

УДК 621.316.946:620.179.16

С.Н. Верзунов, verzunov@hotmail.com

Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР

КОМПЛЕКСНЫЙ АКУСТО-ДИЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МОНИТОРИНГ УСТРОЙСТВ И ОПОР ЛЭП С ПРИМЕНЕНИЕМ ВСТРОЕННОГО ПЕРИФЕРИЙНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Приведен систематический обзор современных технологий неразрушающего контроля (НК) высоковольтных объектов, в котором впервые объединены три подхода: акустическая эмиссия, диэлектрическая диагностика и встроенный периферийный искусственный интеллект (edge-AI). В качестве примеров таких объектов рассмотрены газоизолированные распределительные устройства (ГИРУ) напряжением 10–45 кВ и композитные/железобетонные опоры линий электропередачи (ЛЭП). Проанализированы данные из рецензируемых публикаций и нескольких открытых наборов сигналов (PD-Loc, VSB и др.). Рассмотрены актуальные алгоритмы обработки — сверточные нейронные сети (CNN), байесовское объединение многомодальных данных и квантованные модели для edge-AI. Сравнены функции ведущих промышленных систем (EA UltraTEV, Rugged CPM601, OMICRON PARADIMO) и предложена архитектура комплексного акусто-диэлектрического прибора; показано, что мультимодальный анализ способен снизить долю ложных тревог при обнаружении частичных разрядов. Обоснована практическая ценность комплексного мониторинга для перехода к прогнозно-ориентированному обслуживанию подстанций и опор ЛЭП, уменьшения утечек элегаза (SF_6) и повышения механической надежности конструкций.

Ключевые слова: неразрушающий контроль (НК); частичные разряды (ЧР, Partial Discharge); газоизолированные распределительные устройства; композитные и железобетонные опоры линий электропередачи; акустическая эмиссия и ультразвуковая диагностика; диэлектрическая спектроскопия; байесовское слияние данных; периферийные вычисления (edge computing); машинное обучение и искусственный интеллект; прогнозно-ориентированное обслуживание.

1. Введение

Надежность распределительного высоковольтного оборудования напрямую влияет на бесперебойность электроснабжения. По статистике, до 40% внеплановых отключений в распределительных сетях связаны с отказами оборудования подстанций, и во многих случаях причиной являются частичные разряды (ЧР) в изоляции [1]. Так, например, газоизолированные распределительные устройства (ГИРУ) на напряжение 10–45 кВ используют элегаз (SF_6) в качестве изоляционной среды. SF_6 — чрезвычайно мощный парниковый газ с потенциалом глобального потепления ~23 900 раз выше CO_2 и атмосферным сроком жизни около 3200 лет [2]. Поэтому предотвращение утечек SF_6 и отказов ГИРУ имеет не только экономическое, но и экологическое значение. Кроме того, композитные и железобетонные опоры линий электропередачи (ЛЭП) также требуют внимания: со временем в них накапливаются трещины, увлажнение, коррозия арматуры, что снижает механическую прочность конструкции.

Традиционные методы контроля — плановые осмотры, тепловизионный контроль, измерение тангенса δ (для изоляции), простукивание опор — обладают ограниченной чувствительностью и субъективностью. Для раннего выявления дефектов изоляции (например, ЧР, внутренние повреждения) и деградации материалов необходимы инновационные методы неразрушающего контроля. Перспективным подходом является одновременное использование ультразвуковой акустической диагностики и диэлектрических измерений, объединенных в одном приборе с поддержкой алгоритмов искусственного интеллекта. Идея состоит в том, что акусто-диэлектрометрический мониторинг позволит «видеть» как электрические дефекты (частичные разряды, изменение диэлектрических

свойств), так и механические дефекты (трещинообразование, разрывы волокон, ослабление структуры) в контролируемых объектах.

В данной работе рассматривается концепция комбинированного интеллектуального акустико-электрометрического прибора, реализующего такой подход. Этот интеллектуальный прибор – edge-устройство (выполняющее вычисления на месте сбора данных), объединяющее датчики акустической эмиссии/ультразвука и диэлектрометрические датчики и использующее встроенные алгоритмы глубокого машинного обучения для анализа сигналов в реальном времени. Далее проводится обзор существующих открытых данных и научных работ, наработанных методов обработки, а также уже доступных коммерческих решений в этой области. Кроме того, обсуждаются архитектура и потенциал внедрения такого интеллектуального прибора, и обосновываются преимущества интеграции акустического и диэлектрического контроля, усиленного edge-AI, для применения в условиях реальных объектов (10-45-кВ ГИРУ, опоры ЛЭП и др.). То есть в работе предложена единая акусто-диэлектрическая платформа, способная одновременно диагностировать электрические и механические дефекты (трещинообразование, увлажнение композитных/железобетонных опор ЛЭП). В опубликованных системах мониторинга эти задачи до сих пор решались отдельно: ЧР-комплексы контролируют только изоляцию, а структурную прочность опор оценивают другими методами. Кроме того, разработана edge-архитектура с аппаратным разделением задач: FPGA-ядро выполняет БПФ/вейвлет-анализ и формирует фазово-разрешенные диаграммы ЧР «на лету», тогда как встроенный нейропроцессор запускает компактные CNN-модели и байесовское объединение информации с нескольких сенсоров без обращения к облачной инфраструктуре. В литературе подобное распределение еще не описано.

2. Методы

Акустические методы диагностики. Акустический контроль включает использование ультразвуковых волн и акустической эмиссии для обнаружения дефектов. В контексте электрооборудования наиболее показателен ультразвук для выявления частичных разрядов: разряд в газовой или твердой изоляции генерирует высокочастотный звук (ультразвук), который может улавливаться датчиками. Например, портативные датчики ультразвука широко применяются для выявления коронного разряда и поверхностных ЧР на открытых токоведущих частях. Известно, что компания EA Technology разработала ручные детекторы типа UltraTEV, сочетающие ультразвуковой микрофон и датчик электромагнитных импульсов. В частности, прибор UltraTEV Detector² оснащен двумя сенсорами: ультразвуковой для фиксации поверхностных ЧР (в диапазоне выше слышимого звука) и емкостной датчик транзитных напряжений на корпусе (TEV) для регистрации внутренних ЧР [3].

Такое устройство позволяет сразу распознавать как поверхностные разряды, так и внутренние дефекты в выключателях и шкафах ГИРУ. Ультразвук применяется и для локализации источников разрядов. Например, массив из трех ультразвуковых датчиков, расположенных Г-образно, способен не только обнаруживать ЧР, но и определять направление на источник по разности времен прихода сигналов. В лабораторных испытаниях подобная установка показала точность локализации порядка 0,1 м при расстоянии между датчиками 0,2 м [1].

В конструкции предлагаемого интеллектуального прибора предполагается использование высокочувствительного акустического сенсора – либо контактного пьезодатчика, либо микрофона для воздушного ультразвука, в зависимости от сценария. Кроме того, акустическая эмиссия (АЭ) – перспективный метод контроля механических дефектов: он улавливает упругие волны, возникающие при зарождении и росте трещин в материале. Метод АЭ давно применяется для мониторинга железобетона [4] – формирующиеся микротрещины издают импульсные сигналы, которые фиксируются датчиками. В композитных опорах ЛЭП акустические датчики могут улавливать звук

разрыва волокон или слоев. Кроме того, ультразвуковые измерения можно использовать для оценки упругости материала: скорость распространения ультразвуковой волны через толщу опоры позволит судить о степени растрескивания или увлажнения. Таким образом, акустический канал интеллектуального прибора обеспечивает как раннее обнаружение ЧР в электрическом оборудовании, так и выявление трещин и иных структурных нарушений в опорах.

Диэлектрические методы диагностики. Диэлектрометрический контроль охватывает все методы, связанные с измерением электрических свойств изоляционных материалов и электромагнитных эмиссий от дефектов. В случае ГИРУ ключевую информацию дают импульсные электрические сигналы от частичных разрядов. Разряд генерирует кратковременный высокочастотный ток и электромагнитное излучение. Для их регистрации используются: высокочастотные токовые трансформаторы (ВЧТТ) на заземлении, емкостные датчики (например, связь через слой изоляции), антенны УВЧ-диапазона, TEV-датчики на корпусе и пр. Современные стационарные системы мониторинга ЧР обычно поддерживают подключение сразу нескольких типов датчиков. Так, система Rugged Monitoring CPM601-C представляет собой универсальный двухдиапазонный регистратор ЧР (КВ и УКВ), который работает с акустическими/ультразвуковыми датчиками, ВЧТТ, TEV, соединительными емкостями и УВЧ антеннами. Такое многообразие входных каналов позволяет охватить все виды частичных разрядов в разных устройствах – от ГИРУ и трансформаторов до кабельных линий [5].

В предлагаемом интеллектуальном приборе диэлектрометрический канал может быть представлен, к примеру, небольшим встроенным УВЧ-датчиком (для регистрации электромагнитных импульсов ЧР в ГИРУ) или емкостным сенсором, прикрепляемым к поверхности изоляции. Для контроля опор ЛЭП метод может принимать форму диэлектрометрии – измерения диэлектрической проницаемости или сопротивления бетона/композита. Известно, что диэлектрическая проницаемость бетона сильно зависит от влажности: наблюдается высокая корреляция между ϵ_r и содержанием влаги. Это можно использовать для косвенного определения влажности в защитном слое бетона, что важно для оценки риска коррозии арматуры [6].

Таким образом, контролируя диэлектрические параметры опоры (например, с помощью высокочастотного емкостного датчика или портативного прибора типа георадара), предлагаемый интеллектуальный прибор может выявлять увлажнение и деградацию изоляционных свойств материала опоры.

Алгоритмы обработки данных (Edge AI). Сочетание разнородных датчиков требует интеллектуальной обработки для извлечения диагностической информации. В последние годы в электроэнергетике активно применяются методы машинного обучения для распознавания шаблонов частичных разрядов, а также для оценки состояния оборудования. Классические подходы основывались на методах поверхностного обучения и пороговом анализе, например фазово-разрешенные диаграммы ЧР (PRPD) или статистические параметры импульсов [7]. Однако такие методы требовали участия экспертов и чувствительны к помехам [7]. Глубокие нейронные сети (глубокое обучение) позволяют автоматизировать этот процесс. Особенно эффективно зарекомендовали себя сверточные нейросети (CNN) для анализа временных рядов: они способны самостоятельно идентифицировать характерные паттерны по сигналу разряда, выделяя скрытые закономерности [7]. Прямое применение глубокого обучения к задаче обнаружения ЧР уже демонстрирует отличные результаты. Например, в соревновании VSB Power Line Fault Detection (публичный датасет частичных разрядов, собранный Техническим университетом Острова) методы с глубоким обучением достигли высоких показателей и заняли лидирующие места [7]. Этот датасет включает более 8700 сигналов с метками наличия повреждения изоляции на высоковольтной линии 22 кВ, и стал открытым бенчмарком для алгоритмов обнаружения ЧР [7]. Другой пример – открытый набор PD-Loc на IEEE DataPort, содержащий разнообразные акустические сигналы (импульсы, шум, реально

зарегистрированные ЧР), собранные с помощью прецизионной 32-канальной решетки микрофонов [8]. PD-Loc предназначен для отладки алгоритмов локации источников разрядов и служит источником данных для исследований по акустическим методам мониторинга. Наличие таких открытых данных значительно облегчает обучение нейросетей интеллектуального прибора для различных задач (классификация типа дефекта, фильтрация помех, определение местоположения дефекта и т.д.).

Edge-архитектура прибора подразумевает, что тяжелые вычисления выполняются на месте, на самом устройстве, без необходимости постоянно передавать большой объем сырого сигнала в облако. Это предъявляет требования к эффективности алгоритмов – часто применяются компактные модели или специальные методы, как знание-дистилляция и квантование сетей. В литературе предлагаются гибридные схемы: например, в работе [9] реализована облачно-периферийная система, где предварительная обработка и снижение размерности признаков выполняется на краю (edge), а обучение глубоких моделей происходит в облаке; затем обученная модель выгружается обратно на edge-устройства для работы в реальном времени [9]. Подобный подход позволяет регулярно обновлять интеллект приборов на основе собираемых данных. В контексте интеллектуального прибора можно предусмотреть, что сеть из таких приборов будет собирать телеметрию с объектов, периодически отправлять обобщенную информацию в центр (облако) для дообучения моделей и получать обновленные веса нейросети. Но основная задача – моментальное выявление дефекта на месте – решается за счет локального ИИ. Например, сразу на устройстве может работать сверточная сеть, различающая характер акустического импульса (напряженный звук трещины vs. фоновый шум) или классифицирующая форму ЧР-импульса в ВЧ-сигнале (разряд по поверхности vs. внутренний дефект и т.д.).

Слияние данных и байесовский подход. Для принятия решения о состоянии объекта интеллектуальный прибор должен объединять результаты от акустических и диэлектрических сенсоров. Байесовские методы предоставляют формальный аппарат для слияния разнородной информации с учетом неопределенности. Каждое измерение (например, уровень акустической эмиссии, величина импульсного тока ЧР, диэлектрическая проницаемость материала) может рассматриваться как признак с определенной апостериорной вероятностью дефекта. Байесовская сеть или фильтр способны объединить эти признаки и вычислить интегральную оценку состояния – например, вероятность того, что изоляция повреждена. В инженерной диагностике подобные модели применяются для повышения достоверности: один датчик может давать ложное срабатывание, но совместная вероятность двух независимых признаков существенно снижает риск ошибки.

Так, апостериорная вероятность наличия дефекта D при совместном наблюдении акустического импульса X_A и электромагнитного всплеска X_E определяется по правилу Байеса:

$$P(D|X_A, X_E) = \frac{P(X_A|D)P(X_E|D)P(D)}{P(X_A, X_E)}.$$

В нашем же случае комбинация акустического и электрического «зрения» позволяет более надежно выявлять дефекты. Например, ЧР проявляется как одновременно электромагнитный всплеск и акустический щелчок – фиксация обоих сигналов даст почти стопроцентную уверенность, тогда как каждый по отдельности мог быть вызван помехой (электромагнитной или акустической). Аналогично для опоры ЛЭП: резкий скачок акустической эмиссии, сопровождающийся изменением диэлектрического отклика материала, укажет на трещину, в которую проникла влага. Тем самым объединение данных с разных сенсоров, поддерживаемое ИИ, повышает чувствительность и специфичность диагностики. Данные литературы подтверждают эффективность таких подходов – например, совмещение ультразвукового метода с оптическим (камера) уже применялось для идентификации конкретного дефектного изолятора после акустической локализации ЧР [1]. В интеллектуальном приборе заложена возможность расширения: помимо двух основных каналов (акустика и диэлектрика), могут интегрироваться и другие – например, датчики

температуры, влажности, вибрации – а edge-алгоритмы ИИ не будут проводить многофакторный анализ.

Результаты и обзор решений

Открытые данные и современные алгоритмы. Рассмотренные методы уже опробованы на практике и в исследованиях. Открытые наборы данных позволили исследователям обучить и проверить ИИ-алгоритмы диагностики. Так, на датасете VSB (разряды на ЛЭП) сверточные сети достигли высокого показателя $MCC \approx 0.63$, уверенно различая сигналы поврежденной изоляции [10]. Для сравнения моделей использован показатель Мэттьюса (MCC):

$$MCC = \frac{TP \cdot TN - FP \cdot FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}}$$

где TP , TN , FP , FN — истинно-положительные, истинно-отрицательные, ложноположительные и ложноотрицательные решения соответственно.

Авторы той работы отмечают, что их подход занял 4-е место на финальном тестировании среди десятков решений [7]. Набор PD-Loc стал базой для разработки методов акустической локации ЧР по сигналам с 32-канального массива микрофонов [8]. Его появление значительно продвинуло вперед исследование алгоритмов 3D-пеленгации дефектов по звуку. Помимо академических данных, ценные результаты дают и полевые испытания. К примеру, в эксперименте литовских инженеров ультразвуковая установка успешно зафиксировала ЧР на расстоянии до 30 м в открытом распреустройстве и правильно определила дефектный ввод трансформатора, используя комбинированную обработку сигналов и классификатор SVM [1]. Эти результаты подтверждают работоспособность акустических методов в реальных условиях подстанций.

Существующие коммерческие решения. На рынке уже присутствует оборудование, показанное в таблице 1, частично реализующее описанные подходы.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики коммерческих систем мониторинга частичных разрядов и предлагаемого акусто-диэлектрического комплекса

Система	Форм-фактор / установка	Измерительные каналы (✓ — встроено • — доступно как опция)	Встроенный ИИ / edge-аналитика	Диапазон применимости	IP-класс	Ключевые возможности	Основные ограничения
EA UltraTEV Plus ²	Ручной портативный прибор «обходного» контроля	УЗ-микрофон ✓ TEV-датчик ✓	Только пороговая логика; без нейросетей	КРУ, ГИРУ 6–35 кВ	IP54	Быстрый скрининг ЧР; индикация «зел / жёлт / красн»	Нет стационарной работы; не анализирует мех. дефекты
Rugged Monitoring CPM601-C	Стационарный модуль (до 8 каналов)	HFCT ✓ • УВЧ-антенна ✓ • АЭ датчик •	Правила + спектральные пороги; ИИ отсутствует	Трансформаторы, GIS, кабели 6–400 кВ	IP65	Суточный тренд ЧР; IEC 61850, MQTT	Нет диэлектрометрии; нет классификации по типу дефекта
OMICRON PARADIMO 100	Стационарный UHF-блок для GIS/GIL	УВЧ-антенны ✓ (1–2 ГГц)	Да — CNN-классификатор PD-паттернов	GIS/GIL > 72 кВ	IP66	Автоклассификация ЧР; веб-GUI; оптоволоконная сеть узлов	Мониторит только электрические дефекты, без акустики
Предлагаемый комплекс	Портативный и стационарный режим	УЗ/АЭ ✓ UHF / HFCT ✓ Диэлектрометрия ✓	Да — NPU 0.5 TOPS, байес. влияние	ГИРУ 10–45 кВ + опоры ЛЭП	IP65 (портативн.) / IP67 (стац.)	Одновременный контроль ЧР и трещин; автономный анализ; Wi-Fi 6, LTE-M1, IEC 61850	Прототип; требуется калибровка под разные материалы

Компания EA Technology (Великобритания) предлагает портативные приборы серии UltraTEV для экспресс-обследования распределительного устройства. UltraTEV Plus², например, способен одновременно измерять уровень ультразвука и импульсы TEV, выдавая оператору индикацию степени ЧР-активности [3]. Он помогает эксплуатационному персоналу быстро выявить ячейки ГИРУ с подозрением на частичные разряды (зелёный/жёлтый/красный индикатор по уровню PD)[3], а также на слух различить характерный треск разряда в ультразвуковом диапазоне [3]. Однако такие приборы предназначены для периодического ручного контроля и зависят от квалификации оператора. Для непрерывного мониторинга существуют стационарные системы. Rugged Monitoring (Канада) выпускает систему CPM601, способную круглосуточно снимать и анализировать ЧР-сигналы от нескольких датчиков (до 8 каналов) в высокочастотном и ультра-высокочастотном диапазонах [5]. Это промышленное устройство, рассчитанное на установку непосредственно на объекте (степень защиты IP65) и интеграцию в АСУТП предприятия по стандартным протоколам (Modbus, MQTT, IEC 61850 и др.)[5]. В CPM601 заложены алгоритмы фильтрации помех и накопления статистики, однако о применении нейросетей не заявлено – пороговая обработка и передача данных на верхний уровень. Компания OMICRON (Австрия) предложила новейшую систему PARADIMO 100, ориентированную на мониторинг ГИРУ и газовых шин (GIL). Особенность PARADIMO – встроенный модуль edge-вычислений и интеллектуального анализа: прибор автоматически детектирует и классифицирует тип дефекта изоляции и формирует тревожные оповещения для службы эксплуатации [11]. Фактически, PARADIMO 100 является примером специализированного edge-AI устройства для ЧР-мониторинга ГИРУ. Он подключается к предустановленным УВЧ-антеннам в корпусе ГИРУ, охватывая широкий диапазон частот для уверенного обнаружения сигналов ЧР даже на фоне помех [12]. Несколько таких узлов могут объединяться по оптоволоконной сети, покрывая всю подстанцию и передавая данные на центральный сервер с веб-интерфейсом [11]. Таким образом, возможности PARADIMO во многом превосходят функции интеллектуального прибора в части диагностики ЧР в элегазовом оборудовании.

Однако ни одно из перечисленных решений не нацелено на одновременный контроль электрических и механических параметров. Системы типа PARADIMO и CPM601 концентрируются исключительно на частичных разрядах и состоянии электрической изоляции. Контроль же состояния опор ЛЭП (механической прочности) обычно осуществляется другими средствами – например, периодическим инструментальным контролем прочности бетона, измерением вибраций опоры при ветровой нагрузке или визуальным осмотром. В этом смысле концепт интеллектуального прибора является уникальным интегрированным подходом: один прибор, оснащенный мультимодальными сенсорами и AI-аналитикой, способен обслуживать две задачи одновременно – мониторинг электроизоляции и диагностику конструкции.

Возможности интеллектуального прибора и предлагаемая архитектура. На рисунке 1 представлена структурная схема прибора, в которой выделены восемь взаимосвязанных подсистем.

1. Акустический модуль – принимает импульсы акустической эмиссии или посылает/принимает ультразвуковые сигналы. Состоит из пьезодатчика (либо УЗ-передатчика-приемника), предусилителя на 40 дБ и быстрого коммутатора режима прием/передача.
2. Диэлектрометрический модуль – регистрирует электромагнитные всплески частичных разрядов и измеряет диэлектрические параметры материала. Включает HFCT-вход, малошумящую UHF-антенну либо контактный ϵ -электрод, а также полосовой фильтр с усилителем.
3. Модуль аналоговой обработки – универсальный фронт-энд: мультиплексирует датчики, отфильтровывает помехи, формирует синхронные триггеры; оцифровка выполняется парой независимых АЦП.

4. Модуль цифровой обработки – ядро вычислений: четырехъядерный SoC Cortex-A55 и FPGA-блок, который аппаратно рассчитывает БПФ/вейвлет-преобразования и формирует фазово-разрешенные диаграммы ЧР.
5. Модуль ИИ – встроенный нейропроцессор производительностью 0,5 TOPS, реализующий сверточные сети и байесовское слияние данных в реальном времени.
6. Модуль памяти – eMMC 16 ГБ и съемная μ SD до 128 ГБ для круглосуточного буфера «сырых» сигналов и хранения моделей.
7. Модуль безопасности – TPM 2.0 / Secure Element, отвечающий за защищенную загрузку и аппаратное шифрование трафика.
8. Модуль питания и управления – промышленный DC/DC 24/48 В $\rightarrow$ 5 В/3,3 В, резервный Li-ion аккумулятор 12 Вт·ч с MPPT-зарядкой и служебный микроконтроллер-диспетчер со сторожевым таймером.
9. Коммуникационный модуль – проводной Gigabit Ethernet с PoE и беспроводные интерфейсы Wi-Fi 6, LTE-M1, BLE 5.3; поддерживает протоколы OPC UA и IEC 61850 для интеграции в цифровые подстанции.

Такое портативное, но функционально насыщенное устройство обеспечивает полный цикл «датчик $\rightarrow$ фильтрация $\rightarrow$ ИИ-анализ $\rightarrow$ передача результата», позволяя проводить комплексный неразрушающий контроль на месте установки оборудования без внешних вычислительных ресурсов.

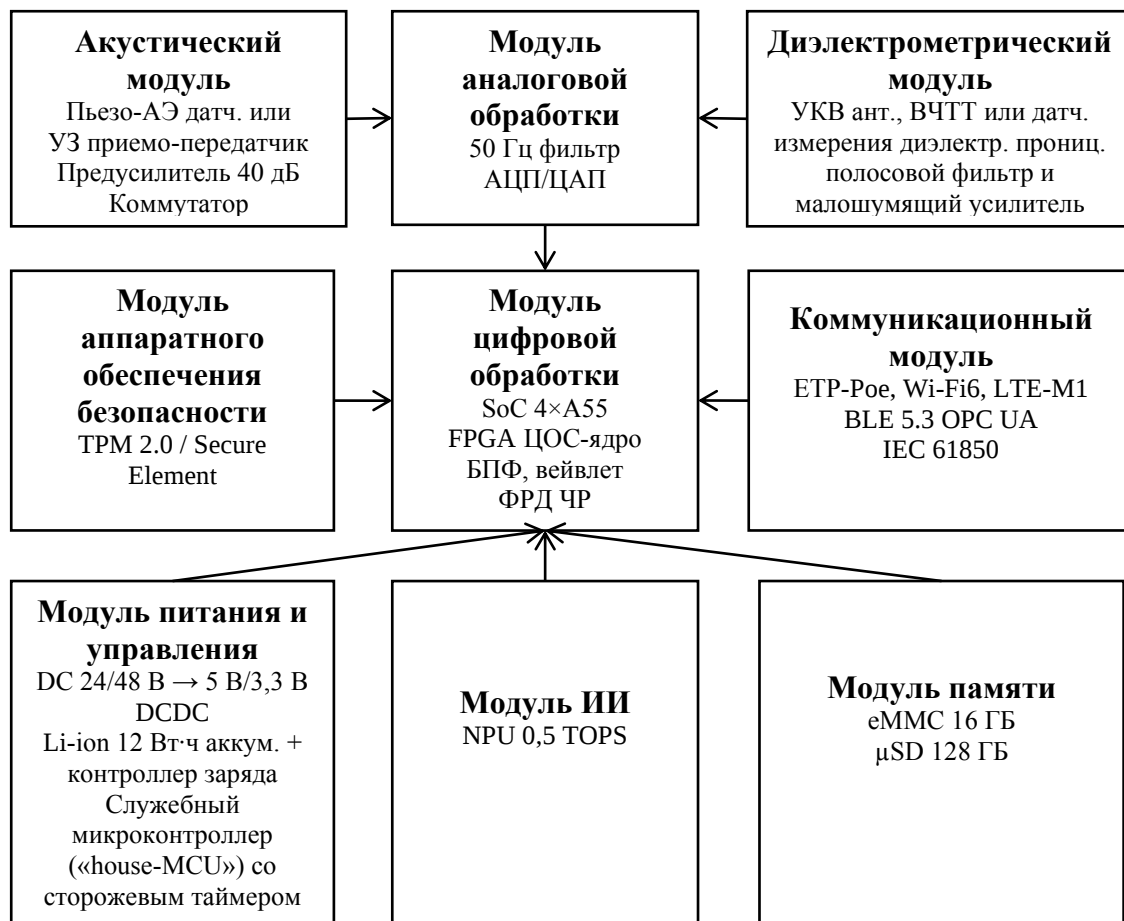


Рисунок 1 – Структурная схема интеллектуального комплекса на базе периферийного ИИ

В полевых условиях интеллектуальный прибор может применяться двумя способами: передвижной контроль и стационарный мониторинг. В первом случае прибор используется инспектором: например, при обходе оборудования инженер прикрепляет магнитно/клеевым

креплении прибор к корпусу оборудования или к опоре ЛЭП, после чего запускает режим сканирования. Прибор возбуждает ультразвуковую волну и замеряет отклик материала, прослушивает акустическую эмиссию за определенный интервал, одновременно измеряет уровни ЧР в электросигналах. По завершении цикла в течение нескольких минут прямо на месте выдаются диагностические показатели: степень ЧР-активности, наличие аномальных акустических событий (например, «обнаружен звук трещины, рекомендуется дополнительная проверка опоры»), оценка влажности бетона и т.п. В стационарном варианте несколько приборов могут быть установлены постоянно – например, один на каждую опору секции ЛЭП или на каждый отсек распределительного устройства. Тогда интеллектуальный прибор выступает как узел системы предиктивной диагностики: непрерывно отслеживает состояние и в случае превышения порогов (или обнаружения характерного паттерна, распознанного ИИ) отправляет тревогу на пульт эксплуатационников.

Архитектурно интеллектуальный прибор мог бы использовать обработку сигналов в реальном времени: аналоговые сигналы с датчиков оцифровываются АЦП высокой частоты (для ЧР – ≥ 100 Мвыб/с, для ультразвука – в диапазоне МГц при импульсном прозвучивании), затем предобрабатываются (фильтрация, усиление, декомпозиция). Выделенные признаки (спектры, огибающие, фазовые распределения разрядов и др.) подаются на вход встроенной нейросети, которая выдает классификацию или регрессионную оценку состояния. Например, сеть может классифицировать тип ЧР (поверхностный, внутренний, корона) по форме импульса – аналогично тому, как PARADIMO отличает дефекты в GIS [12]. Другая модель может оценивать степень поврежденности бетона по сочетанию признаков (уровень АЭ, диэлектрическая проницаемость) – фактически предсказывать остаточный ресурс или необходимость ремонта. Все эти вычисления выполняются автономно на процессоре устройства, что соответствует концепции Edge AI – интеллектуализации приборов на местах обслуживания.

Следует отметить, что на рынке уже появляются решения с частичным перекрытием функционала предлагаемого интеллектуального прибора. Например, компания ЕА, помимо поиска ЧР, развивает технологию мониторинга состояния деревянных опор (UltraTEV WoodPole Inspect) на основе акустического отклика при ударе. Хотя материалы и дефекты иные, принцип – анализ отклика опоры через встроенный алгоритм – схож с частью задач предлагаемого интеллектуального прибора. Тем не менее комбинирование в одном приборе контроля высоковольтной изоляции и механической прочности опор является новым шагом. Главным преимуществом такого объединения станет комплексная оценка состояния узлов энергосистемы. Например, при диагностике разъединителя 35 кВ, смонтированного на опоре, интеллектуальный прибор сможет одновременно указать состояние его элегазовой изоляции (есть ли ЧР в приводе, утечка газа) и состояния опоры (нет ли трещин в зоне крепления). Это особенно ценно, учитывая, что повреждения разных подсистем часто взаимосвязаны (разряд мог закоптить изолятор и ослабить диэлектрическую прочность; механическое повреждение опоры могло привести к перекосу оборудования и повышенной напряженности поля и т.п.).

Обсуждение

Практическая применимость и внедрение. Применение edge-AI-приборов, подобных предлагаемому, в энергетической инфраструктуре открывает новые возможности для предиктивного обслуживания. По сравнению с существующими подходами, комплексный интеллектуальный прибор предлагает инженерам простое в использовании решение «двух в одном», снижающее потребность в нескольких разных приборах и экспертной расшифровке данных. Внедрение такой системы может происходить поэтапно. На первом этапе – опытная эксплуатация: несколько устройств устанавливаются на пилотных объектах (например, на самой загруженной 35-кВ подстанции и на участке ЛЭП с имеющейся историей дефектов). С помощью открытых и накопленных данных обучаются модели обнаружения дефектов, настроены пороги чувствительности под реальные условия (электромагнитные помехи в РУ, фоновые шумы на ЛЭП – ветер, дождь и пр.). Далее интеллектуальный прибор

интегрируется в существующие системы техобслуживания: данные от него могут передаваться в SCADA или специализированный программный комплекс. В случае тревоги диспетчер получит уведомление с рекомендациями.

Важно подчеркнуть, что периферийный ИИ означает автономность и скорость. Даже при сбоях связи или отсутствии высокоскоростного канала прибор на месте способен сам принять решение и сигнализировать локально (световая сигнализация, звуковой сигнал или передача по резервному каналу SMS). Это особенно ценно для удаленных ЛЭП: опоры, оборудованные интеллектуальным прибором, могли бы по радиоканалу отправлять сигналы непосредственно ремонтной бригаде при обнаружении сильной трещины (например, после урагана).

Ограничения и дальнейшие направления. Естественно, описываемая система имеет свои технические вызовы. Комбинированный прибор должен быть очень помехоустойчивым: электроразряды генерируют широкий спектр частот, а ультразвук может ложноположительно срабатывать на внешние факторы (дождь, вибрация от транспорта). Решение – тщательная фильтрация и алгоритмы на основе ИИ, обученные отличать помехи от значимых сигналов [7]. Кроме того, устройство должно отвечать высоким требованиям по климатическому и механическому исполнению (для наружной установки на опорах – широкий диапазон температур, защита от влаги IP65+, виброустойчивость). Питание может быть реализовано от литиевых аккумуляторов с солнечной подзарядкой в случае автономных узлов на ЛЭП. Еще одна задача – калибровка. Акустический контакт с разными материалами (сталь корпуса, композит, бетон) требует адаптивных настроек или разных видов датчиков. Возможно, интеллектуальный прибор будет иметь сменные насадки/датчики для различных поверхностей либо автоматическую подстройку усиления под коэффициент отражения сигнала.

В плане алгоритмов дальнейшее развитие видится в расширении библиотек обнаруживаемых дефектов. Обучение на большем количестве эталонных данных (например, добавление данных из Scientific Reports исследований, где опубликованы формы сигналов различных дефектов) повысит надежность классификации. Интеграция байесовского слияния позволит выдавать обобщенный индекс состояния, понятный конечному пользователю – например, процент от износа или риск отказа в баллах. Такой интегральный подход облегчит принятие решений о ремонте.

Выводы

Выполненный обзор демонстрирует, что сочетание ультразвуковых и диэлектрических методов контроля, подкрепленное алгоритмами искусственного интеллекта, представляет собой мощный инструмент для диагностики состояния высоковольтного оборудования. Edge-AI-поддерживаемая акусто-диэлектрическая система способна обнаруживать опасные дефекты изоляции (частичные разряды, утечки элегаза) и ранние признаки деградации конструкций (трещины, увлажнение) до того, как они приведут к аварии. Примером служат современные устройства: от портативных детекторов EA Technology с двойными датчиками до edge-комплексов типа OMICRON PARADIMO 100, автоматически классифицирующих дефекты GIS [11]. Концептуальный прибор развивает эти идеи дальше, предлагая унифицированное решение для обслуживания как электрической, так и механической подсистем энергоинфраструктуры.

Основные преимущества подхода предлагаемого прибора заключаются в комплексности диагностики и оперативности. Комбинация двух физических методов повышает достоверность контроля и расширяет охват выявляемых дефектов. Встроенный интеллект на уровне прибора (edge) обеспечивает мгновенный анализ и выдачу рекомендаций персоналу без необходимости длительной расшифровки записей. Применение таких систем в масштабах энергокомпаний позволит перейти от реактивного ремонта к прогнозированию отказов, что снизит затраты на аварийные простои и повысит безопасность. Кроме того, предотвращение крупных аварий в элегазовом оборудовании поможет сократить утечки SF₆ и соответствующий экологический ущерб.

В заключение: акусто-диэлектрометрический мониторинг с edge-AI можно рассматривать как перспективное направление развития средств технического обслуживания высоковольтных сетей. Дальнейшие исследования покажут эффективность данного подхода на практике. Ожидается, что подобные интеллектуальные приборы станут неотъемлемой частью цифровой инфраструктуры электроэнергетики, обеспечивая более надежную, длительную и экологичную работу распределительных сетей.

Литература

1. Samaitis V., Mažeika L., Jankauskas A., Rekuviene R. Detection and Localization of Partial Discharge in Connectors of Air Power Lines by Means of Ultrasonic Measurements and Artificial Intelligence Models // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 1. P. 20. DOI: 10.3390/s21010020. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7792959/> (дата обращения: 05.05.2025).
2. Blackman J., Averyt M., Taylor Z. SF₆ Leak Rates from High Voltage Circuit Breakers – U.S. EPA Investigates Potential Greenhouse Gas Emissions Source // *Proc. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Montréal, 18–22 Jun 2006. DOI: 10.1109/PES.2006.1709084. URL: https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-05/leakrates_circuitbreakers.pdf (дата обращения: 05.05.2025).
3. EA Technology. UltraTEV® Detector²: Hand-Held Dual-Sensor Partial Discharge Detector [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://eatechnology.com/solutions/partial-discharge-solutions/partial-discharge-detection/ultratev-detector/> (дата обращения: 05.05.2025).
4. Ohtsu M., Isoda T., Tomoda Y. Acoustic Emission Techniques Standardized for Concrete Structures // *Journal of Acoustic Emission*. 2007. Vol. 25. P. 21–28. URL: <https://www.ndt.net/article/jae/papers/25-021.pdf> (дата обращения: 05.05.2025).
5. Rugged Monitoring. CPM601-C Dual-Frequency Partial Discharge Monitor [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://www.ruggedmonitoring.com/product/cpm601-c/> (дата обращения: 05.05.2025).
6. Jacobs L.J., Kurtis K.E., Sherman R.J., Burney D.C. Recommendations for Nondestructive Testing (NDT) of Concrete Components for Performance-Based Specifications. Final Rep. FHWA-GA-22-2015. Atlanta: Georgia DOT, 2022. 118 с. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/64475/dot_64475_DS1.pdf (дата обращения: 05.05.2025).
7. Michau G., Hsu C-C., Fink O. Interpretable Detection of Partial Discharge in Power Lines with Deep Learning // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 6. P. 2154. DOI: 10.3390/s21062154. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8003486/> (дата обращения: 05.05.2025).
8. Chelmiah E.T., Madigan C.D., Kavanagh D.F. Partial Discharge – Localisation (PD-Loc) Dataset [Электронный ресурс]. IEEE DataPort, 2024. DOI: 10.21227/yu7g-2p79. URL: <https://ieee-dataport.org/open-access/partial-discharge-localisation-pd-loc-dataset> (дата обращения: 05.05.2025).
9. Jia Z., Fan S., Wang Z., Shao S., He D. Partial Discharge Defect Recognition Method of Switchgear Based on Cloud-Edge Collaborative Deep Learning // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 10956. DOI: 10.1038/s41598-024-81478-9. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-81478-9> (дата обращения: 05.05.2025).
10. VSB Power Line Fault Detection Dataset [Электронный ресурс]. Kaggle, 2019. URL: <https://www.kaggle.com/competitions/vsb-power-line-fault-detection> (дата обращения: 05.05.2025).

11. Partial Discharge Monitoring System // PAC World Magazine. 2024. Issue 68. URL: <https://www.pacw.org/partial-discharge-monitoring-system> (дата обращения: 05.05.2025).<https://www.pacw.org/partial-discharge-monitoring-system>
12. OMICRON Energy. PARADIMO 100 – Ultra-High-Frequency Partial Discharge Monitoring System for GIS and GIL [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.omicronenergy.com/en/products/paradimo-100/> (дата обращения: 05.05.2025).