

Применение методов машинного обучения для анализа событий переходных режимов по данным синхронизированных векторных измерений

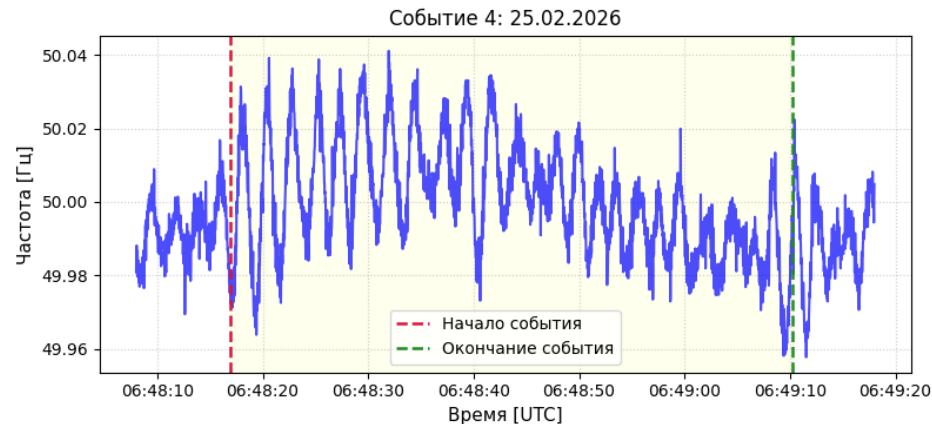
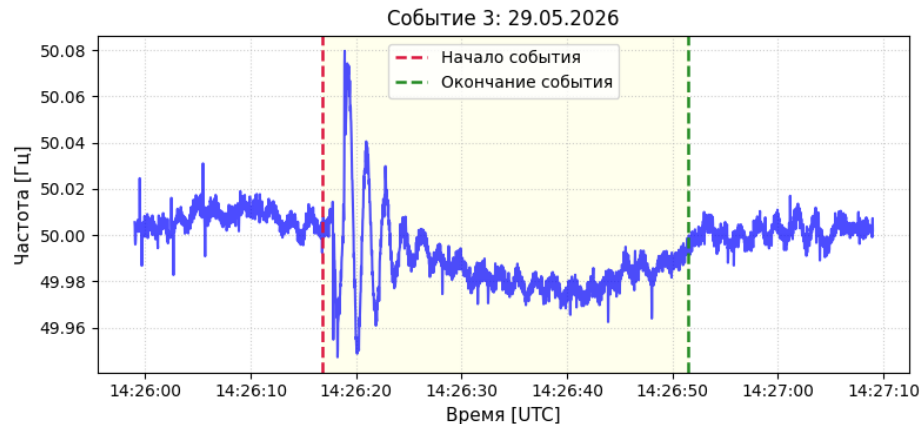
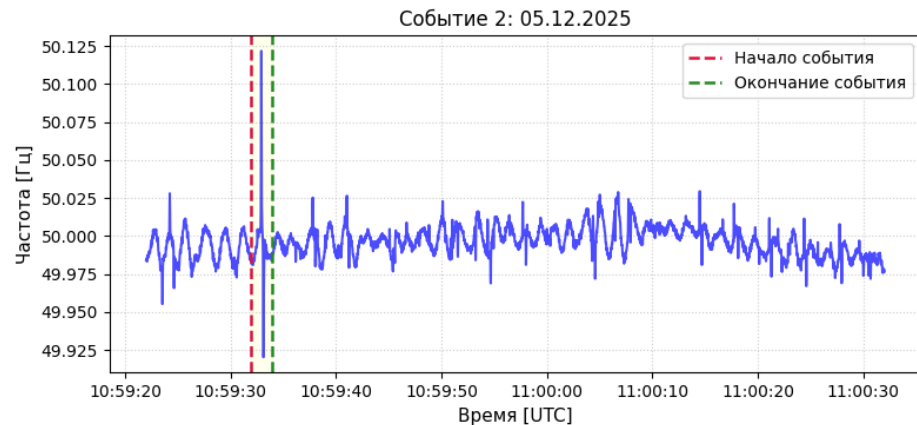
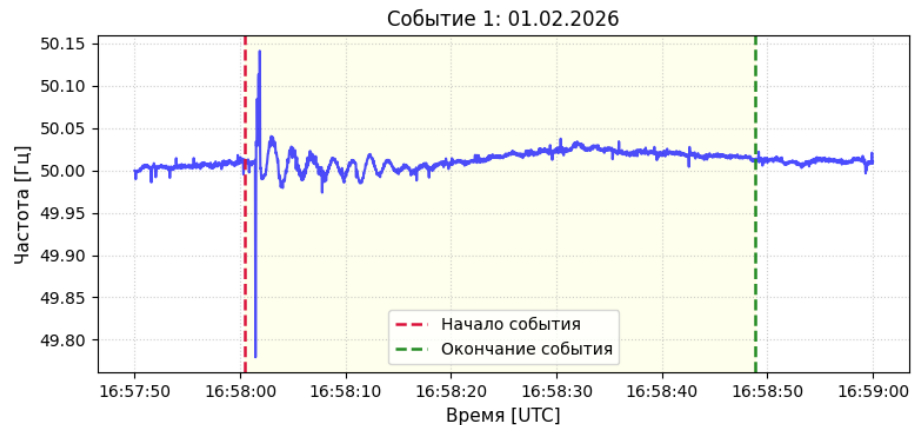
Бутин К.П.* , Попов А.И.* , Буторин Р.М.* , Родионов А.В.*

* ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия

Введение

- Развитие и распространение технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ)
- Активное внедрение методов **машинного обучения** (МО) в различные прикладные сферы
- Программный комплекс ESPhasor для сбора и анализа онлайн потоков данных СВИ
- С сентября 2025 года по май 2026 года зафиксировано **598 событий** (инцидентов) низковольтной сети предприятия
- В докладе предлагается решение задачи **кластеризации событий** (обучение без учителя) на основе векторов признаков, вычисленных из сигналов частоты
- Предлагается обработка событий в **онлайн режиме** с автоматической **условной классификацией**

Исходные данные



Анализ частоты. Метод std. Окно 100 точек. Уставка 0.02 Гц. Гистерезис 0,005 Гц.

Пространство признаков

Расчеты в **10-секундном окне** после момента начала события:

- 1) Максимальный разброс частоты, выражающий размах её колебаний или скачка

$$\Delta f_{\max} = \max_i(f_i) - \min_i(f_i),$$

- 2) Среднеквадратическое отклонение частоты

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}$$

- 3) Максимальная величина скорости изменения частоты

$$\text{ROCOF}_{\max} = \max_i(|\text{ROCOF}_i|), \text{ где } \text{ROCOF}_i = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta t}$$

- 4) Спектральная энергия низкочастотных колебаний E_{LFO} :

$$E_{\text{LFO}} = \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega} |X_k|^2$$

- 5) Пиковая мощность доминирующих колебаний P_{peak}

$$P_{\text{peak}} = \max_{k \in \Omega} |X_k|$$

Фильтрация событий с экстремальными значениями признаков

Алгоритмы МО, основанные на минимизации расстояний, **неустойчивы к единичным экстремальным выбросам**.

Выделены два специальных класса критических инцидентов:

- Класс «**экстремальные скачки**»: $ROCOF_{\max} > 50,0$ или $\Delta f_{\max} > 2,0$ Гц.
- Класс «**экстремальные НЧК**»: $E_{LFO} > 5,0$ Гц² при условии невыполнения критериев первого класса.

Итоговый массив данных передается на вход алгоритму МО.

Кластеризация

- Предварительно выполняется **стандартизация признаков**:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j},$$

где x_{ij} – значение j -го признака для сигнала i ; μ_j и σ_j – среднее значение и среднеквадратическое отклонение признака по всей выборке.

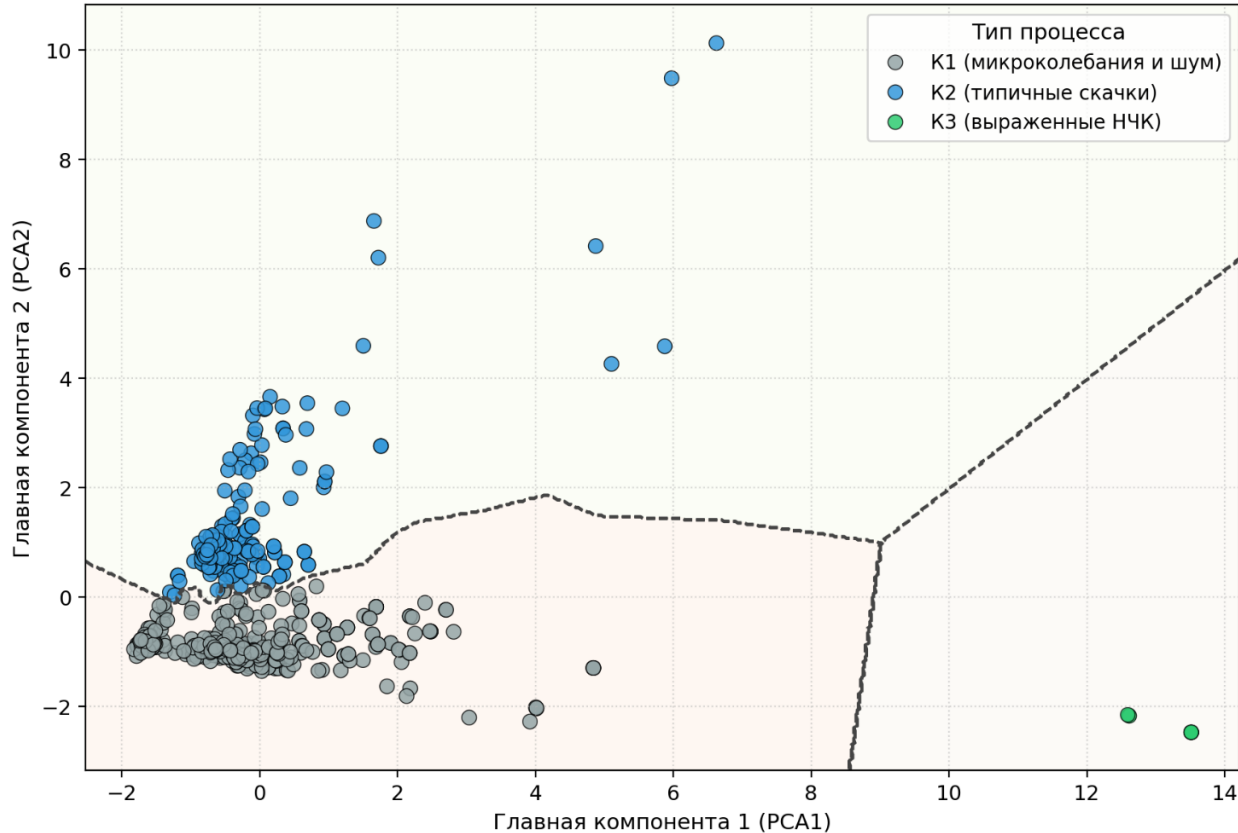
- Для автоматического обнаружения скрытых паттернов применяется алгоритм кластеризации **k-means**.

$$J = \sum_{n=1}^K \sum_{i \in C_n} ||z_i - \mu_n||^2 \rightarrow \min,$$

где $K = 3$ – целевое число кластеров для типичных (т.е. не аномальных) процессов, μ_n – вектор-центроид кластера C_n .

- **Метод главных компонент** (principal component analysis, PCA).

Результаты



К1 (339 событий).

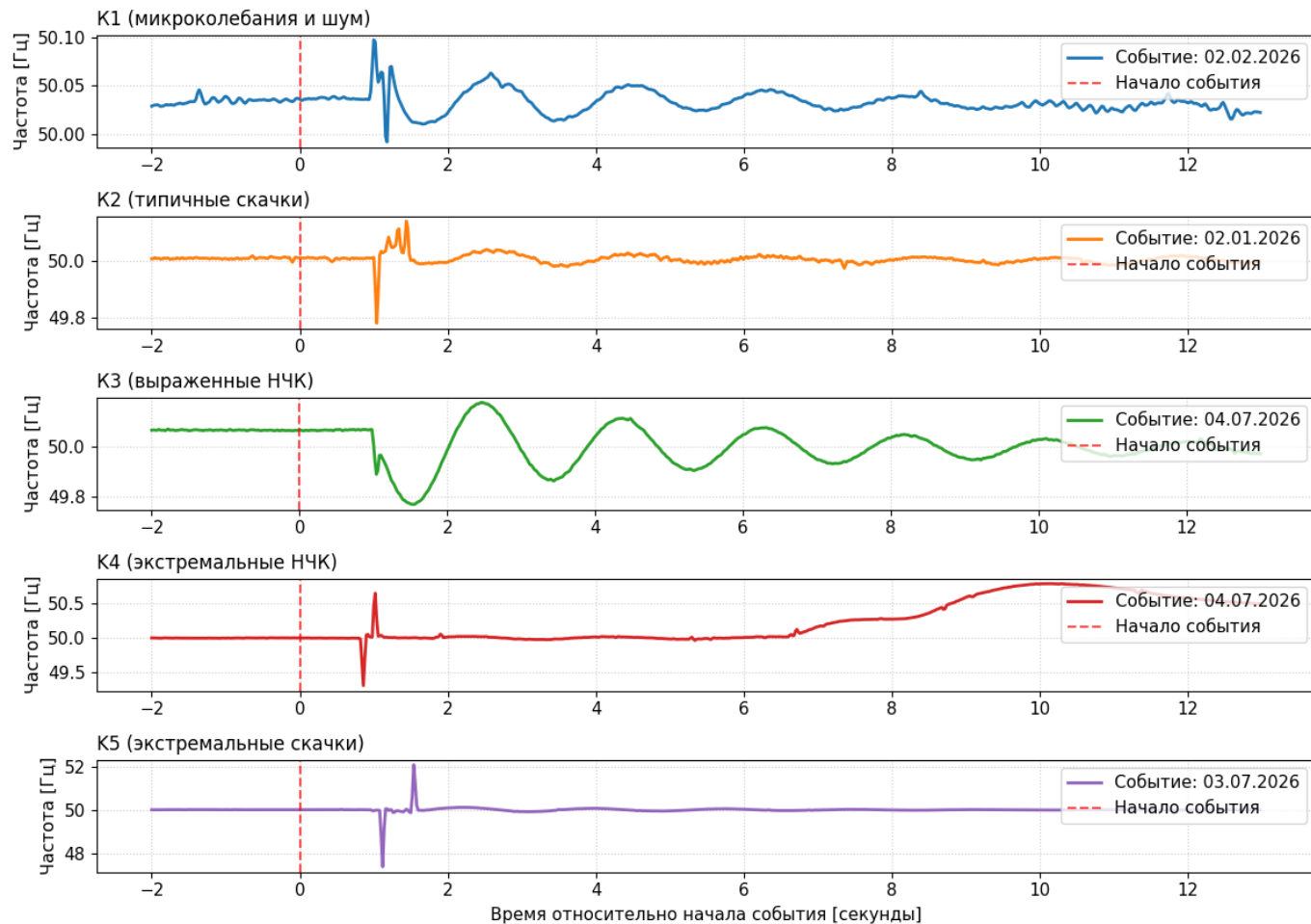
К2 (246 событий)

К3 (5 событий)

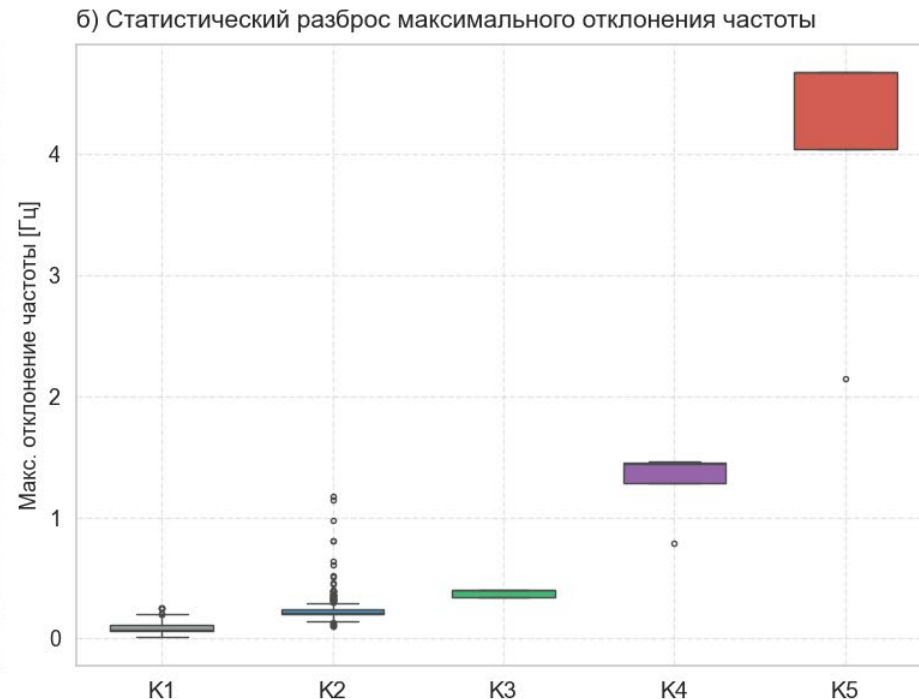
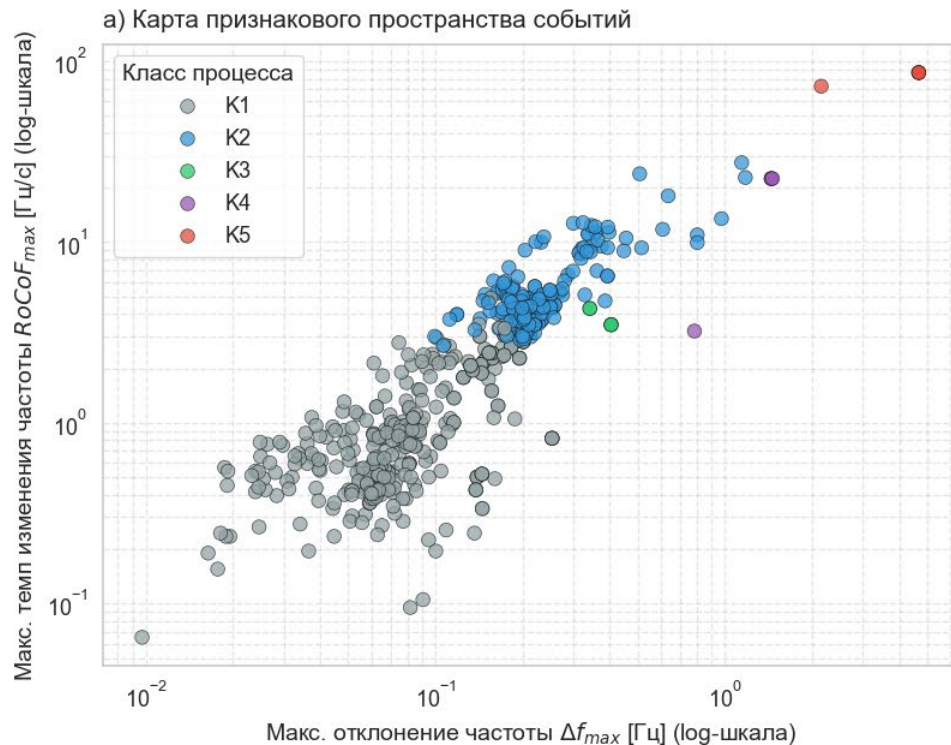
К4 (экстремальные НЧК) и **К5** (экстремальные скачки) – это группы, выделенные на этапе предварительной обработки (по 4 события каждая).

Для нахождения линий, разделяющих кластеры, использован **метод построения решающих границ**

Примеры классифицированных событий



Статистическое распределение по признакам



Центроиды признаков по результатам кластеризации

Кластер	Количество событий	σ_f , Гц	$ROCoF_{max}$, Гц/с	E_{LFO} , Гц ²	P_{peak} , Гц ² /Гц
K1 (Микроколебания и шум)	339	0,016	1,0978	0,0789	3,9104
K2 (Типичные скачки)	246	0,0131	5,3422	0,0279	1,3043
K3 (Выраженные НЧК)	5	0,0828	3,805	1,7072	22,7036
K4 (Экстремальные НЧК)	4	0,2235	17,6225	12,0921	57,7174
K5 (Экстремальные скачки)	4	0,1634	83,065	3,0331	11,688

Заключение

- Рассмотрен подход к **автоматизированному анализу событий** переходных режимов на основе данных СВИ.
- Предложен и внедрен **алгоритм**, обеспечивающий непрерывный сбор потоковых данных СВИ, **обнаружение событий по изменению статистических характеристик частоты** и накопление информации в архиве для последующего анализа.
- В ходе эксплуатации комплекса в низковольтной сети предприятия с сентября 2025 года по май 2026 года зарегистрировано около **600 событий**.
- На основе набора признаков, характеризующих амплитудные, динамические и спектральные свойства сигналов частоты, выполнена **кластеризация** зарегистрированных событий методом k-means с понижением размерности методом главных компонент.
- Показана **возможность автоматического разделения событий на группы**, соответствующие различным типам переходных процессов, включая малые колебания, скачкообразные возмущения и выраженные низкочастотные колебания.
- Совместное использование ансамбля признаков обеспечивает комплексный анализ многомерных параметров переходных процессов, позволяя автоматизировать разделение сложных режимов без необходимости задания изолированных одномерных порогов.

Спасибо за внимание!

Кирилл Павлович Бутин

ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия

k.butin@ens.ru,