участия в регулировании собственного потребления.

Таким образом, реализацию концепции цифровой трансформации в энергетике следует рассматривать как комплексное решение проблемы управления ТС ЭО объектов электроэнергетики. Решение поставленных задач имеет существенное значение для перехода к системе ТОиР ЭО по ТС, а также управления процессом его эксплуатации в зависимости от полученных значений показателей надежности при воздействии эксплуатационных факторов в различных условиях и режимах функционирования. Научно-практическое значение решения этих задач будет состоять в создании моделей, алгоритмов и компьютерных программ, направленных на обеспечение надежности и безопасности эксплуатации ЭО объектов энергетики путем совершенствования системы ТОиР и процесса эксплуатации на основе учета фактического ТС ЭО, определяемого средствами диагностирования.

Литература

1. Концепция «Цифровая трансформация 2030» ПАО «Россети».
2. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методические основы определения предельных сроков эксплуатации и очередности технического перевооружения энергообъектов. – Иваново: Иваново. гос. ун-т. 2005. – 168 с.
3. Назарычев А.Н., Таджибаев А.И., Андреев Д.А. Совершенствование системы проведения ремонтов электрооборудования электростанций и подстанций. – СПб.: ПЭИПК, 2004. – 64 с.
4. Назарычев А.Н., Таджибаев А.И. Модели расчета эксплуатационной надежности и управления техническим состоянием электрооборудования. – СПб.: ПЭИПК, 2002. – 39 с.
5. Постановлением Правительства Российской Федерации от 19.12.2016 г. № 1401 "О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и порядка осуществления мониторинга таких показателей" (Собрание законодательства Российской Федерации, 2016, N 52, ст. 7665).
6. Приказ Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676 "Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей".
7. Приказ Минэнерго России от 25 октября 2017 г. № 1013 «Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики»
8. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалёв и др. – М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. – 304 с.