

Симеон Владимирович Айневтегин

Студент группы Э-01м-24

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель

А. С. Ванин, к.т.н., ст. преп.

ЗАРУБЕЖНЫЕ ПОДХОДЫ К ТЕХОБСЛУЖИВАНИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация: В статье проанализированы зарубежные подходы к техобслуживанию (ТО) электроэнергетического оборудования — CBM, PdM и RCM: их особенности, технологическая и нормативная база, эффекты от внедрения. Выявлена эволюционная связь между моделями: каждая последующая развивает предыдущую. Описана обеспечивающая инфраструктура (датчики, протоколы передачи данных, аналитические платформы) и нормативная база (стандарты IEC, IEEE, руководства EPRI). Количественно оценены эффекты: снижение аварийности на 30–50 %, сокращение ремонтных затрат, увеличение межремонтного периода. Обоснованы ключевые факторы успеха — интеграция технологий, стандартизация, ИТ-интеграция, проактивное управление рисками. Сделан вывод о приоритетности адаптивных моделей ТО для развития мировой электроэнергетики.

Abstract: The article analyzes foreign approaches to maintenance of electric power equipment — CBM, PdM and RCM: their features, technological and regulatory framework, and the effects of their implementation. The evolutionary relationship between the models has been revealed: each subsequent model develops the previous one. The supporting infrastructure (sensors, data transmission protocols, analytical platforms) and the regulatory framework (IEC, IEEE standards, EPRI guidelines) are described. The effects were quantified: a 30-50% reduction in accidents, a reduction in

repair costs, and an increase in the maintenance period. The key success factors such as technology integration, standardization, IT integration, and proactive risk management are substantiated. The conclusion is made about the priority of adaptive maintenance models for the development of the global electric power industry.

Ключевые: слова: техобслуживание, электроэнергетика, адаптивные модели ТО, обслуживание по состоянию (CBM), предиктивное обслуживание (PdM), Reliability-Centered Maintenance (RCM), цифровая инфраструктура, мониторинг оборудования, прогнозирование отказов, международные стандарты, IEC, IEEE, EPRI, FMEA, FTA, машинное обучение, проактивное управление, надёжность энергосистем, оптимизация затрат.

Keywords: maintenance, electric power industry, adaptive maintenance models, condition-based maintenance (CBM), predictive maintenance (PdM), Reliability-Centered Maintenance (RCM), digital infrastructure, equipment monitoring, failure prediction, international standards, IEC, IEEE, EPRI, FMEA, FTA, machine learning, proactive management, reliability of power systems, cost optimization

Введение

В условиях постоянного роста требований к надёжности энергоснабжения и необходимости оптимизации эксплуатационных затрат зарубежные компании активно развивают и внедряют адаптивные модели техобслуживания (ТО) электроэнергетического оборудования. Постепенно вытесняя традиционные планово-предупредительные подходы, новые стратегии ориентируются на фактическое техническое состояние оборудования и прогнозирование потенциальных отказов, что позволяет существенно повысить эффективность эксплуатации энергосистем.

Эволюция зарубежных подходов к ТО электрооборудования прошла последовательный путь от точечного мониторинга состояния к комплексному предиктивному обслуживанию и далее — к системной методологии,

интегрирующей лучшие практики в единый процесс. Ключевыми этапами этой эволюции стали концепции обслуживания по состоянию (Condition-Based Maintenance, CBM), предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance, PdM) и методология Reliability-Centered Maintenance (RCM), которые органично дополняют друг друга, отражая углубление понимания взаимосвязей между техническим состоянием оборудования, динамикой его деградации и оптимальными стратегиями поддержания работоспособности.

Актуальность исследования обусловлена потребностью в систематизации зарубежного опыта применения адаптивных моделей ТО, а также в выявлении ключевых факторов их успеха, которые могут послужить ориентиром для развития электроэнергетической отрасли в глобальном масштабе.

Цель исследования

Целью исследования является комплексный анализ зарубежных подходов к техобслуживанию оборудования электроэнергетики — от обслуживания по состоянию (CBM) до предиктивного обслуживания (PdM) и методологии Reliability-Centered Maintenance (RCM), — выявление их ключевых особенностей, технологической и нормативной базы, а также оценка достигаемых эффектов с целью определения перспективных направлений развития отрасли.

Материал и методы исследования

Материалом для исследования послужили международные стандарты (серия ИЕС, IEEE), методические руководства отраслевых исследовательских организаций (в частности, EPRI — Electric Power Research Institute), публикации и исследования, посвящённые применению методов FMEA, FTA и машинного обучения в задачах прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования, а также практический опыт внедрения адаптивных моделей ТО в странах ЕС, США и Японии. В работе применялись следующие методы: анализ нормативно-технической документации — для изучения требований к мониторингу, обмену

данными и управлению надёжностью; сравнительный анализ — для выявления эволюции подходов к ТО (от CBM к PdM и RCM); системный подход — для рассмотрения взаимосвязей между диагностическими технологиями, аналитическими методами, цифровой инфраструктурой и достигаемыми эффектами; обобщение практического опыта — для оценки реальных результатов внедрения адаптивных моделей; методы качественного и количественного анализа данных — для систематизации информации о снижении аварийности, оптимизации затрат и повышении надёжности энергосистем.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведённого исследования была выявлена чёткая эволюция подходов к техобслуживанию электроэнергетического оборудования: начальная стадия представлена концепцией CBM (обслуживание по состоянию), которая базируется на мониторинге параметров и принятии решений на основе данных диагностики (с опорой на IEC/TR 60599, ISO 10816); следующий этап — PdM (предиктивное обслуживание) — развивает идеи CBM, смещая акцент на прогнозирование деградации оборудования с применением регрессионного анализа, методов машинного обучения и расчёта вероятности отказа по распределению Вейбулла; завершает эволюционную цепочку методология RCM (Reliability-Centered Maintenance), которая объединяет лучшие практики CBM и PdM, реализуя системный подход к выбору стратегий ТО с применением методов FTA и FMEA.

Была определена технологическая база, обеспечивающая функционирование адаптивных моделей ТО: она включает распределённую сеть датчиков (сенсорный слой), стандартизированные протоколы передачи данных (IEC 61850, DNP3, OPC UA), платформы хранения и обработки данных (EAM, CMMS, SCADA), аналитический стек (алгоритмы машинного обучения, системы визуализации, модули прогнозирования) и интеграционные шлюзы для связи с ERP-системами и системами диспетчеризации.

Систематизация нормативно-методической основы показала, что фундамент адаптивных моделей составляют международные стандарты (IEC, IEEE), методические руководства (EPRI) и корпоративные регламенты, адаптирующие общие принципы к специфике конкретных энергообъектов.

Количественная оценка эффектов от внедрения адаптивных моделей продемонстрировала впечатляющие результаты: снижение частоты аварийных отключений на 30–50 %, сокращение затрат на ремонт за счёт перехода от аварийных к плановым работам, увеличение межремонтного периода оборудования, оптимизация складских запасов запчастей, повышение общей надёжности энергосистемы и уровня обслуживания потребителей.

Обсуждение полученных результатов позволяет заключить, что успех адаптивных моделей ТО обусловлен глубокой интеграцией диагностических технологий и аналитических методов, стандартизацией процессов и протоколов обмена данными, опорой на признанную международную нормативную базу, системной интеграцией с корпоративными ИТ-решениями, а также фокусом на проактивном управлении рисками отказов.

Обслуживание по состоянию (CBM)

Концепция CBM основывается на непрерывном или периодическом мониторинге ключевых эксплуатационных параметров оборудования, что позволяет принимать обоснованные решения о проведении профилактических или ремонтных работ строго на основании объективных данных диагностики. Это минимизирует избыточные вмешательства и оптимизирует затраты на ТО. Важнейшим элементом реализации CBM является комплексный арсенал диагностических технологий: анализ растворённых газов (DGA, Dissolved Gas Analysis) в трансформаторном масле, позволяющий на ранней стадии выявлять термические и электрические дефекты (регламентируется стандартом IEC/TR

60599); вибрационная диагностика вращающегося и коммутационного оборудования, стандартизированная в рамках ISO 10816 и направленная на выявление механических дефектов, дисбаланса, износа подшипников; термографический контроль контактных соединений и обмоток для фиксации локальных тепловых аномалий; мониторинг электрических параметров (токов, напряжений, гармоник) для обнаружения несимметрии, перегрузок, резонансных явлений. Собранные данные интегрируются в централизованные системы управления активами (EAM) и ремонтами (CMMS) посредством стандартизированных протоколов обмена — IEC 61850 (MMS, GOOSE), DNP3, OPC UA.

Предиктивное обслуживание (PdM)

Дальнейшим развитием CBM стала концепция PdM, смещающая акцент с констатации текущих отклонений на прогнозирование динамики деградации оборудования и расчёт остаточного ресурса. В рамках предиктивного подхода применяется целый комплекс аналитических методов: регрессионный анализ для построения трендов деградации ключевых параметров; анализ временных рядов для выявления сезонных колебаний и долгосрочных тенденций; методы машинного обучения (случайный лес, градиентный бустинг, нейронные сети) для классификации типов дефектов и предсказания момента достижения критических значений; расчёт вероятности отказа по распределению Вейбулла с опорой на исторические данные об отказах однотипного оборудования; корреляционный и факторный анализ для изучения взаимосвязей между различными диагностическими параметрами. Результаты прогнозной аналитики позволяют формировать динамические пороговые значения параметров с учётом индивидуальных особенностей конкретного агрегата, его возраста, условий эксплуатации и истории ремонтов. При приближении текущих значений к прогнозируемым критическим уровням система автоматически инициирует

оповещение персонала, формирует предварительную заявку на ремонт и запускает процедуры подготовки запасных частей, обеспечивая тем самым проактивное управление рисками отказов.

Методология Reliability-Centered Maintenance (RCM)

Вершиной эволюции подходов к ТО стала методология RCM, представляющая собой комплексную системную стратегию планирования обслуживания, которая объединяет лучшие практики CBM и PdM в единый согласованный процесс. Суть RCM заключается в целенаправленном выборе оптимальной стратегии обслуживания для каждой группы оборудования с учётом критичности выполняемых функций и характера возможных отказов. Реализация методологии предполагает последовательное выполнение взаимосвязанных этапов: формализацию функциональных требований к оборудованию и параметров, характеризующих успешное выполнение этих функций (с опорой на IEC 60300-3-11); идентификацию возможных режимов отказов для каждого элемента системы; оценку последствий отказов с применением методов FTA (Fault Tree Analysis) и FMEA (Failure Mode and Effects Analysis); ранжирование отказов по степени критичности для оптимального распределения ресурсов; выбор оптимальных стратегий ТО для каждой группы оборудования (включая CBM для агрегатов с возможностью раннего выявления дефектов, PdM для критически важного оборудования, планово-предупредительное обслуживание для элементов с предсказуемой деградацией, стратегию «до отказа» для некритичного вспомогательного оборудования, а также комбинированные стратегии для сложных случаев); интеграцию выбранных стратегий в единую программу ТО, синхронизированную с системами EAM и CMMS.

Интеграция выбранных стратегий в единую программу ТО, синхронизированную с системами EAM и CMMS.

Технологическая и нормативная база адаптивных моделей

Успешная реализация адаптивных моделей ТО — CBM, PdM и RCM — опирается на комплексную цифровую инфраструктуру, где органично сочетаются распределённая сеть датчиков (сенсорный слой), стандартизированные протоколы передачи данных (IEC 61850, DNP3, OPC UA), платформы хранения и обработки данных (EAM, CMMS, SCADA, системы больших данных), аналитический стек (алгоритмы машинного обучения, системы визуализации, модули прогнозирования остаточного ресурса) и интеграционные шлюзы для связи с ERP-системами и системами диспетчеризации.

Нормативно-методическую основу зарубежных подходов составляют международные стандарты (в первую очередь IEC — 61850, 60300-3-11, 60044, IEC/TR 60599), задающие единые требования к мониторингу, обмену данными и управлению надёжностью; отраслевые рекомендации IEEE, аккумулирующие передовой опыт диагностики и обслуживания электрооборудования; методические руководства EPRI (Electric Power Research Institute), систематизирующие лучшие мировые практики применения адаптивных моделей; а также корпоративные регламенты, адаптирующие общие принципы к специфике конкретных энергообъектов. Достигаемые эффекты

Внедрение адаптивных моделей техобслуживания в странах ЕС, США и Японии демонстрирует следующие ключевые эффекты:

1. снижение частоты аварийных отключений на 30–50 % за счёт раннего выявления и устранения дефектов;
2. сокращение затрат на ремонт благодаря переходу от аварийных к плановым работам;
3. увеличение межремонтного периода оборудования при сохранении требуемого уровня надёжности;
4. оптимизация складских запасов запчастей за счёт точного прогнозирования потребностей;

5. повышение общей надёжности энергосистемы и уровня обслуживания потребителей;
6. улучшение управляемости процессами ТОиР благодаря единому подходу и стандартизации процедур;
7. повышение безопасности эксплуатации за счёт заблаговременного выявления критических дефектов.

В результате проведённого исследования была выявлена чёткая эволюция подходов к техобслуживанию электроэнергетического оборудования: начальная стадия представлена концепцией CBM (обслуживание по состоянию), которая базируется на мониторинге параметров и принятии решений на основе данных диагностики (с опорой на IEC/TR 60599, ISO 10816); следующий этап — PdM (предиктивное обслуживание) — развивает идеи CBM, смещая акцент на прогнозирование деградации оборудования с применением регрессионного анализа, методов машинного обучения и расчёта вероятности отказа по распределению Вейбулла; завершает эволюционную цепочку методология RCM (Reliability-Centered Maintenance), которая объединяет лучшие практики CBM и PdM, реализуя системный подход к выбору стратегий ТО с применением методов FTA и FMEA.

Была определена технологическая база, обеспечивающая функционирование адаптивных моделей ТО: она включает распределённую сеть датчиков (сенсорный слой), стандартизированные протоколы передачи данных (IEC 61850, DNP3, OPC UA), платформы хранения и обработки данных (EAM, CMMS, SCADA), аналитический стек (алгоритмы машинного обучения, системы визуализации, модули прогнозирования) и интеграционные шлюзы для связи с ERP-системами и системами диспетчеризации.

Систематизация нормативно-методической основы показала, что фундамент адаптивных моделей составляют международные стандарты (IEC,

IEEE), методические руководства (EPRI) и корпоративные регламенты, адаптирующие общие принципы к специфике конкретных энергообъектов.

Количественная оценка эффектов от внедрения адаптивных моделей продемонстрировала впечатляющие результаты: снижение частоты аварийных отключений на 30–50 %, сокращение затрат на ремонт за счёт перехода от аварийных к плановым работам, увеличение межремонтного периода оборудования, оптимизация складских запасов запчастей, повышение общей надёжности энергосистемы и уровня обслуживания потребителей.

Обсуждение полученных результатов позволяет заключить, что успех адаптивных моделей ТО обусловлен глубокой интеграцией диагностических технологий и аналитических методов, стандартизацией процессов и протоколов обмена данными, опорой на признанную международную нормативную базу, системной интеграцией с корпоративными ИТ-решениями, а также фокусом на проактивном управлении рисками отказов.

Выводы:

Практическое внедрение адаптивных моделей техобслуживания в странах ЕС, США и Японии демонстрирует значительный системный эффект: существенно снижается частота аварийных отключений (на 30–50 %) благодаря раннему выявлению и устранению дефектов; сокращаются затраты на ремонт за счёт перехода от аварийных к плановым работам; увеличивается межремонтный период оборудования при сохранении требуемого уровня надёжности; оптимизируются складские запасы запчастей благодаря точному прогнозированию потребностей; повышается общая надёжность энергосистемы и уровень обслуживания потребителей; улучшается управляемость процессами ТОиР благодаря единому подходу и стандартизации процедур; усиливается безопасность эксплуатации за счёт заблаговременного выявления критических дефектов.

Таким образом, зарубежные подходы к техобслуживанию электроэнергетического оборудования демонстрируют устойчивую тенденцию к углублению аналитической составляющей, интеграции цифровых технологий и стандартизации процессов. Опора на признанную международную нормативную базу, применение современных диагностических технологий, использование стандартизированных протоколов передачи данных, внедрение аналитических инструментов (в том числе машинного обучения) и интеграция с корпоративными системами управления активами и ремонтами формируют прочную основу для дальнейшего развития адаптивных моделей ТО, подтверждая их статус приоритетного направления развития мировой электроэнергетики.

Литература:

1. NFPA 70B/Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance/2006 Edition
2. ANSI/IEEE 56 «Guide for Insulation Maintenance of Large AC Rotating Machinery (10,000 kVA and Larger)» (1977, повторно утверждён в 1991);
3. IEEE C37.13 «Standard for Low Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures» (1990);
4. IEEE C37.20.1 «Standard for Metal Enclosed Low Voltage Power Circuit Breaker Switchgear» (2002);
5. IEEE C57.94 «Recommended Practice for Installation, Application, Operation and Maintenance of Dry Type General Purpose Distribution and Power Transformers» (1982, повторно утверждён в 1987);
6. IEC 61850 (форматы обмена данными);
7. IEC 60076 (требования к трансформаторам);
8. IEC 60300 3 11 (управление надёжностью оборудования).