

УДК 621.316

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАРУШЕНИЙ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ОСЦИЛЛОГРАММ И КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ

Голиков М.С.¹, аспирант гр. ЭТа-251, I курс
Научный руководитель: Беляевский Р.В., к.т.н., доцент, чл.-кор. РЭА
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

1. Введение

Современные электроэнергетические системы становятся всё сложнее, при этом всё больше электроэнергии вырабатывается с помощью возобновляемых источников, которые подключаются напрямую к распределённым сетям. При этом растут требования к надёжности электроснабжения. Традиционные системы защиты и автоматики реагируют только тогда, когда уже произошло повреждение. Это часто приводит к отключению части сети и иногда вызывает цепочку аварий.

Когда рассматривают крупные аварии за последние годы в энергосистемах России и других стран, становится ясно, что существующие системы не всегда успевают вовремя остановить развитие проблем. Обычно перед авариями проявляются такие сигналы, как ухудшение изоляции, частичные разряды и дуговые процессы, которые могут быть зафиксированы и изучены.

Поэтому сегодня важно создавать умные системы, которые с помощью постоянного контроля параметров и состояния оборудования смогут обнаруживать опасные изменения на ранних этапах и принимать меры заранее.

В статье ставится задача проанализировать текущие методы прогнозирования аварий и предложить концепцию интеллектуальной системы. Эта система будет объединять контроль за изоляцией и анализ осциллограмм с помощью машинного обучения.

2. Анализ существующих методов прогнозирования нарушений режимов

2.1. Прогнозирование коротких замыканий

Короткие замыкания обычно не возникают внезапно. Чаще всего им предшествуют процессы, которые можно обнаружить при правильном мониторинге.

В работе [1] показано использование LSTM-сетей для диагностики коротких замыканий. Авторы взяли шесть параметров – напряжения и токи трёх фаз. Модель обучали на 12 000 режимах, включая нормальные и с разными короткими замыканиями. Результаты подтвердили точность классификации в 92% и возможность предсказать дуговые короткие замыкания за 50-100 мс до их появления.

В другом исследовании [2] применяли сверточные нейронные сети и частотно-временной анализ для раннего обнаружения дуговых коротких замыканий. Использование вейвлет-преобразования помогло выделить характерные признаки дуговых процессов за 20-50 мс до устойчивого замыкания.

2.2. Контроль состояния изоляции

Старение изоляции – одна из главных причин аварий. Современные методы позволяют оценить текущее состояние изоляции и примерно предсказать остаточный ресурс. В таблице 1 собраны основные методы контроля.

Таблица 1

Методы контроля изоляции для прогнозирования аварий

Метод	Контролируемый параметр	Горизонт прогноза	Точность
Мониторинг частичных разрядов	Интенсивность ЧР	Месяцы – годы	±10-15%
Контроль тока небаланса	Ток нулевой последовательности	Недели – месяцы	Средняя
Анализ высших гармоник	Спектральный состав тока	Дни – недели	Высокая

Анализ трендов изменения токов небаланса позволяет выявить ускоренное ухудшение изоляции за несколько недель до критических значений. Предложены пороговые уровни, при которых система сигнализирует о необходимости ремонта.

2.3. Обработка осциллограмм для выявления предвестников коротких замыканий

Осциллограммы аварийных событий содержат много информации о процессах перед повреждением. На рис. 1 показана общая схема обработки осциллограмм для прогнозирования коротких замыканий, составленная автором на основе исследований [2, 6, 7].

Основные этапы:

1. Сбор данных – получение осциллограмм токов и напряжений.
2. Предобработка – фильтрация шумов, нормализация.
3. Вейвлет-преобразование – разложение сигнала на частотно-временные компоненты.
4. Извлечение признаков – расчёт энергии вейвлет-коэффициентов и статистики.
5. Классификация – определение режима с помощью моделей машинного обучения.

Исследование [6] показало, что дискретное вейвлет-преобразование помогает заметить изменения в спектре тока за 20-50 мс до устойчивого дугового короткого замыкания. При этом энергия вейвлет-коэффициентов на высоких уровнях разложения может возрасти в 3-5 раз по сравнению с нормой.

3. Ограничения существующих подходов

Анализ показал несколько важных ограничений существующих методов:

- подходы слишком разрознены. Сейчас методы направлены на конкретные виды нарушений – например, только короткое замыкание или только проблемы с изоляцией – и их не объединяют в одну систему. Нет комплексного подхода, который учитывал бы и состояние оборудования в данный момент, и изменения параметров во времени;
- большинство систем реагируют уже после аварии, а не пытаются выявить её признаки заранее. Из-за этого оборудование приходится отключать, а электроснабжение прерывается;
- осциллограммы чаще используют для анализа уже случившихся событий, а не для прогнозов. Их потенциал как источника предиктивных данных пока реализован далеко не полностью;
- недостаточно проверок алгоритмов в реальном времени на настоящем оборудовании или моделях. В основном исследования ограничиваются численными симуляциями;
- проблема с качеством данных. Для обучения моделей нужны размеченные данные о предаварийных состояниях, но их сложно получить.

В имеющихся наборах данных чаще всего записаны сами аварии, а не процессы, которые им предшествовали.

4. Концепция интеллектуальной системы прогнозирования нарушений режимов

Для решения этих проблем предложена архитектура интеллектуальной системы с тремя основными блоками.

1. Мониторинг состояния изоляции:

- постоянный контроль токов утечки и частичных разрядов;
- анализ тенденций изменения параметров изоляции;
- формирование сигналов, когда параметры приближаются к критическим уровням.

2. Анализ осциллограмм в реальном времени:

- приём данных от цифровых регистраторов аварийных событий.
- вейвлет-преобразование для выделения высокочастотных компонентов.
- извлечение предиктивных признаков.

3. Прогнозный модуль на основе машинного обучения:

- классификация текущего состояния (Random Forest).
- прогнозирование времени короткого замыкания (LSTM).
- оценка риска каскадного развития аварий (графовые нейросети).

Выбор методов обоснован в таблице 2.

Таблица 2

Обоснование выбора методов машинного обучения

Метод	Область применения	Эффективность
Вейвлет-анализ	Выделение признаков из осциллограмм	Эффективен для анализа нестационарных сигналов, выявления высокочастотных составляющих
Random Forest	Классификация состояния изоляции	Высокая точность, интерпретируемость, устойчивость к выбросам [8]
LSTM	Прогнозирование по временным рядам	Способность учитывать долгосрочные зависимости, эффективность для прогнозирования момента КЗ

Заключение

В ходе исследования были получены следующие основные выводы.

Проведен системный анализ существующих способов прогнозирования проблем в работе электроэнергетических систем. Выяснилось, что наиболее перспективными считаются прогнозирование дуговых коротких замыканий с помощью вейвлет-анализа и LSTM (с точностью до 92% на временном отрезке 50-200 мс), контроль состояния изоляции для оценки оставшегося ресурса (с погрешностью около $\pm 10-15\%$) и анализ осциллограмм для выявления признаков аварий.

Обнаружены важные ограничения нынешних методов: они разобщены, работают по реактивному принципу, недостаточно используют осциллографическую информацию, а проверка данных в реальном времени часто отсутствует.

Предложена схема интеллектуальной системы, которая объединяет блок мониторинга изоляции, блок анализа осциллограмм и прогнозный модуль на базе машинного обучения. Для этого выбраны разные методы: вейвлет-анализ для выделения признаков, Random Forest для определения состояния изоляции, LSTM для прогнозирования момента короткого замыкания и графовые нейросети для оценки риска каскадных сбоев.

Определены направления для дальнейших исследований: сбор и разметка реальных данных о предаварийных состояниях, создание стенда для тестирования алгоритмов и создание прототипа системы с последующим тестированием в реальном времени.

Разработанная концепция становится теоретической базой для создания интеллектуальной системы, которая сможет переходить от реагирования на проблемы к их предупреждению. Это позволит повысить надежность и устойчивость современных электроэнергетических систем.

Список литературы

1. Xiang Y., et al. Short-Circuit Fault Prediction in Distribution Networks Based on LSTM and Wavelet Transform // IEEE Transactions on Power Delivery. 2023. Vol. 38, No. 2. P. 1123-1134.
2. Chen K., et al. Early Detection of Arc Faults Using Convolutional Neural Networks and Time-Frequency Analysis // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 45231-45243.
3. Stone G.C., et al. Practical Techniques for Partial Discharge Measurements // IEEE Industry Applications Magazine. 2019. Vol. 25, No. 3. P. 45-54.

4. Морозов И.А., Шуин В.А. Мониторинг изоляции в сетях с изолированной нейтралью на основе анализа токов утечки // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 4. С. 45-57.
5. Карандаев А.С., Литвинов И.И. Прогнозирование остаточного ресурса силовых трансформаторов по данным частичных разрядов // Электричество. 2020. № 8. С. 34-42.
6. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Севостьянов А.А. Анализ осциллограмм аварийных событий с использованием вейвлет-преобразований // Электричество. 2020. № 4. С. 12-22.
7. Антонов В.И., Наумов И.В. Применение ансамблевых методов машинного обучения для диагностики состояния электрооборудования // Электротехника. 2021. № 5. С. 12-19.