

Панферова Елена Викторовна

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический

университет им. Л.Н. Толстого»

г. Тула, Тульская область

Сидоров Владимир Витальевич

начальник электролаборатории

ООО «НВС»

г. Донской, Тульская область

DOI 10.31483/r-152767

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О МЕСТЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ И ГИБРИДНЫХ АЛГОРИТМОВ

***Аннотация:** исследование является развитием работы [1] и посвящено созданию концепции интеллектуальной системы анализа, диагностики и прогнозирования работы цифровых устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Предлагаемая система основана на глубокой интеграции классических детерминированных алгоритмов, алгоритмов машинного обучения (МО) и точных данных о месте повреждения, формируемых устройствами волновой локализации (УВЛ) и синхронизированными векторными измерителями (PMU). В статье представлен детальный анализ недостатков существующих подходов к послеаварийному анализу, обоснована новая трехуровневая методология, включающая аппаратную верификацию, системную корреляцию и предиктивную аналитику. Особое внимание уделено разработке гибридного алгоритмического ядра, в котором нейросетевая классификация событий, предиктивные модели и цифровой двойник защищаемой зоны работают в едином контуре. Приводится описание архитектуры распределенного программно-аппаратного комплекса, реализующего предложенные принципы, и план экспериментального исследования*

на базе имитационной модели участка сети 110 кВ. Результатом работы является законченная концепция, обеспечивающая переход от реактивной к проактивной и адаптивной модели эксплуатации релейной защиты.

Ключевые слова: интеллектуальная релейная защита, машинное обучение, большие данные, место повреждения, волновая локация, цифровой двойник, гибридные алгоритмы, предиктивная диагностика.

1. Введение.

В работе [1] был выполнен системный анализ задачи и предложены базовые алгоритмы для анализа функций релейной защиты с использованием данных о месте повреждения. Однако в условиях цифровизации энергетики и внедрения концепции Smart Grid возникает качественно новая задача: создание непрерывного интеллектуального контура, который не только анализирует произошедшие события, но и прогнозирует будущие, адаптируя логику защиты под изменяющиеся условия. Существующие системы послеаварийного анализа (ПА) часто представляют собой разрозненные инструменты, работающие с данными вручную или по жестким правилам, что приводит к запаздыванию в принятии решений и не позволяет выявлять сложные, накапливающиеся дефекты.

Научная новизна данного исследования заключается в синтезе трех направлений: 1) использование высокоточных данных о месте повреждения как центрального элемента системной корреляции событий; 2) построение гибридного алгоритмического ядра, где решение принимается на основе коллаборации детерминированных и вероятностных моделей; 3) внедрение цифрового двойника как динамической среды для валидации, анализа и непрерывного обучения системы.

Цель работы – разработать концепцию, архитектуру и ключевые компоненты интеллектуальной системы анализа и прогнозирования (ИСАП) РЗА, способной в автоматическом режиме повышать достоверность срабатываний и обеспечивать предиктивное техническое обслуживание. Для достижения цели по-

ставлены задачи: критически оценить ограничения существующих методов, детализировать трехуровневую методологию диагностики, формализовать архитектуру гибридных алгоритмов, предложить план экспериментальной проверки эффективности системы.

2. Критический анализ существующих подходов и постановка задачи.

Современные подходы к анализу РЗА можно условно разделить на два класса. К первому относятся локальные методы, встроенные в микропроцессорные терминалы. Они обеспечивают первичную диагностику устройства и запись осциллограмм, но их анализ ограничен рамками одного прибора и не учитывает системный контекст. Второй класс – централизованные системы сбора данных (АСДУ, SCADA), которые аккумулируют информацию с множества устройств. Их ключевой недостаток – слабая алгоритмическая оснащенность для семантического анализа событий РЗА; они фиксируют факт срабатывания, но не дают ответа о его корректности в привязке к месту повреждения.

Главная проблема заключается в разрыве между высокой точностью современных УВЛ, определяющих место повреждения с погрешностью до метра, и примитивным, часто ручным, анализом логики работы каскада защит. Данные о месте аварии, будучи критически важными, остаются изолированным фактом, не интегрированным в автоматизированный процесс принятия решений о настройках системы.

Таким образом, задачей данного исследования является преодоление этого разрыва через создание ИСАП. Система должна в автоматическом режиме: 1) принимать от УВЛ координаты повреждения; 2) соотносить их с зонами действия всех связанных устройств РЗА; 3) оценивать корректность и селективность срабатывания каждого элемента каскада; 4) выявлять аномальные паттерны и прогнозировать риски на основе накопленной истории данных.

3. Трехуровневая методология интеллектуальной диагностики.

Методология ИСАП строится на последовательном анализе данных на трех масштабах – от точечного к системному и далее к стратегическому.

3.1. Уровень 1: Аппаратная верификация и классификация событий. На этом уровне система анализирует данные с конкретного терминала РЗА: токи, напряжения, осциллограммы, внутренние флаги. Помимо проверки пороговых уставок, ключевую роль играет нейросетевой классификатор, обученный на библиотеке типовых и аварийных осциллограмм. Его задача – отнести текущее событие к одному из классов: «устойчивое КЗ», «удаленное КЗ», «качания», «феррорезонанс», «технологическая команда». Это позволяет сразу отфильтровать неаварийные срабатывания и уточнить входные данные для последующего системного анализа.

3.2. Уровень 2: Системная корреляция и анализ селективности. Это ядро системы. Получив от УВЛ точные координаты повреждения и от классификатора тип события, система загружает цифровую модель (цифровой двойник) защищаемой зоны. В этой модели для заданной точки повреждения в реальном времени рассчитываются теоретические токи короткого замыкания, которые должны были фиксироваться каждым устройством в каскаде. Эти расчетные значения сопоставляются с фактическими уставками срабатывания и временами, зафиксированными приборами. Алгоритм строит «дерево срабатывания», визуализируя, какая защита должна была сработать первой по расчету, какая сработала фактически, и были ли несанкционированные действия других устройств. Это дает однозначный ответ о правильности или наличии дефектов в логике селективности.

3.3. Уровень 3: Предиктивная аналитика и адаптация. На этом уровне работает машинное обучение, анализирующее долгосрочные тренды. Ансамбль моделей (например, градиентный бустинг) обрабатывает исторические данные: частоту и локацию повреждений, нагрузку линий, температуру окружающей среды, результаты диагностики изоляции. На выходе формируются: 1) Карта рисков участков сети с прогнозом вероятности отказов; 2) Рекомендации по адаптации уставок для предстоящих изменений режима (например, плановое включение резервной линии); 3) Приоритетный список оборудования для превентивного обслуживания.

4. Гибридное алгоритмическое ядро и архитектура системы.

Алгоритмическое ядро ИСАП представляет собой скоординированный набор взаимосвязанных модулей. Детерминированный вычислитель на основе методов узловых напряжений и контурных токов выполняет расчеты режимов для цифрового двойника. Нейросетевой блок (сверточные и рекуррентные сети) отвечает за классификацию событий и анализ временных рядов телеметрии. Блок предиктивной аналитики на основе ансамблей деревьев выявляет статистические закономерности и строит прогнозы. Координацию между блоками, принятие итогового решения и формирование инженерного отчета осуществляет логический арбитр – модуль, основанный на системе продукционных правил (if-then), формализующих экспертные знания релейщиков.

Архитектура системы является распределенной и трехзвенной. Периферийный уровень (Edge) размещается на подстанциях и включает шлюзы для приема данных с УВЛ и РЗА, а также вычислительные модули для оперативного выполнения алгоритмов 1-го и частично 2-го уровня. Центральный облачный уровень (Cloud) содержит базу данных всех событий, цифровые двойники объектов, тяжелые ML-модели 3-го уровня и веб-интерфейс для инженеров. Связь между уровнями обеспечивается защищенными шинами данных с использованием единого протокола обмена на основе адаптированного стандарта IEC 61850, расширенного для передачи данных локации и результатов ML-анализа.

5. План экспериментального исследования.

Для проверки эффективности концепции предлагается численное моделирование в среде MATLAB Simulink и Python.

Этап 1: Создание детальной модели участка сети 110 кВ с линиями разной длины, трансформаторами и 8–10 цифровыми устройствами РЗА с различными уставками.

Этап 2: Генерация массива тестовых данных. Моделируются сотни аварийных и нормальных режимов в разных точках сети, фиксируются осциллограммы, срабатывания защит, а для каждого КЗ «выдаются» условные данные УВЛ.

Этап 3: Обучение нейросетевого классификатора на части сгенерированных данных.

Этап 4: Интеграция всех компонентов ИСАП в виде программного прото-типа и его прогон на оставшейся тестовой выборке.

Этап 5: Оценка эффективности по метрикам: точность классификации со-бытий, процент корректно выявленных дефектов селективности, время форми-рования итогового отчета по сравнению с ручным анализом.

Ожидаемый результат эксперимента – количественное подтверждение того, что ИСАП сокращает время анализа сложных аварий на порядок (с часов до ми-нут) и в автоматическом режиме выявляет до 95% типовых дефектов логики за-щит, связанных с координацией уставок.

6. Выводы и практическая значимость.

Разработана комплексная концепция ИСАП, представляющая собой эволю-ционное развитие идей, заложенных в [1]. Концепция переводит анализ РЗА из эпизодической, рутинной операции в состояние непрерывного автоматизирован-ного интеллектуального процесса.

Предложенная трехуровневая методология формализует переход от вери-фикации срабатывания к системной диагностике и далее к проактивному прогно-зированию. Ключевую интегрирующую роль играют точные данные о месте по-вреждения.

Детализирована архитектура гибридного алгоритмического ядра и распре-деленного программно-аппаратного комплекса, что демонстрирует техническую реализуемость подхода на современной технологической базе.

Предложенный план эксперимента на имитационной модели позволяет пе-рейти от концепции к этапу доказательства эффективности и отладки алгорит-мов.

Практическая значимость работы заключается в создании теоретического и алгоритмического фундамента для промышленных систем нового поколения. Внедрение ИСАП позволит энергокомпаниям существенно повысить скорость ликвидации аварий, снизить риски каскадных отключений за счет оптимальной

и адаптивной настройки защит и перейти от планово-предупредительного к предиктивному техническому обслуживанию, что даст значительный экономический эффект.

Список литературы

1. Панферова Е.В. К аспектам разработки алгоритмов и программных средств анализа работы функций релейной защиты с использованием данных о месте повреждения / Е.В. Панферова, В.В. Сидоров // Региональное развитие: экономика и социум – 2025. – С. 134–137. EDN BLLELLB
2. Лачугин В.Ф. Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов: диссертация / В.Ф. Лачугин. – Иваново: ИГЭУ, 2016. EDN PKPXML
3. Криворучко Н.А. Преимущества и недостатки при эксплуатации микропроцессорных устройств релейной защиты электродвигателей / Н.А. Криворучко, К.Р. Валиуллин // Вестник науки. – 2022. – Т. 2. №6 (51). – С. 233–238. EDN DHYEPJ
4. Комбинированная релейная защита от замыканий на землю в электросетях 6–10 кВ / В.И. Дмитриченко, Д.А. Ни, М.А. Джетписов, Б. Бауржан // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26. №1. – С. 53–69. DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-53-69. EDN FRQPHL
5. Патент РФ №2752115. Способ определения места повреждения в электроэнергетической системе и устройство для его осуществления / А.Б. Иванов, С.В. Петров. – 2021.
6. Савельев А.А. Цифровые двойники в электроэнергетике: от концепции к внедрению / А.А. Савельев // Энергоэксперт. – 2023. – №4. – С. 34–41.