



инженерный центр
энергосервис

Практические аспекты обработки данных системы мониторинга переходных режимов в задачах анализа низкочастотных колебаний

Родионов А.В., к.т.н. Попов А.И., Бутин К.П.

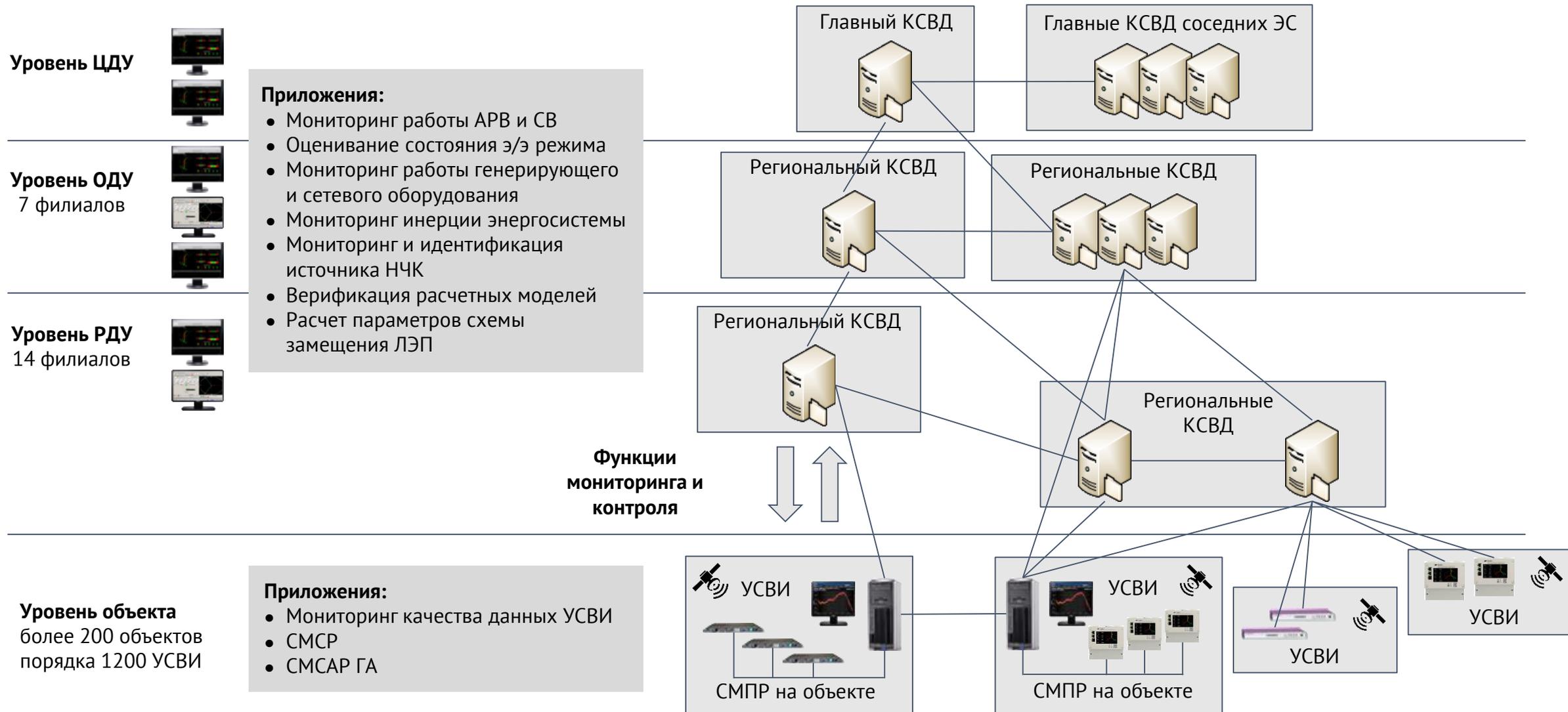
ООО «Инженерный центр «Энергосервис»

г. Архангельск

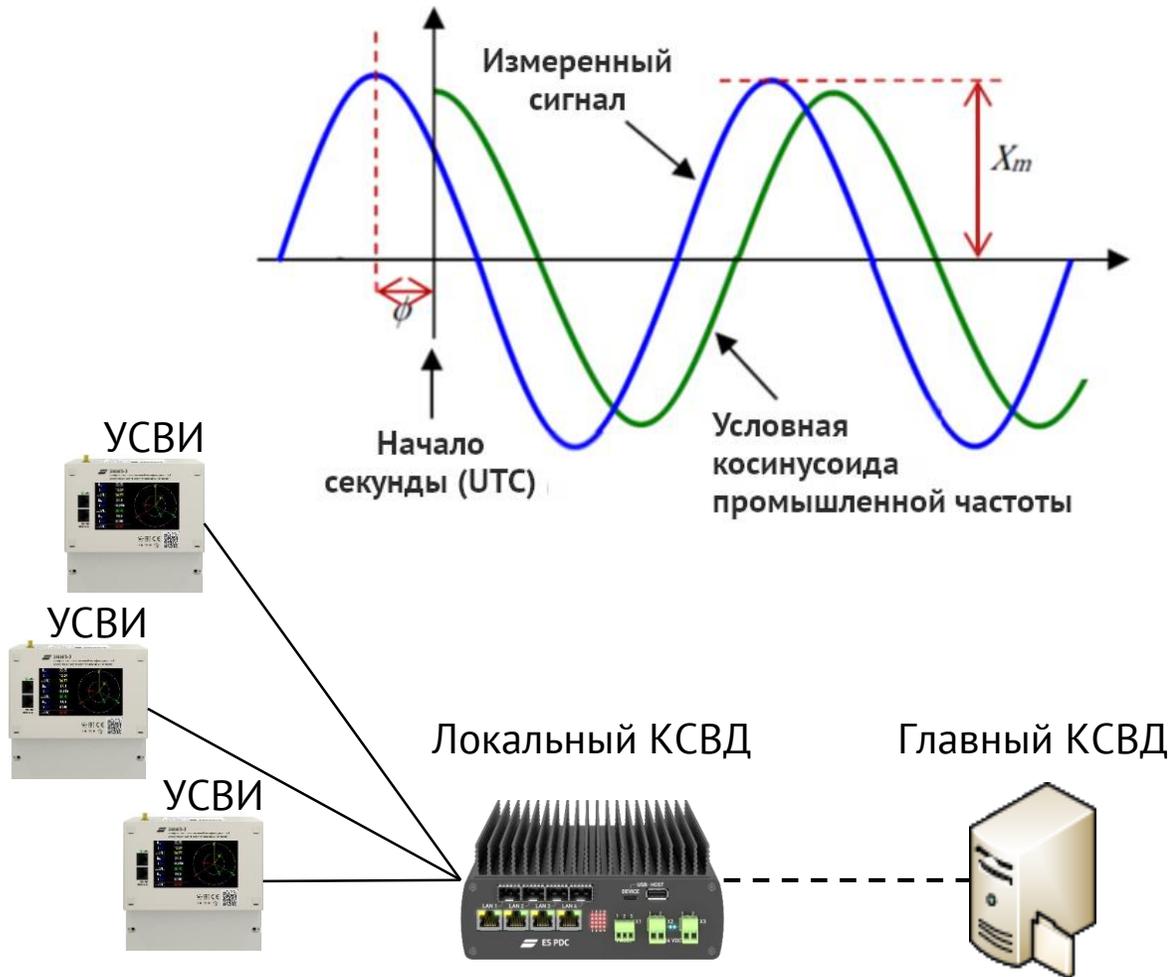
a.rodionov@ens.ru

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: РАЗВИТИЕ И УПРАВЛЕНИЕ»
Санкт-Петербург, 10-12 сентября 2025 г.**

СМПР ЕЭС России



Данные СМПР



- Измерения и передача данных согласно стандарту IEEE C37.118
- Передача данных от каждого УСВИ 50 раз в секунду
- Офлайн данные – расширенный набор параметров за выбранный интервал времени
- Онлайн поток данных – ограниченный набор параметров (зависит от количества УСВИ на объекте):
 - ≤ 4 УСВИ: $U_a, U_b, U_c, I_a, I_b, I_c, P, Q, f, df/dt$
 - > 4 УСВИ: $U_1, I_1, P, Q, f, df/dt$

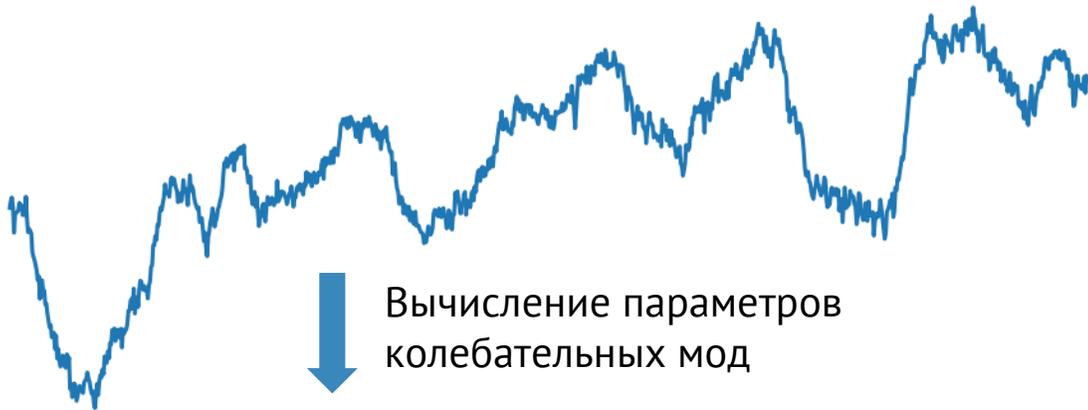
Применение технологии СВИ

- Система мониторинга САР ГА:
 - Новосибирская ГЭС, 2023 г., **совместно с НТЦ ЕЭС**
- Мониторинг состояния силового трансформатора:
 - ПС 110 кВ «Орбита», 2025 г.
- Реализация алгоритмов РЗА с применением СВИ:
 - РТП 2071 (ВТП Сампсониевская), 2024 г.



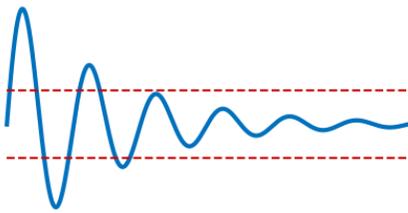
Задача мониторинга НЧК

Сигнал УСВИ



Вычисление параметров колебательных мод

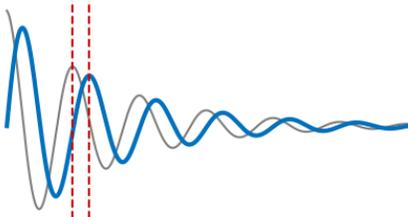
Амплитуда



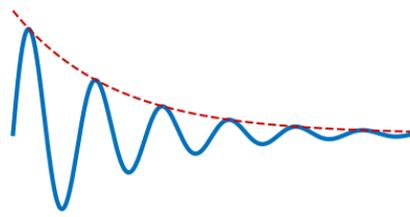
Частота



Фаза



Время затухания

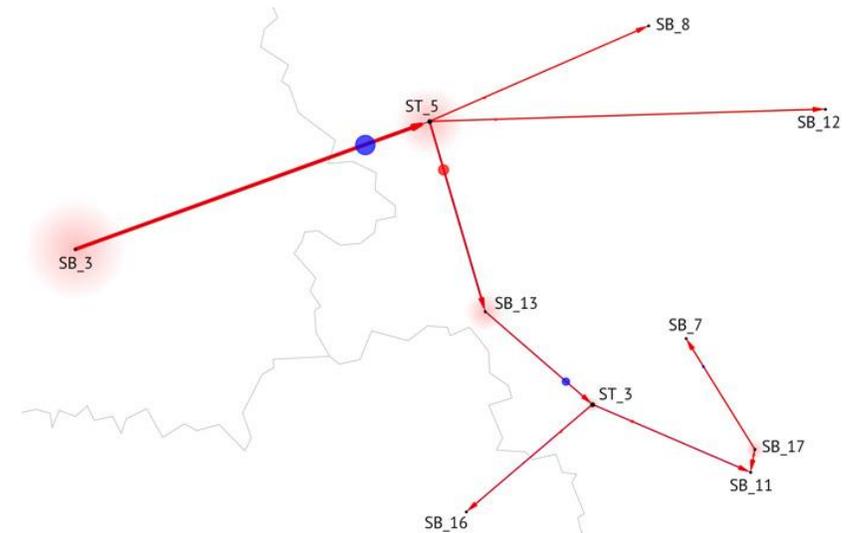


Поиск источника



Выявление высокоамплитудных плоходемпфируемых низкочастотных колебаний.

Применение СВИ → вычисление параметров НЧК и поиск источника в режиме реального времени

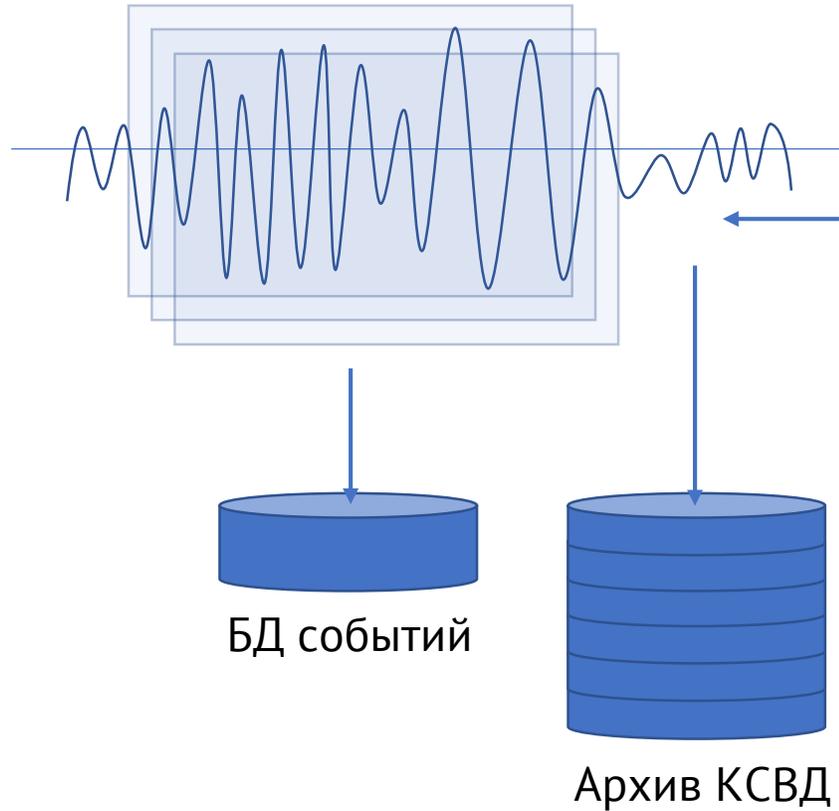


Аспекты реализации задачи анализа НЧК

- Методологическая незавершённость, разнообразие подходов, согласование результатов применения нескольких методов.
- Поиск источника колебаний в энергосистеме при ограниченном количестве УСВИ.
- Большой объём анализируемых данных, поступающих в режиме онлайн.
- Контроль качества массивов входных данных.
- Тестирование решений при недостатке реальных случаев НЧК с достоверно известным источником, сложности моделирования в масштабе энергосистемы.

Обнаружение событий (триггер)

Анализаторы



Методы поиска источников НЧК

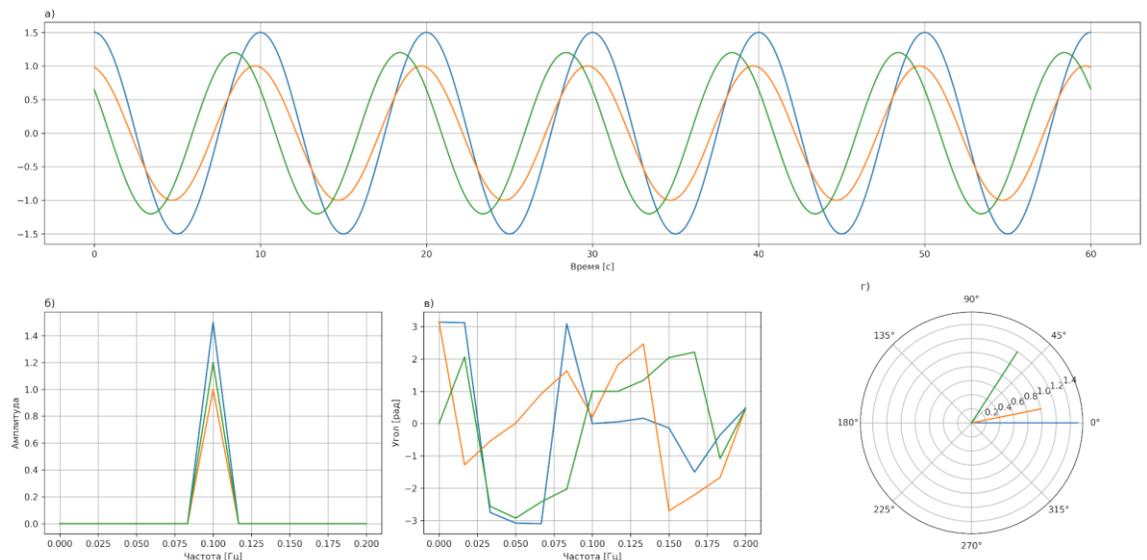
Оценка роли **генераторов** в развитии колебательного процесса, анализ **энергии** колебаний, сравнение **амплитудно-фазовых** параметров колебаний, анализ распространения **волн** в энергосистеме, сопоставление измерительных данных с результатами **моделирования**, статистическая обработка данных и анализ **графа** энергосистемы, накопление данных и **машинное обучение** и др.

Dissipating energy flow (DEF): анализ энергии, рассеиваемой в результате колебаний

$$W_{kn}^D = 2\pi \int \Delta P_{kn} \Delta f_k dt + \int \frac{\Delta Q_{kn}}{\tilde{U}_k + \Delta U_k} d\Delta U_k$$

ΔP_{kn} , ΔQ_{kn} , Δf_k и ΔU_k параметры изучаемой колебательной составляющей: активная, реактивная мощности на линии $k-n$, амплитуда частоты и напряжения; \tilde{U}_k – среднее значение напряжения в точке k

Mode shape estimation (MSE): сравнение полных фаз колебательных составляющих



Верификация входных данных

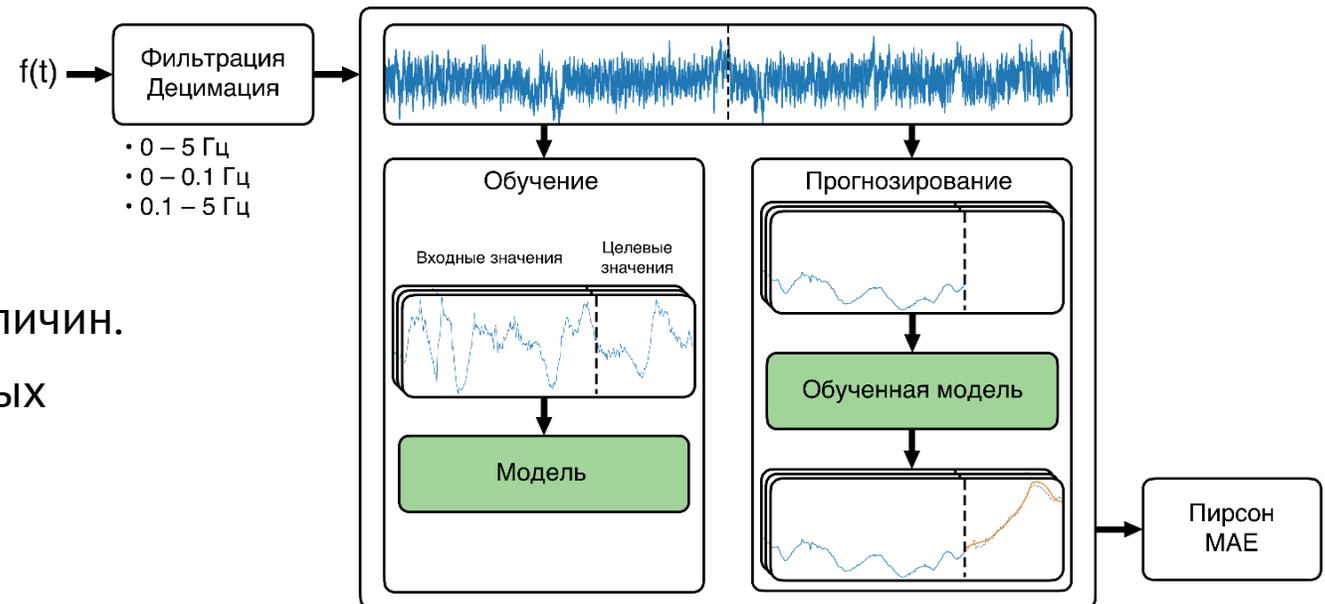
Понятие «аномалии данных»:

- Признак нарушения качества данных.
- Любое несоответствие абстрактной модели, выражающей общие свойства энергосистемы.

Примеры:

- Выход измерений за физические или технологические допустимые границы.
- Константные значения динамических величин.
- Некоррелированные сигналы от связанных энергообъектов.
- «Скрытые» аномалии в статистическом распределении, гармоническом составе сигналов, сингулярных числах, энтропии и т.п.

Прогнозирование временных рядов измеряемых величин: значительное отклонение от прогноза может указывать на аномалию в данных [1].



[1] Бутин К.П., Попов А.И., Угрюмов И.А., Родионов А.В. **Применение методов машинного обучения для прогнозирования сигналов системы мониторинга переходных режимов** // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики, 2025. Новосибирск.

Тестирование: виртуальный СМПР

- **Ретрансляция, размножение потоков**
- **Воспроизведение** записей КСВД (Comtrade 2013, приложение Н)
- **Синтез** на основе моделей сигналов и реальных данных УСВИ
- **Доступные манипуляции:** смещение и дребезг меток времени; отправка пустых кадров; создание задержек; внесение искажений, импульсов, шума и др. в реальном времени

ESPG Модель трансформатора

ESPG Конфигурация Статус Данные Модель трансформатора

Модификация

Данные

Шум, σ
0,0002 - +

Импульс, k
2,00 - + $\sqrt{\wedge}$

Случайное искажение, %
0 - +

Nap
 Не отправлять кадры

Время

Дребезг, μs
0 - +

Смещение ⌚

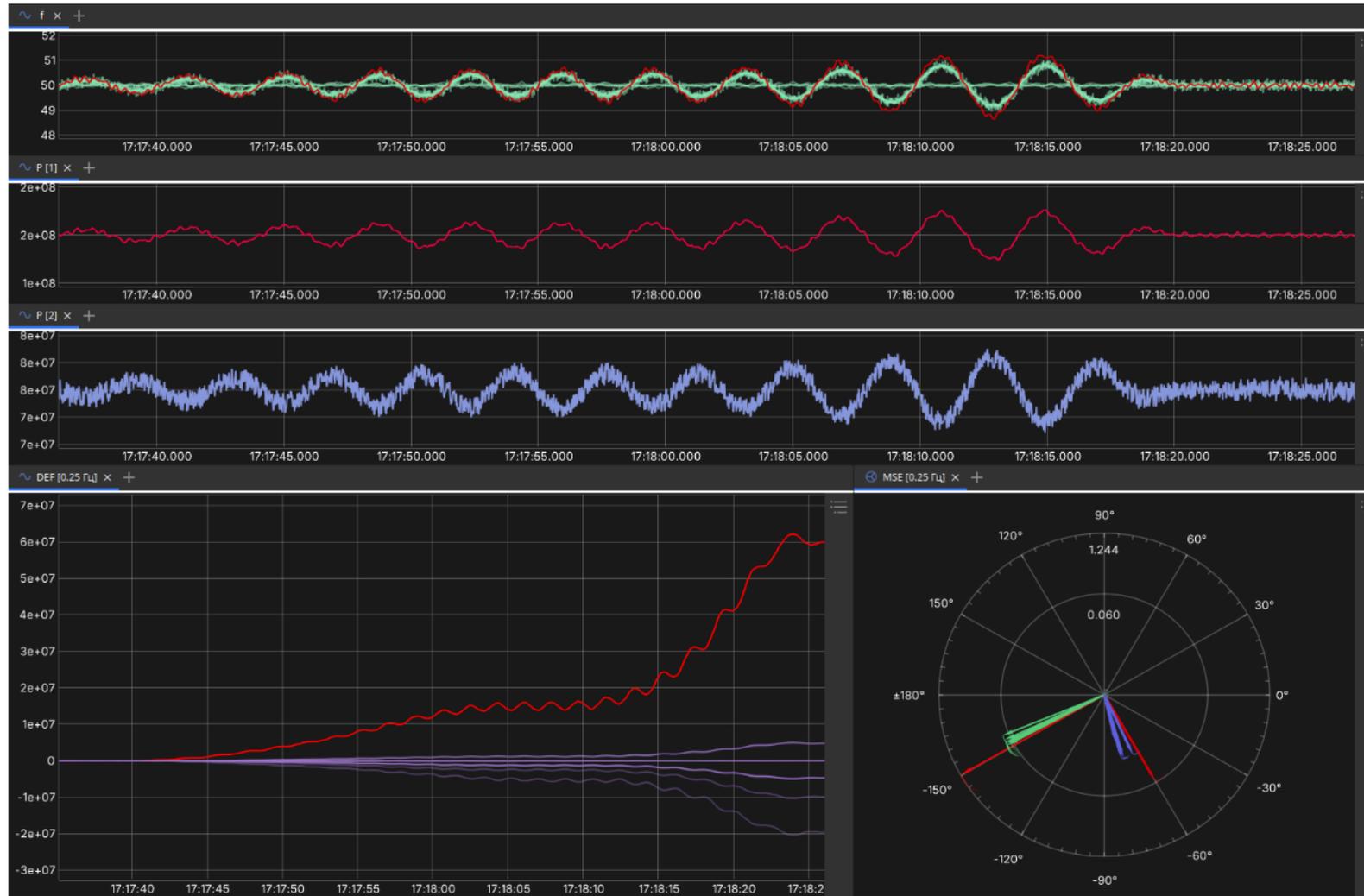
	High side	Low side
Freq	50.14241	Freq 50.07977
Dfreq	0.00686	Dfreq 0.00686
Ua.Am(V)	19614.25000	Ua.Am(V) 3129.81860
Ua.Ph(V)	155.10870	Ua.Ph(V) 124.67816
Ub.Am(V)	21323.37891	Ub.Am(V) 3222.44580
Ub.Ph(V)	35.44498	Ub.Ph(V) 5.01445
Uc.Am(V)	20216.40625	Uc.Am(V) 3595.20410
Uc.Ph(V)	-85.17669	Uc.Ph(V) -115.60721
Ia.Am(I)	22.28570	Ia.Am(I) 100.37050
Ia.Ph(I)	116.37726	Ia.Ph(I) 98.83624
Ib.Am(I)	21.52781	Ib.Am(I) 96.98711
Ib.Ph(I)	-3.28647	Ib.Ph(I) -20.82748
Ic.Am(I)	24.21984	Ic.Am(I) 98.80365
Ic.Ph(I)	-123.90811	Ic.Ph(I) -141.44913

Удаленный источник

Поток C37 | ⌵ Стоп

Тестирование: имитация масштабных НЧК

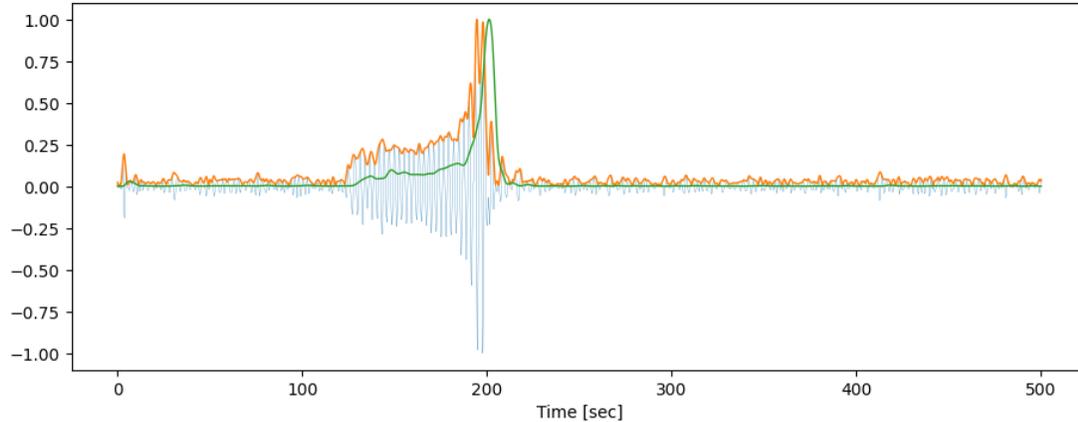
Анализ потока
диссипативной
энергии (DEF)



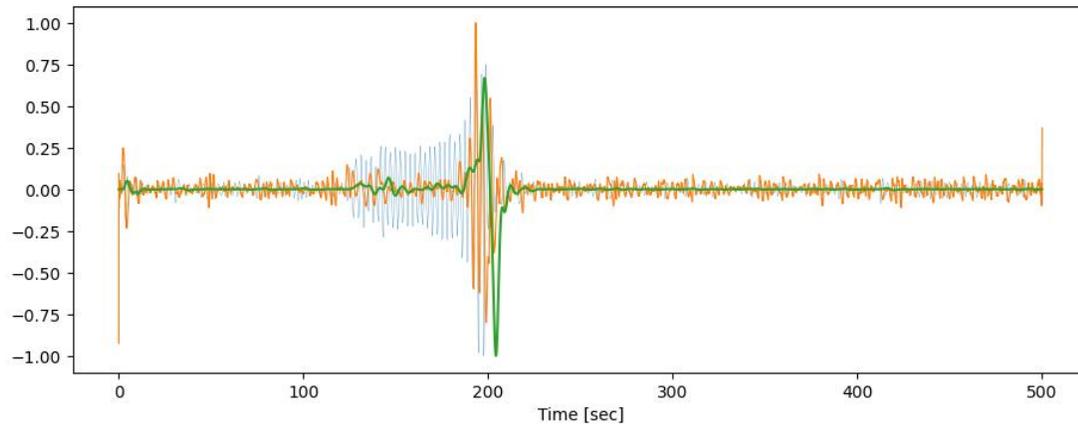
Сравнение
амплитудно-
частотных
параметров
колебаний:
 $\angle U, \angle I$

Представление данных

Амплитуда и средняя мощность моды



Скорость изменения уровня сигналов моды

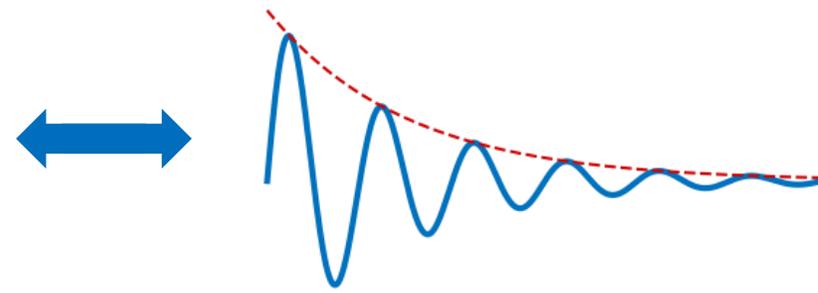


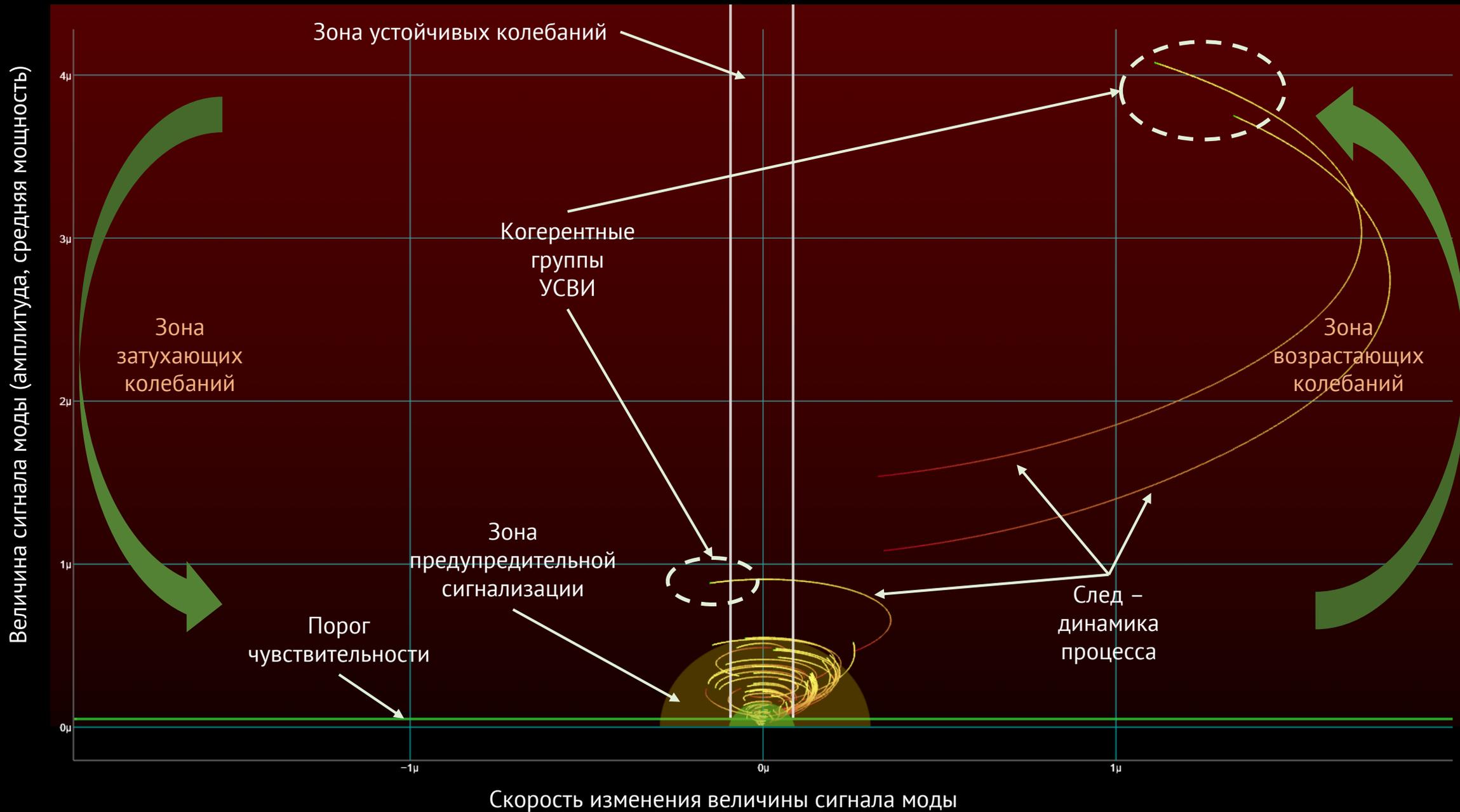
Динамика колебательного процесса выделенной моды.

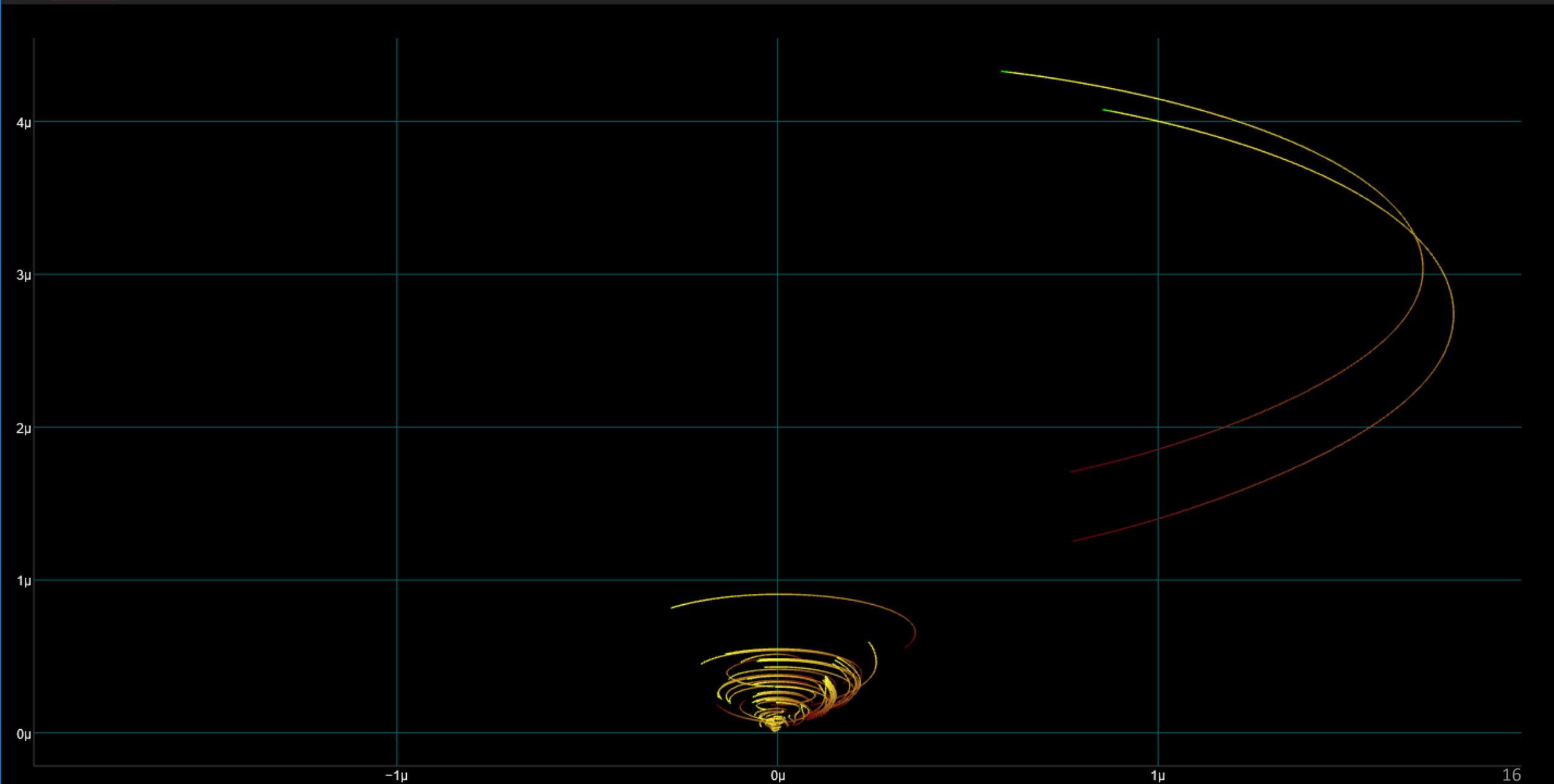
Оценка скорости изменения сигнала и времени затухания.

Проблема графического представления большого количества параметров мод.

Время затухания

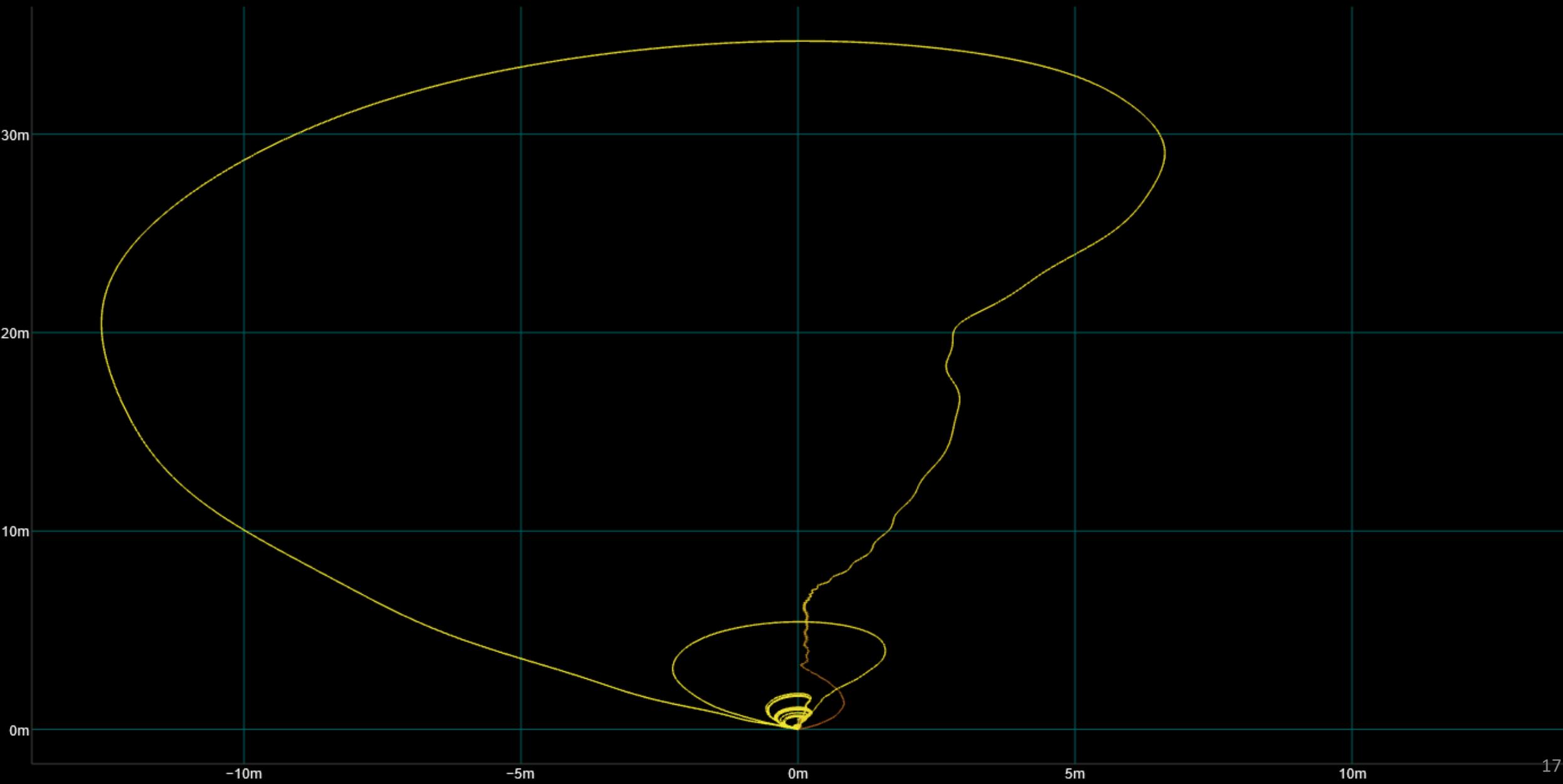


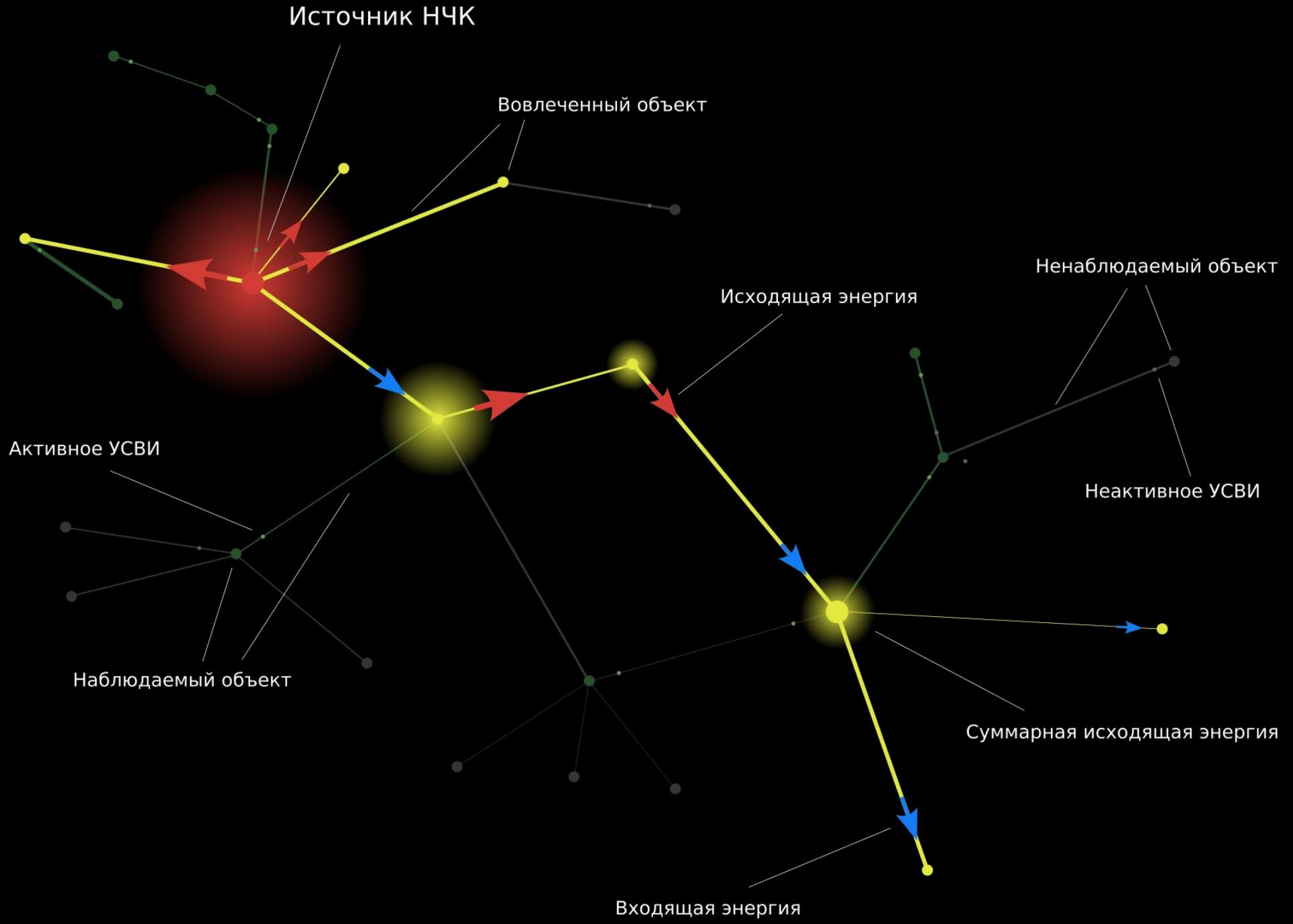






Закреть







17.11.2022, 12:35:20,0

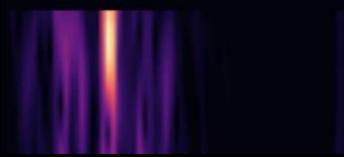
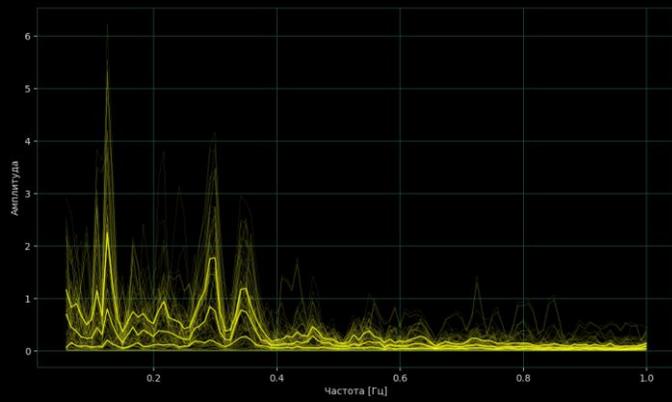
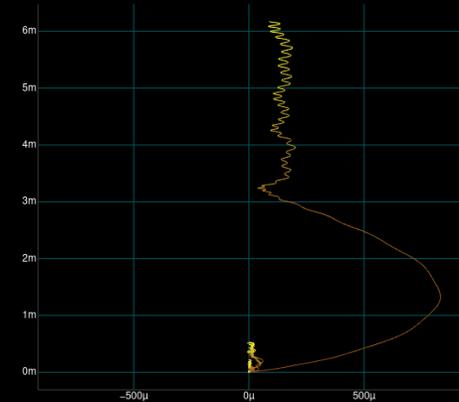
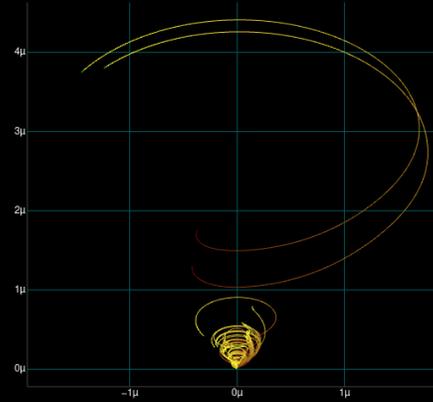
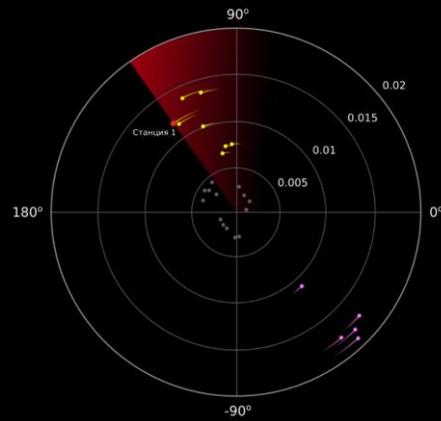
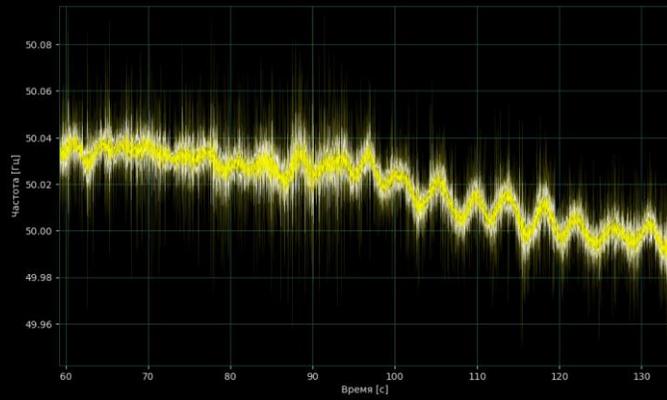


Настройки данных



500 km







инженерный центр
энергосервис

Спасибо за внимание!

Андрей Родионов
a.rodionov@ens.ru

enip2.ru