



Всероссийская научная конференция с международным участием
Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2023
21-23 ноября 2023, Челябинск

Интеллектуальный анализ временных рядов в задачах цифровой индустрии

М.Л. Цымблер, Я.А. Краева, А.И. Гоглачев, А.А. Юртин

{[mzym](mailto:mzym@susu.ru), [kraevaya](mailto:kraevaya@susu.ru), [goglachevai](mailto:goglachevai@susu.ru), [iurtinaa](mailto:iurtinaa@susu.ru)}@susu.ru

Лаборатория больших данных и машинного обучения ЮУрГУ



Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-21-00465)

Анализ временных рядов цифровой индустрии

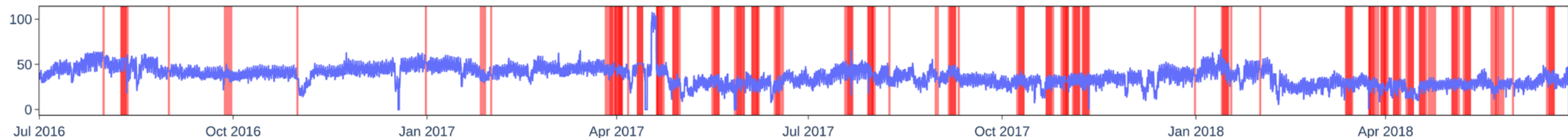


- Параллельные алгоритмы и нейросетевые модели анализа временных рядов
 - Поиск аномалий и шаблонов
 - Прогноз (восстановление)
- Применение разработок в реальных проектах
 - Обнаружение дефектов сварных швов по временным рядам электродуговой сварки
 - Прогноз остаточного ресурса подшипников прокатного стана по временным рядам вибродиагностики

Агностические:
не требуют знаний
о предметной области

Аномалии временных рядов

2-годичное энергопотребление в Китае*

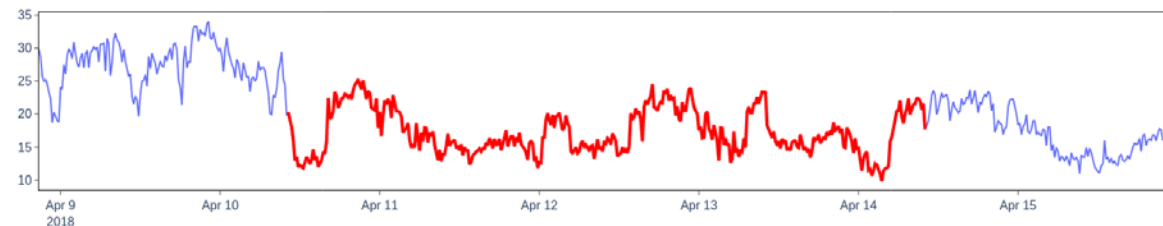
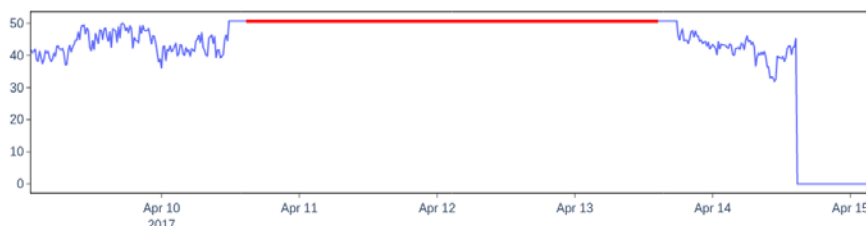
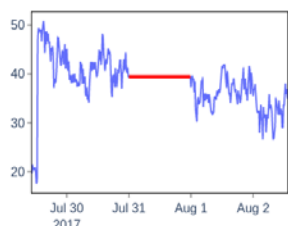


1 день

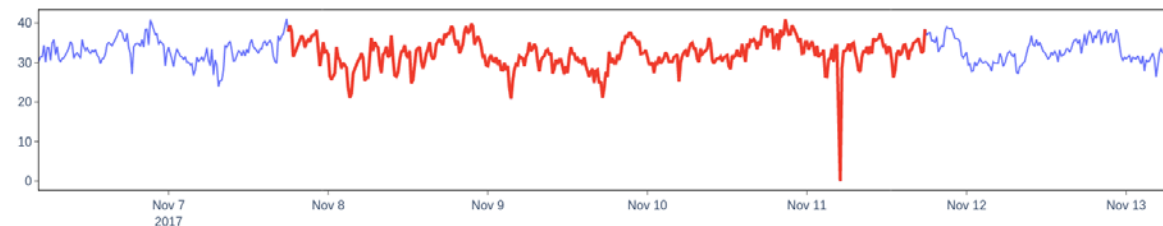
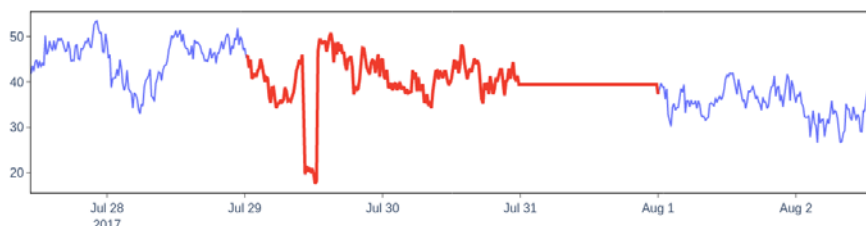
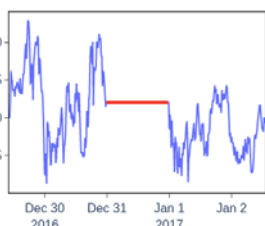
3 дня

4 дня

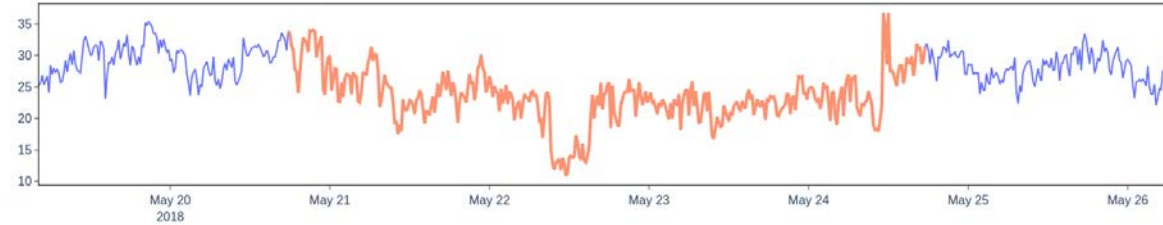
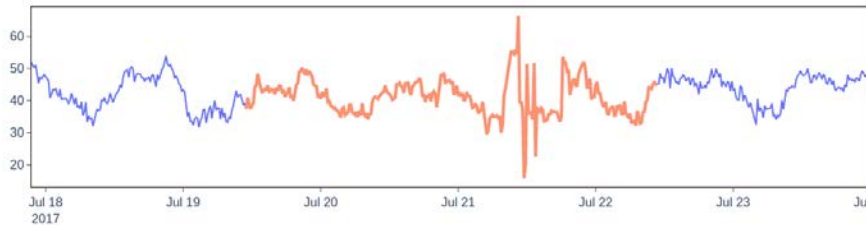
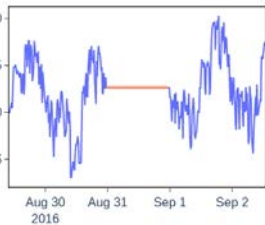
Топ-1
аномалия



Топ-2
аномалия



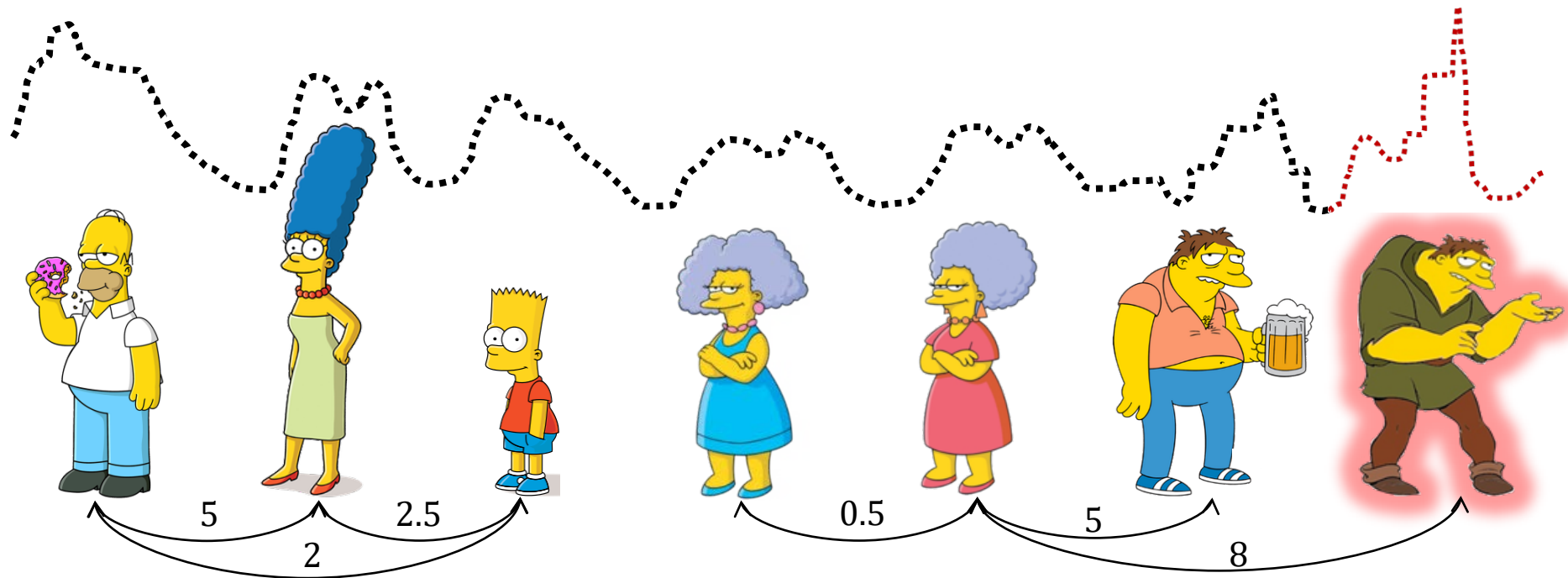
Топ-3
аномалия



* Zhou H. *et al.* Informer: beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting. AAAI 2021. pp. 11106-11115. DOI: [10.1609/aaai.v35i12.17325](https://doi.org/10.1609/aaai.v35i12.17325).

Формализация аномалии временного ряда

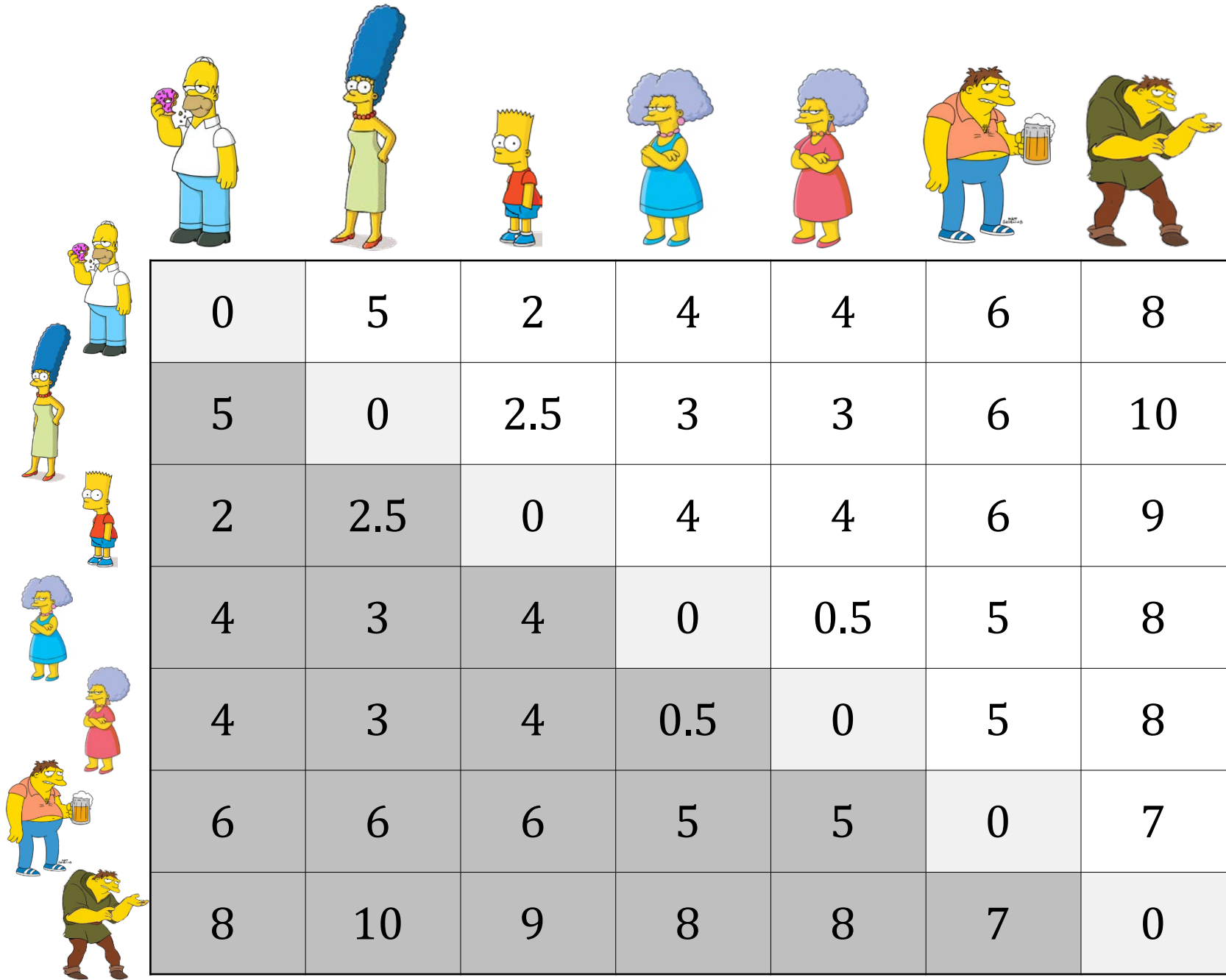
- **Диссонанс*** – подпоследовательность заданной длины, расстояние от которой до ее ближайшего соседа максимально
- *Ближайший сосед* – наиболее похожая подпоследовательность



* Keogh E. et al. HOT SAX: Efficiently finding the most unusual time series subsequence. ICDM 2005. pp. 226-233. DOI: [10.1109/ICDM.2005.79](https://doi.org/10.1109/ICDM.2005.79)

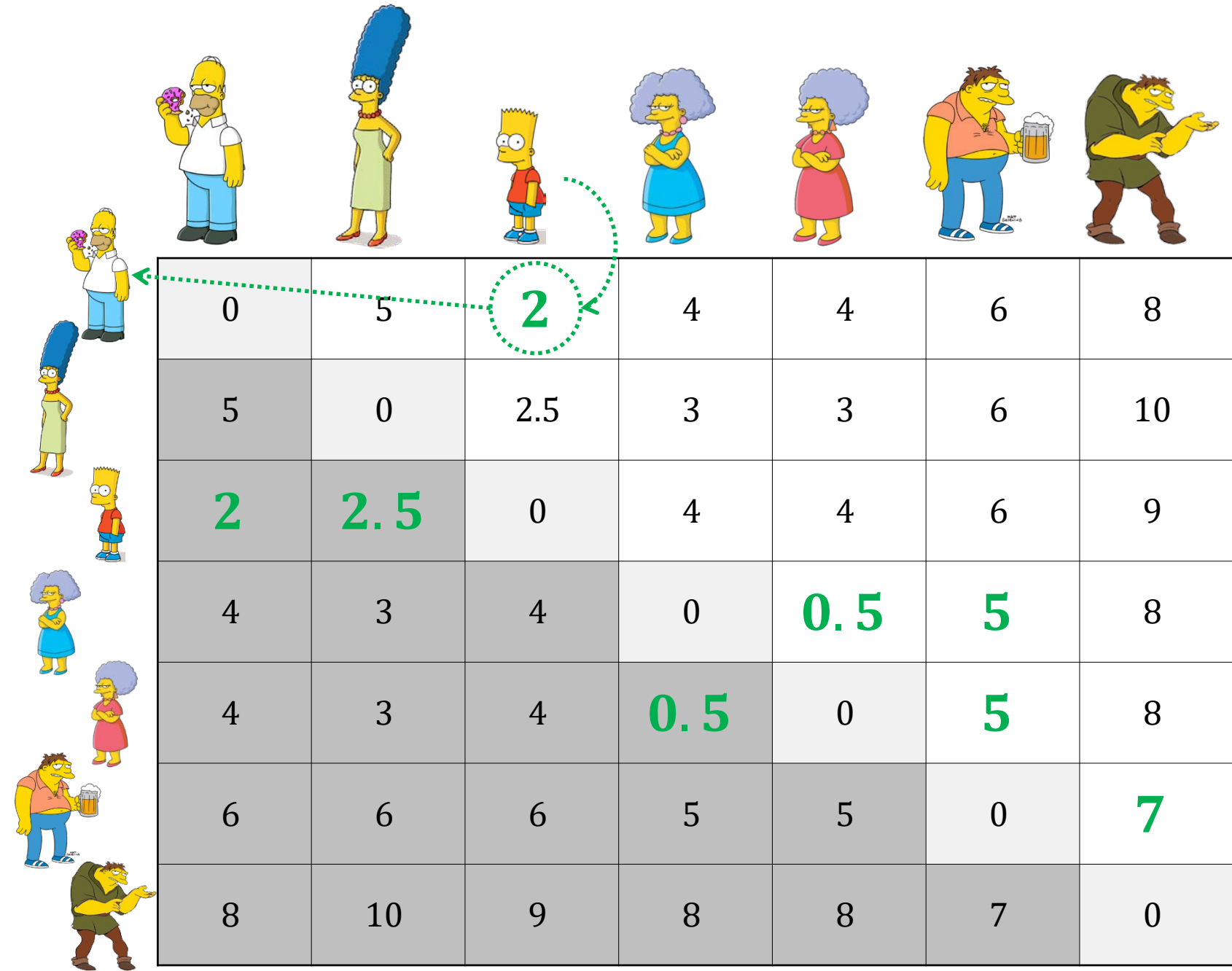
Диссонансы

Матрица расстояний:
чем ближе соседи,
тем более они похожи



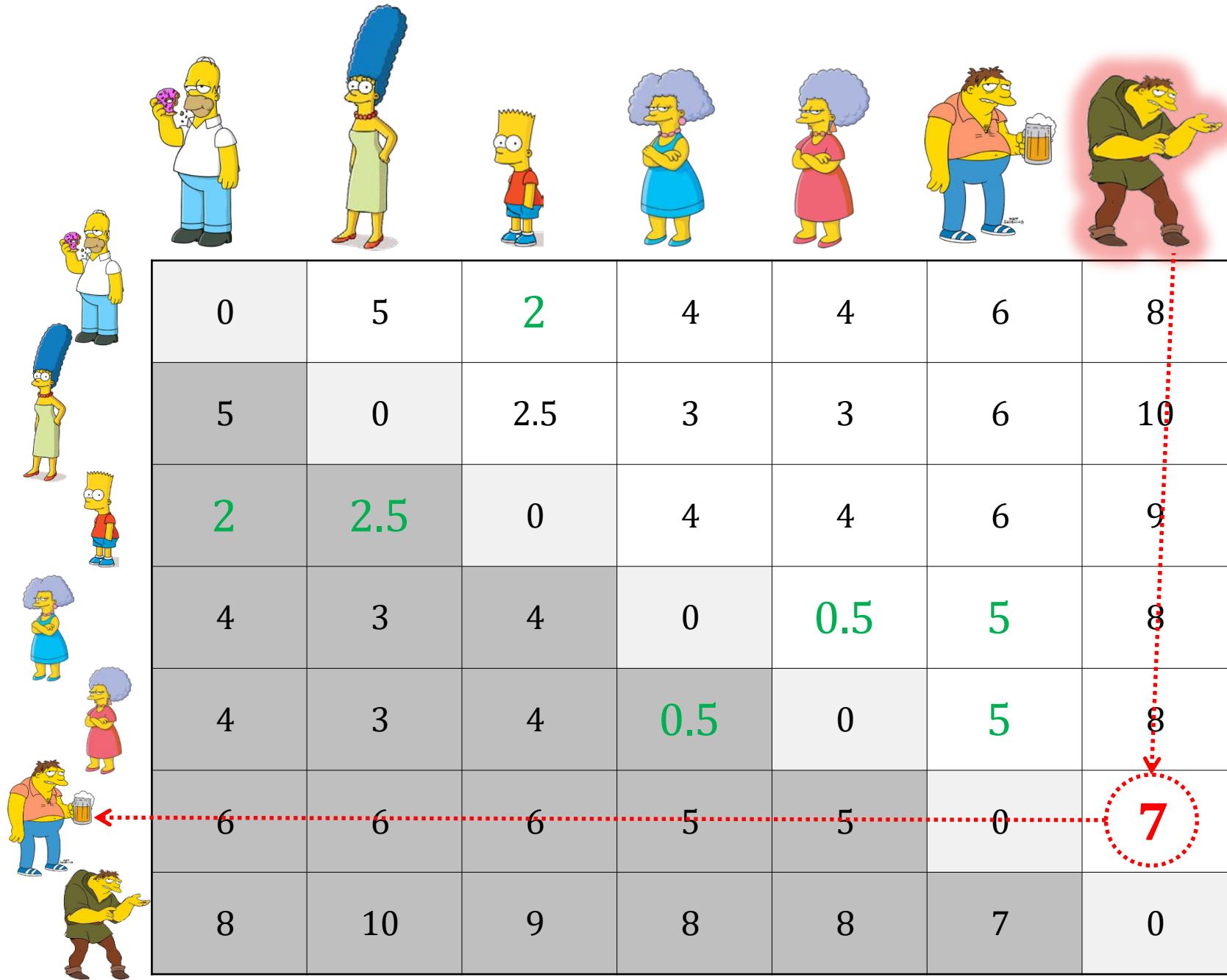
Диссонансы

Матрица расстояний
с расстояниями
до ближайших соседей
(минимумы по столбцам)



Диссонансы

Матрица расстояний
с **максимальным**
расстоянием
до ближайшего соседа
(максимум
минимумов по столбцам)



Параллельные алгоритмы поиска диссонансов ряда

- Поиск диссонансов фиксированной длины на GPU¹⁾
- Поиск диссонансов произвольной длины на GPU²⁾
- Поиск диссонансов произвольной длины на суперкомпьютерном кластере с GPU узлами³⁾
- Поиск диссонансов фиксированной длины на суперкомпьютерном кластере с многоядерными CPU узлами⁴⁾

¹⁾ Kraeva Y., Zymbler M. A parallel discord discovery algorithm for a graphics processor. Pattern Recognition & Image Analysis. 2023. 33(2). pp. 101-112. DOI: [10.1134/S10546661823020062](https://doi.org/10.1134/S10546661823020062).

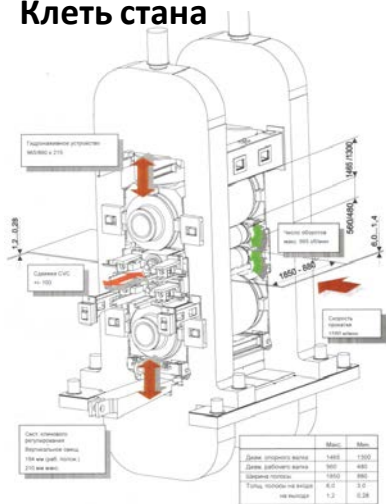
²⁾ Zymbler M., Kraeva Y. High-performance time series anomaly discovery on graphics processors. Mathematics. 2023. 11(14). art. 3193. DOI: [10.3390/math11143193](https://doi.org/10.3390/math11143193).

³⁾ Kraeva Y., Zymbler M. Anomaly detection in long time series on high-performance cluster with GPUs. Numerical Methods & Programming. 2023. 24(3). pp. 291-304. DOI: [10.26089/NumMet.v24r320](https://doi.org/10.26089/NumMet.v24r320).

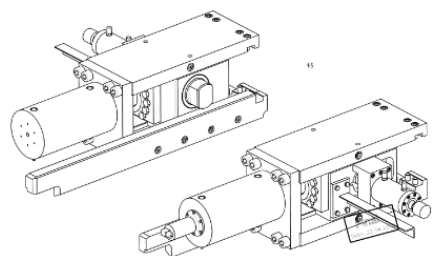
⁴⁾ Zymbler M., Grents A., Kraeva Ya., Kumar S. A parallel approach to discords discovery in massive time series data. Computers, Materials & Continua. 2021. 66(2). pp. 1867-1876. DOI: [10.32604/cmc.2020.014232](https://doi.org/10.32604/cmc.2020.014232).

Аномалии в работе узлов прокатного стана

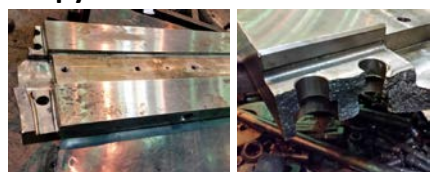
Клеть стана



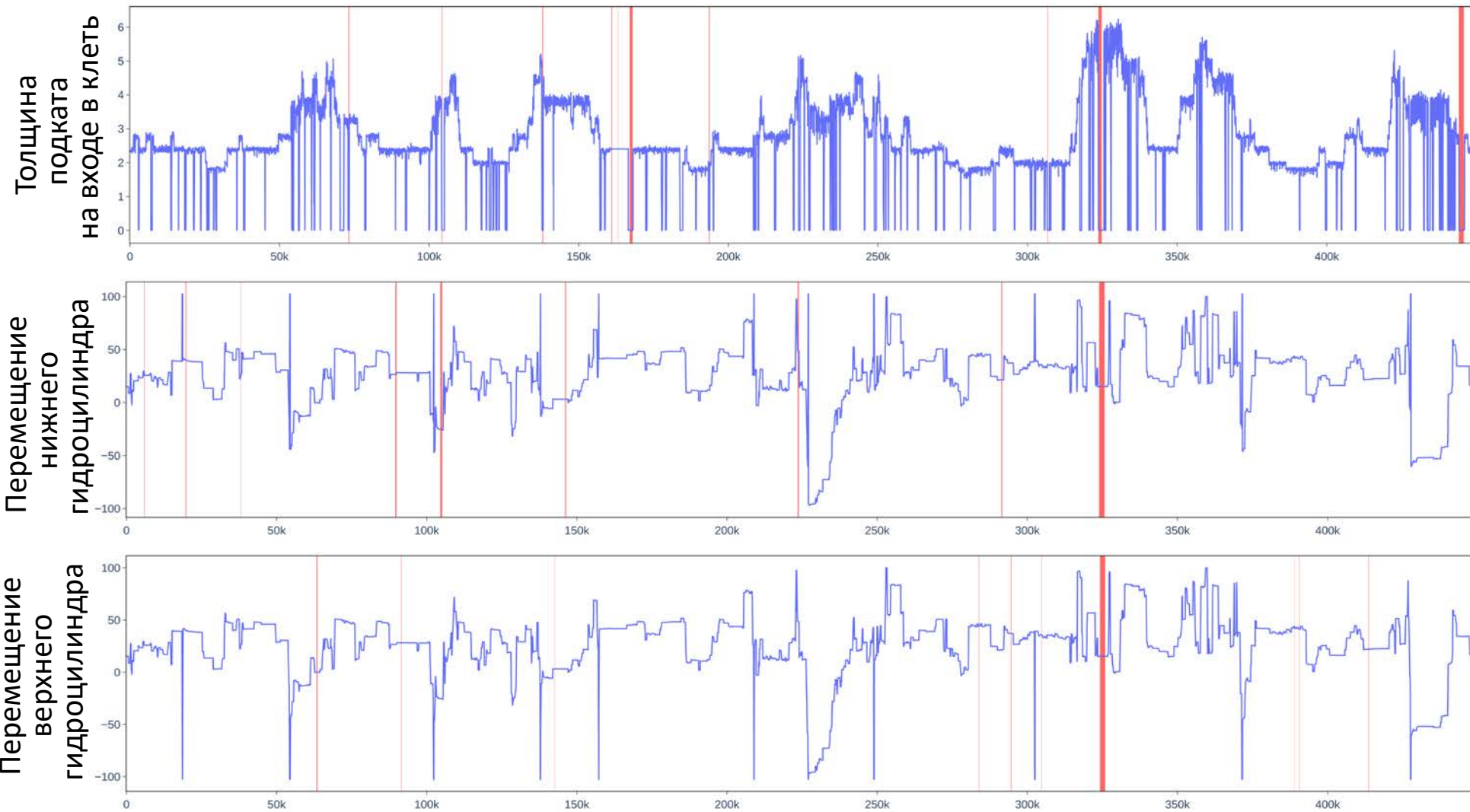
Система валков с непрерывно изменяемой кривизной (CVC, continuously variable curvature)



Разрушение плит CVC

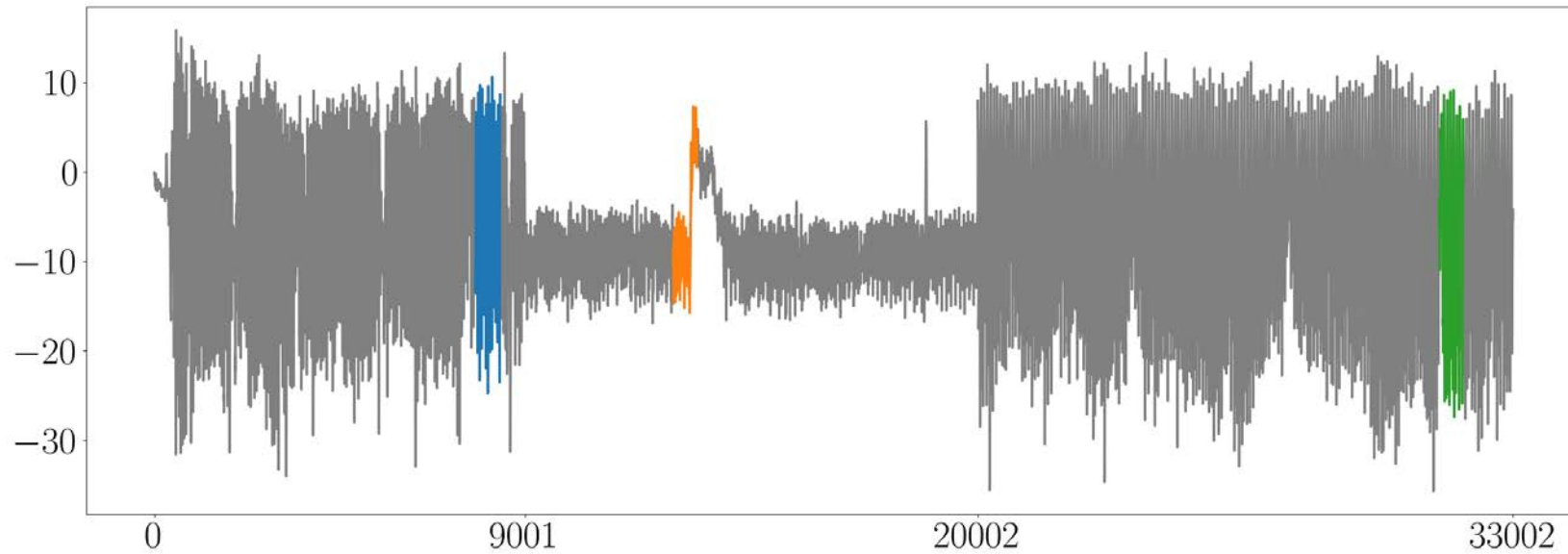


Аномалии за период 12.05.2021 – 18.05.2021 длительностью 1-30 мин

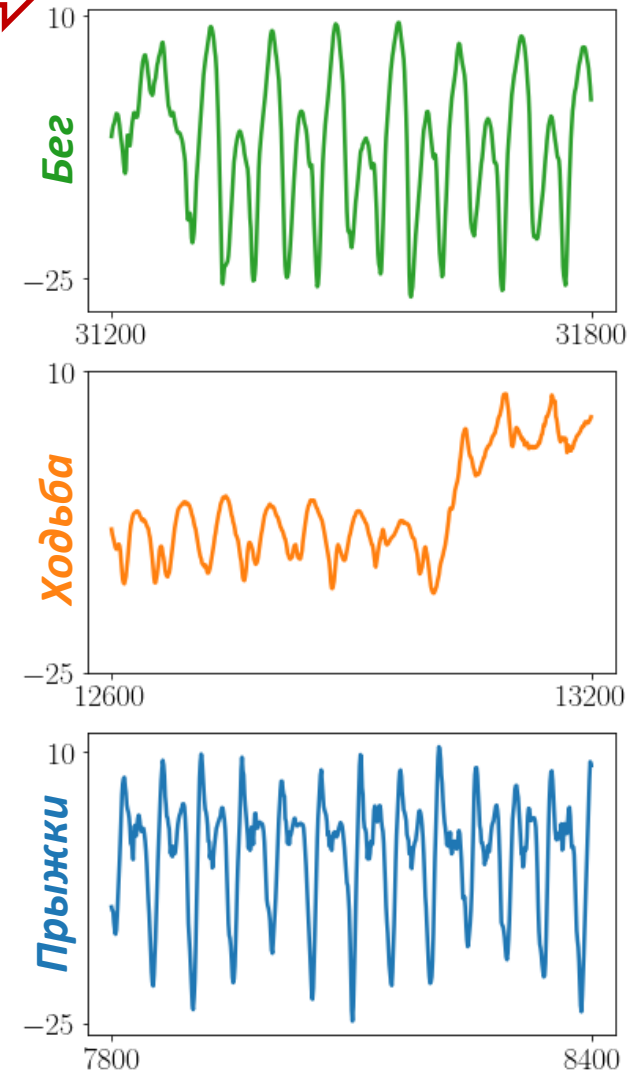


Поведенческие шаблоны временного ряда

Показания носимого виброакселерометра во время тренировки



Найденные шаблоны



Разметка показаний виброакселерометра на основе шаблонов

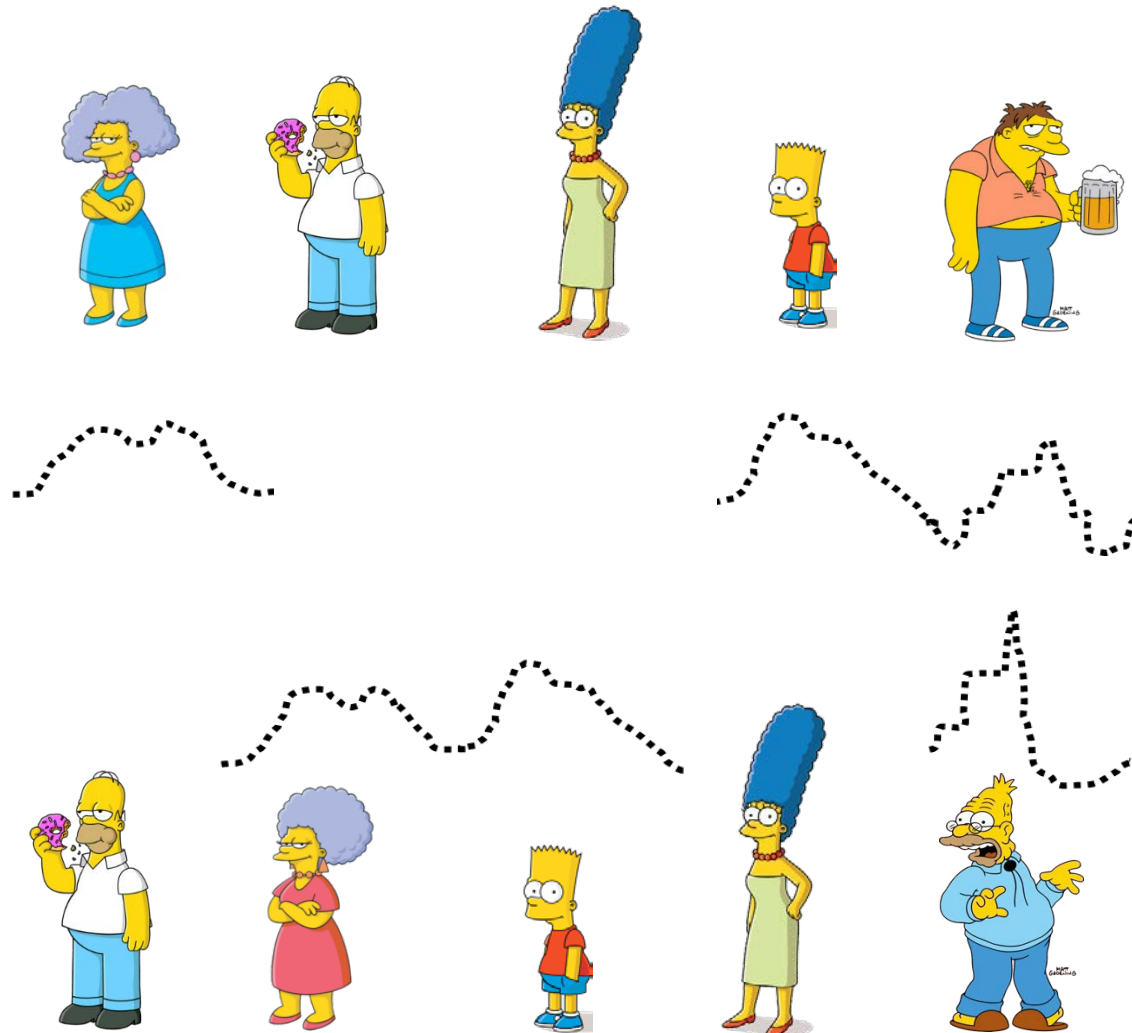


Расписание тренировки (истинная разметка)



Формализация схожести поведения

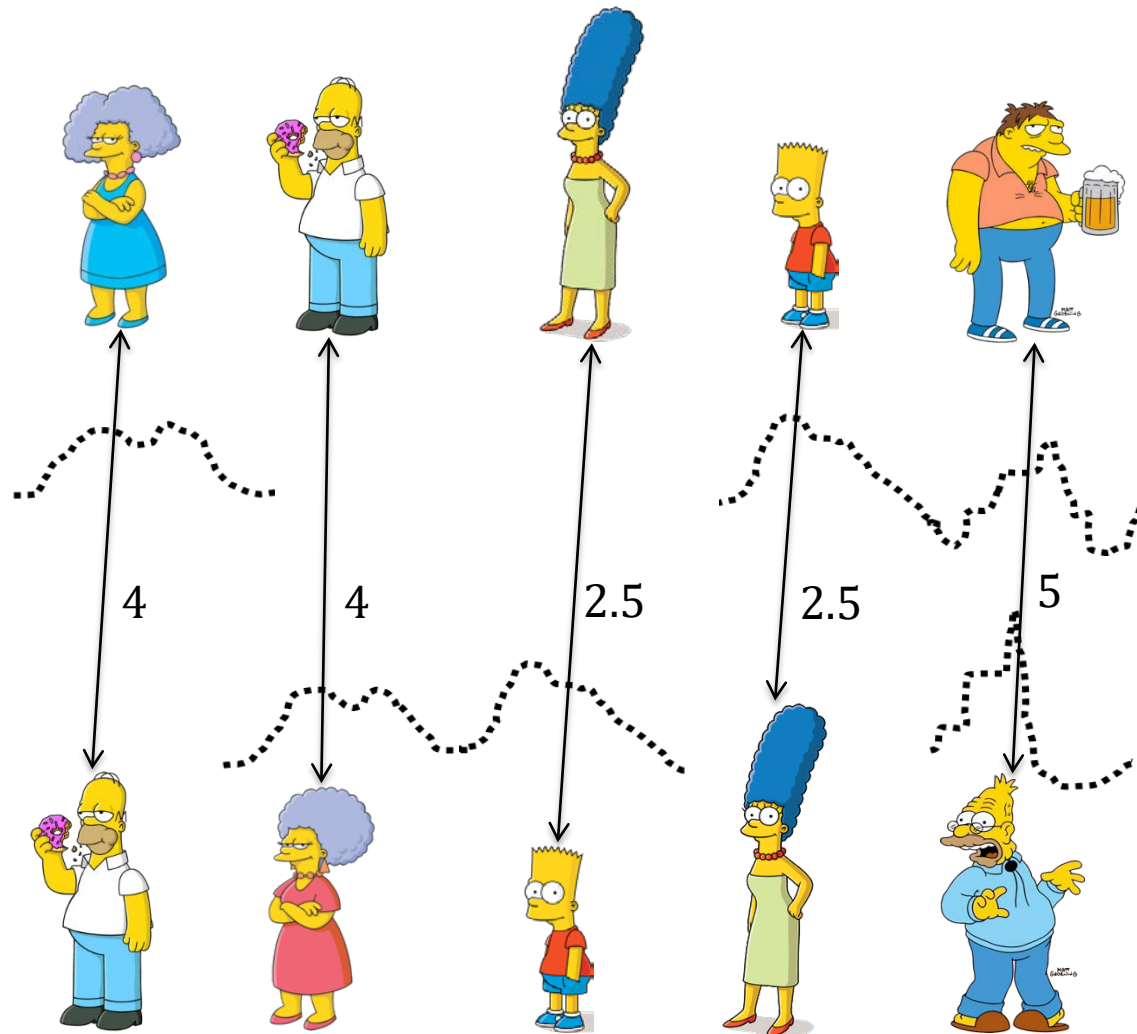
Как измерить схожесть поведения с помощью расстояния?



* Gharghabi S. *et al.* An ultra-fast time series distance measure to allow data mining in more complex real-world deployments. DMKD. 2020. (34). pp. 1104-1135. DOI: [10.1007/s10618-020-00695-8](https://doi.org/10.1007/s10618-020-00695-8)

Формализация схожести поведения

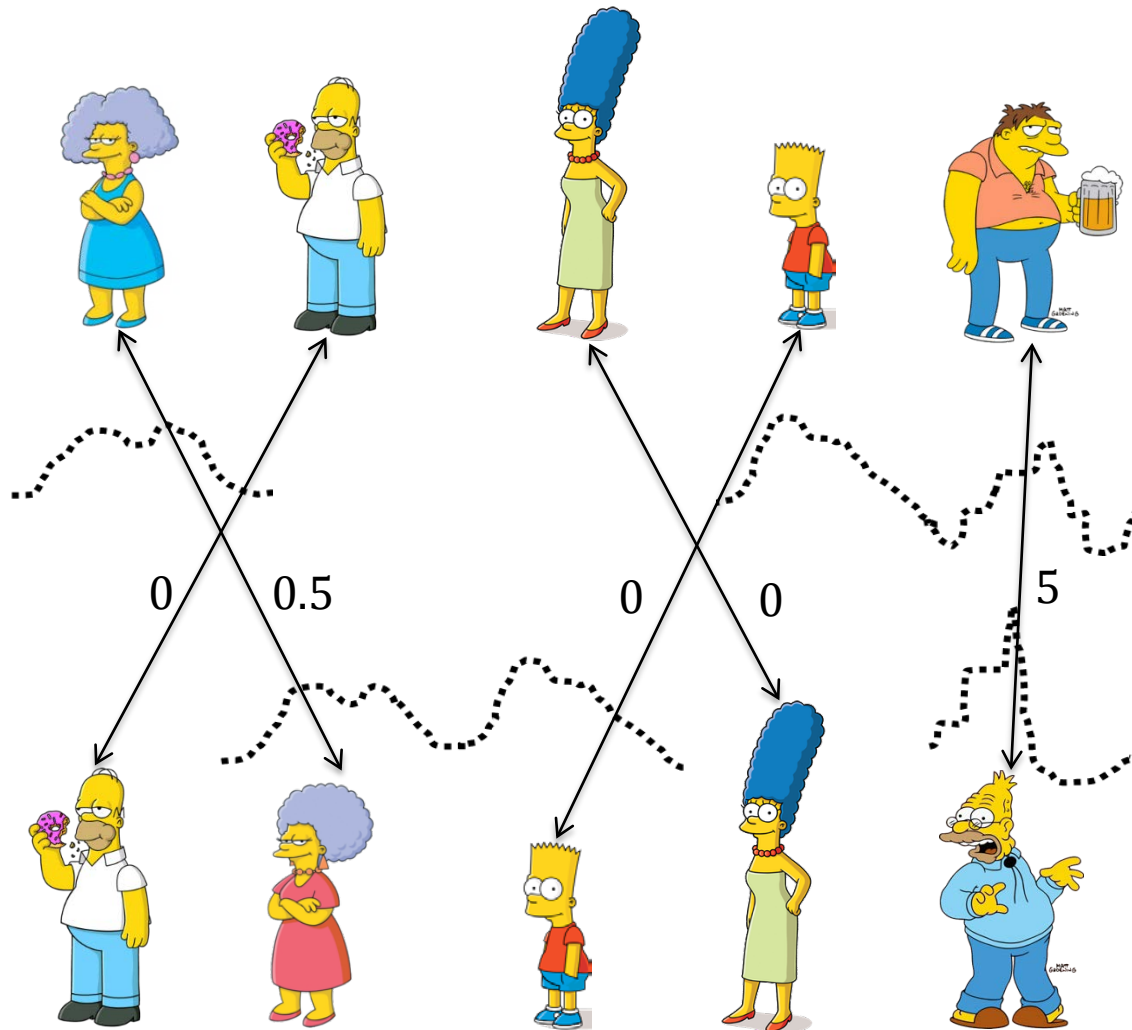
Расстояние Евклида между рядами ≈ 8



* Gharghabi S. *et al.* An ultra-fast time series distance measure to allow data mining in more complex real-world deployments. DMKD. 2020. (34). pp. 1104-1135. DOI: [10.1007/s10618-020-00695-8](https://doi.org/10.1007/s10618-020-00695-8)

Формализация схожести поведения

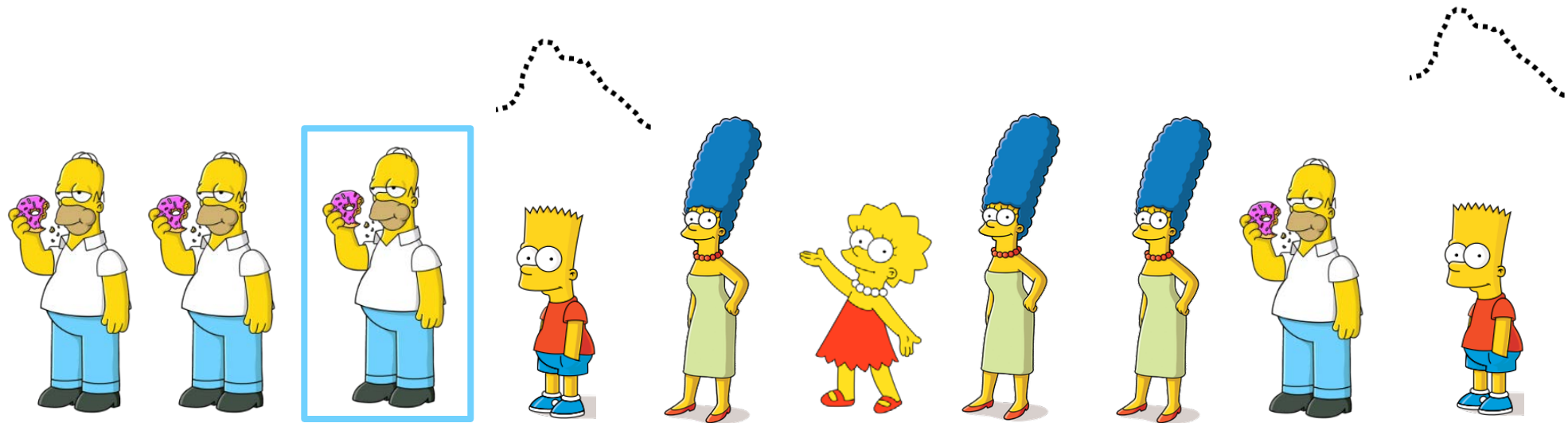
Расстояние MPdist* между рядами ≈ 0



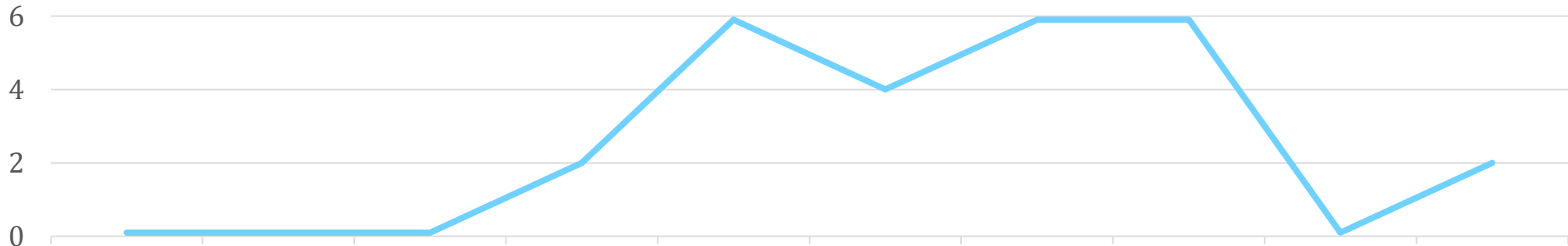
Схожесть рядов по MPdist пропорциональна количеству в них подпоследовательностей, близких по расстоянию Евклида

* Gharghabi S. *et al.* An ultra-fast time series distance measure to allow data mining in more complex real-world deployments. DMKD. 2020. 34. pp. 1104-1135. DOI: [10.1007/s10618-020-00695-8](https://doi.org/10.1007/s10618-020-00695-8)

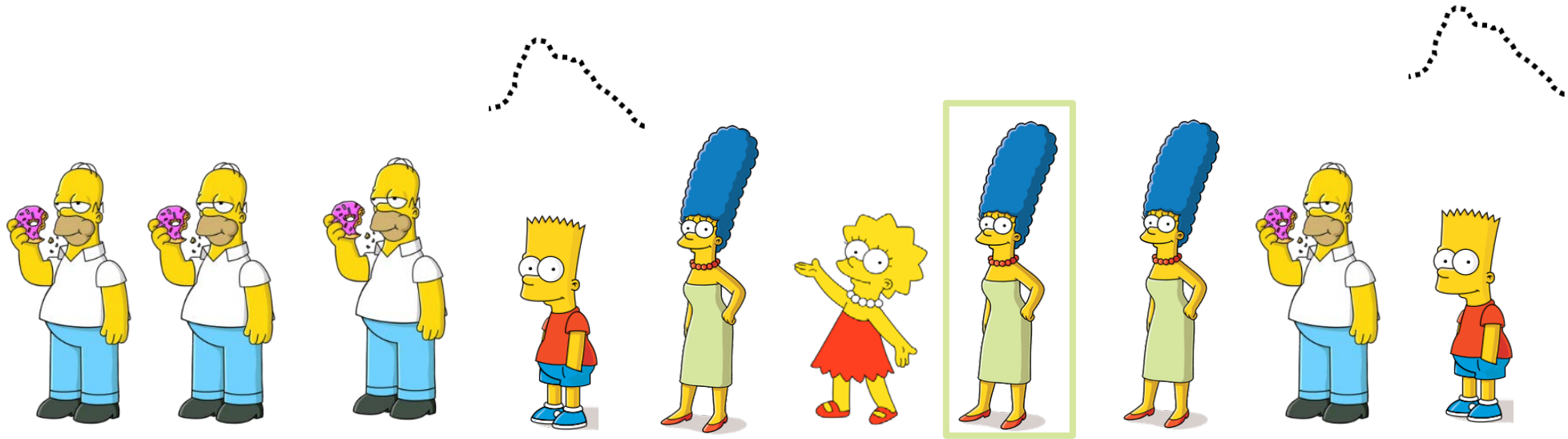
Формализация поиска поведенческих шаблонов



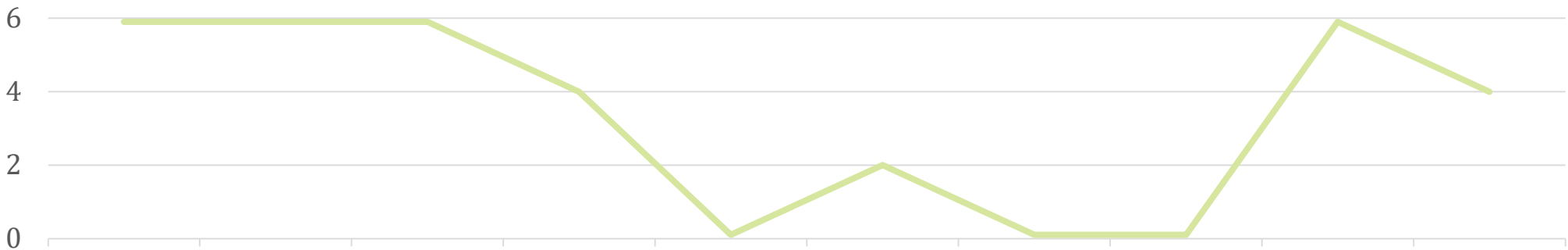
Расстояние MPdist до ближайшего соседа



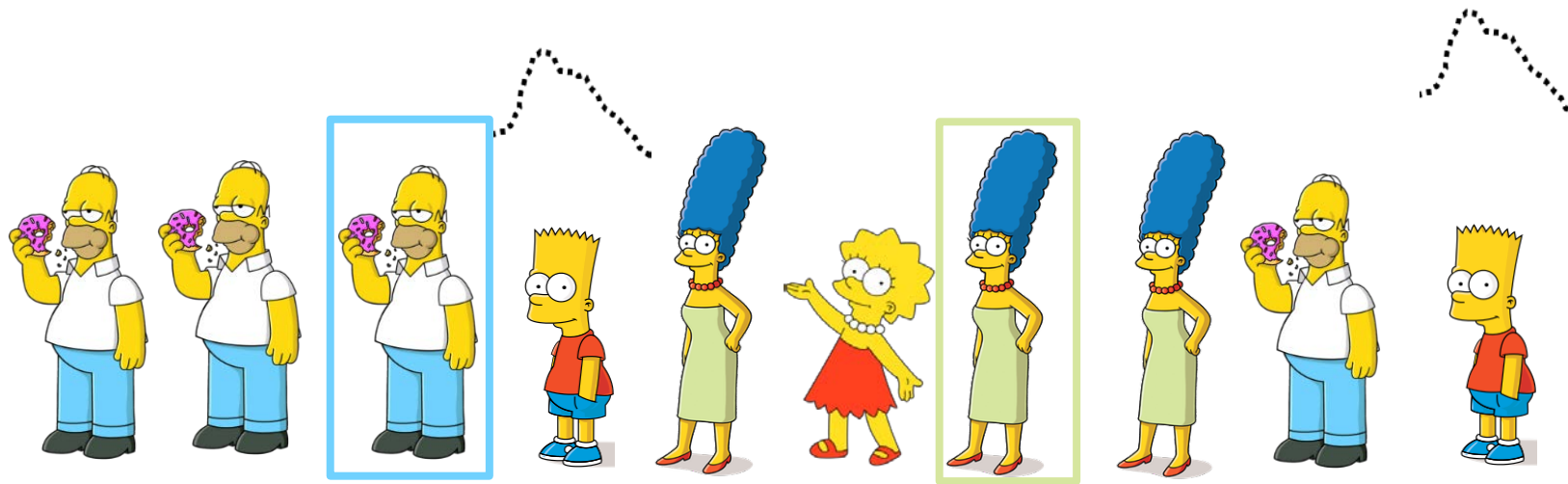
Формализация поиска поведенческих шаблонов



Расстояние MPdist до ближайшего соседа

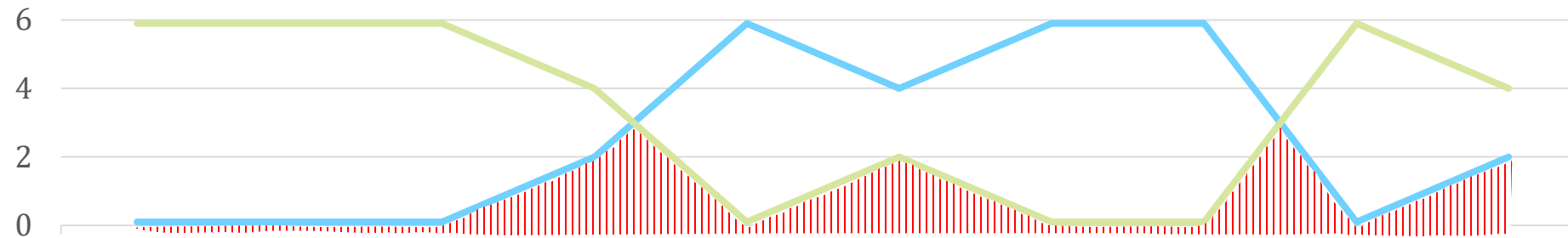


Формализация поиска поведенческих шаблонов



Шаблоны соответствуют набору подпоследовательностей, для которого площадь под кривой расстояний MPdist до ближайшего соседа минимальна

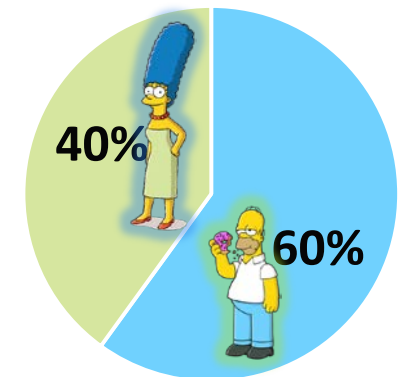
Расстояние MPdist до ближайшего соседа



Разметка ряда на основе поведенческих шаблонов

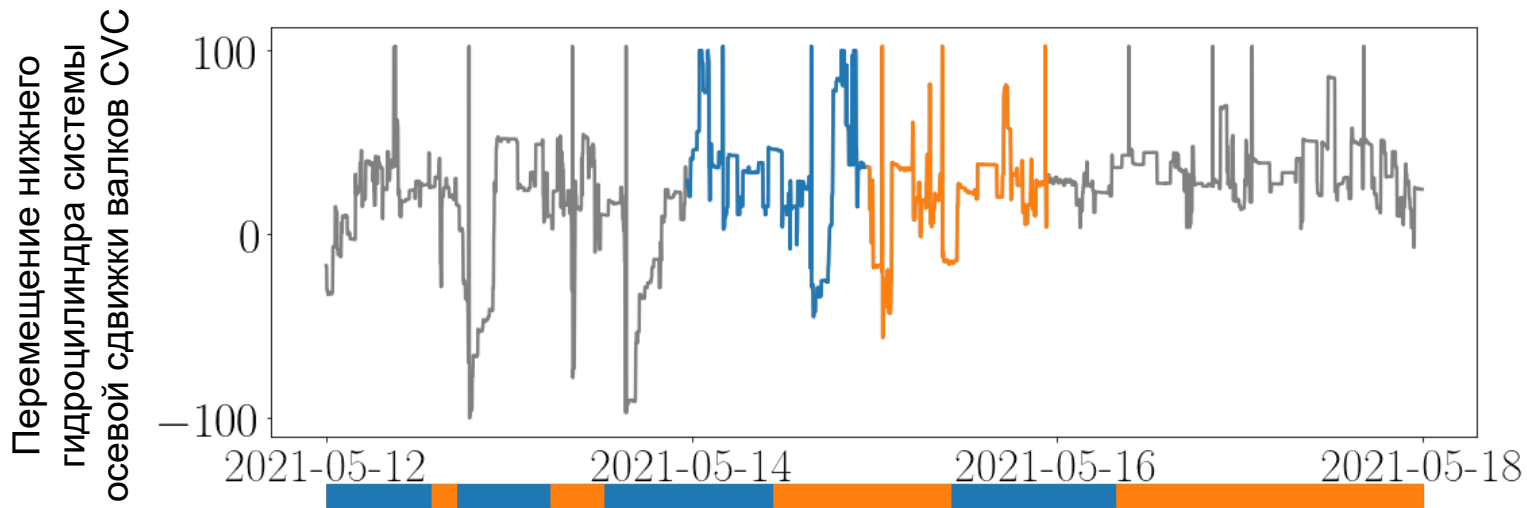


Распределение активностей на основе шаблонов

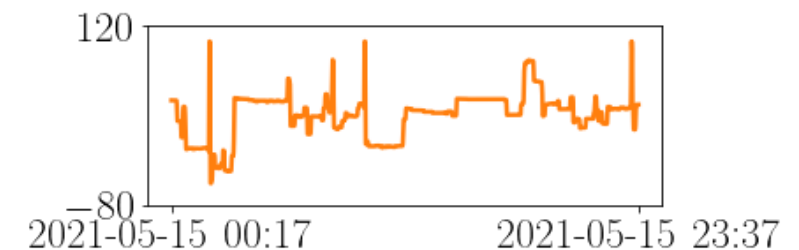
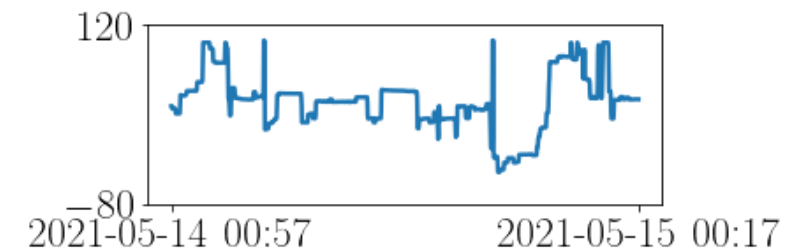
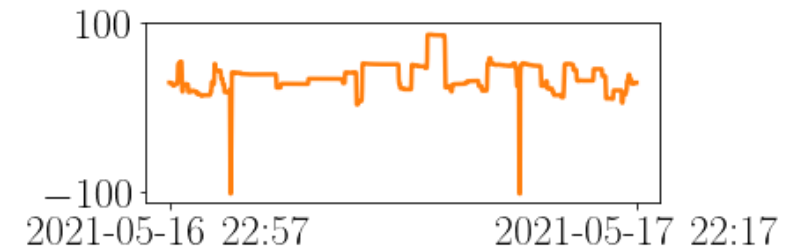
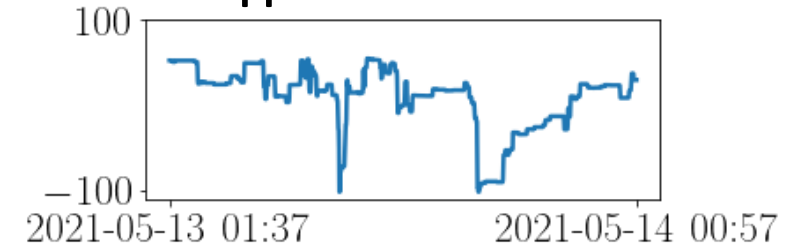


Режимы работы узлов прокатного стана

Разметка с помощью параллельного алгоритма*



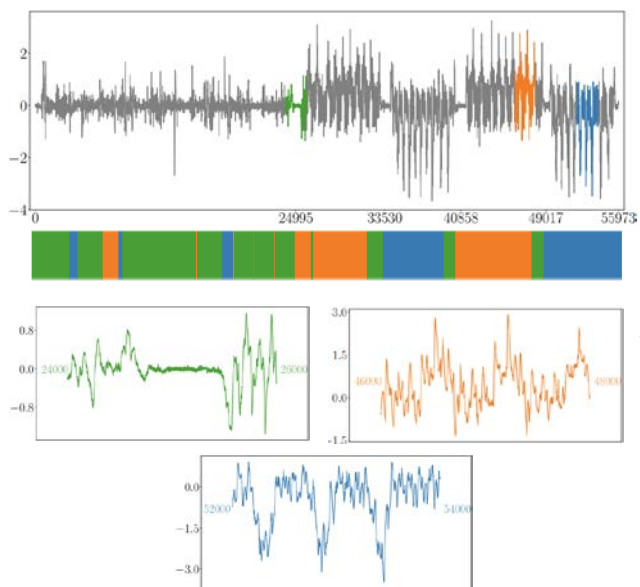
Найденные шаблоны



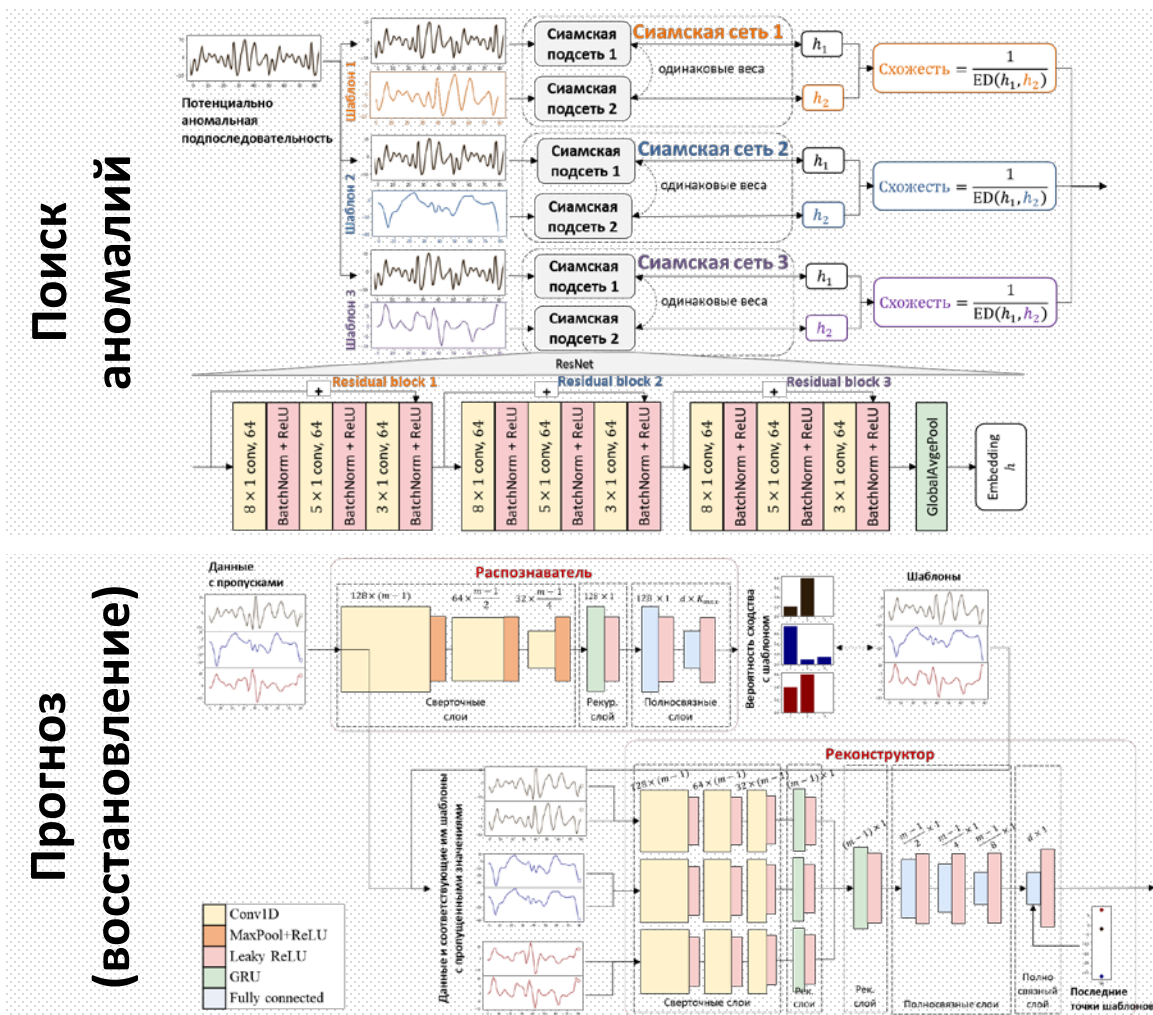
* Zymbler M., Goglachev A. Fast summarization of long time series with graphics processor. Mathematics. 2022. 10(10). Article 1781. DOI: [10.3390/math10101781](https://doi.org/10.3390/math10101781)

Онлайн-анализ временных рядов на основе шаблонов

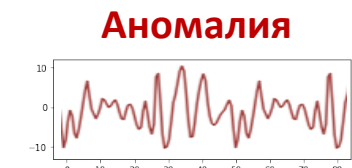
Разметка фрагмента ряда на основе шаблонов



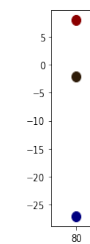
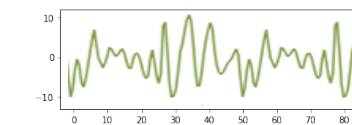
Нейросетевая модель решения задачи анализа ряда



Анализ ряда в режиме онлайн



или
Норма

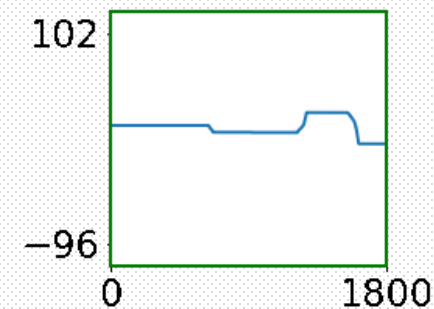
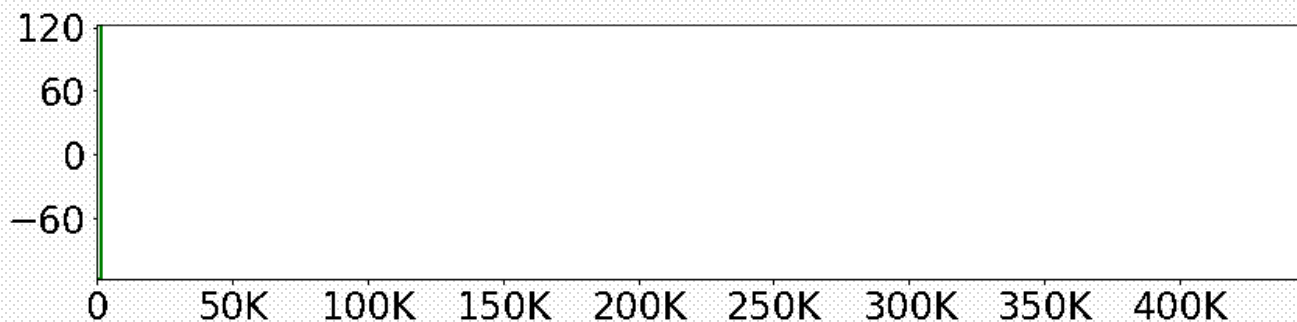


Прогнозные
(восстановленные)
значения

Онлайн-анализ состояния узлов прокатного стана

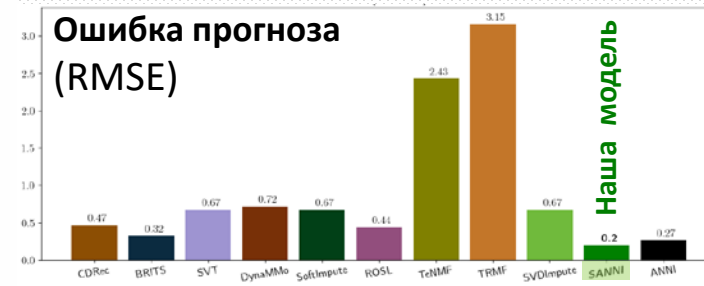
Обнаружение аномалий

Перемещение
нижнего
гидроцилиндра
системы осевой
сдвигки валков



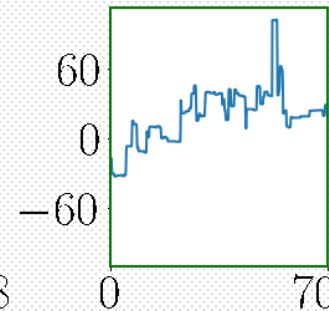
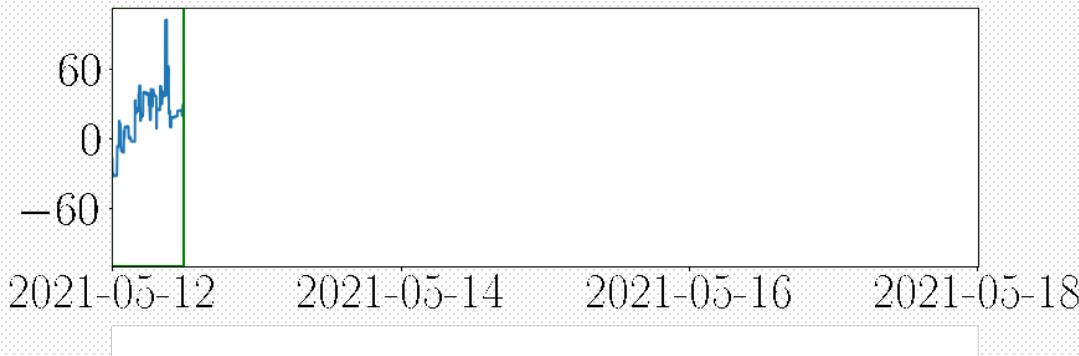
Прогноз (восстановление)

Фактическое
изгибающие
усилие
прокатки

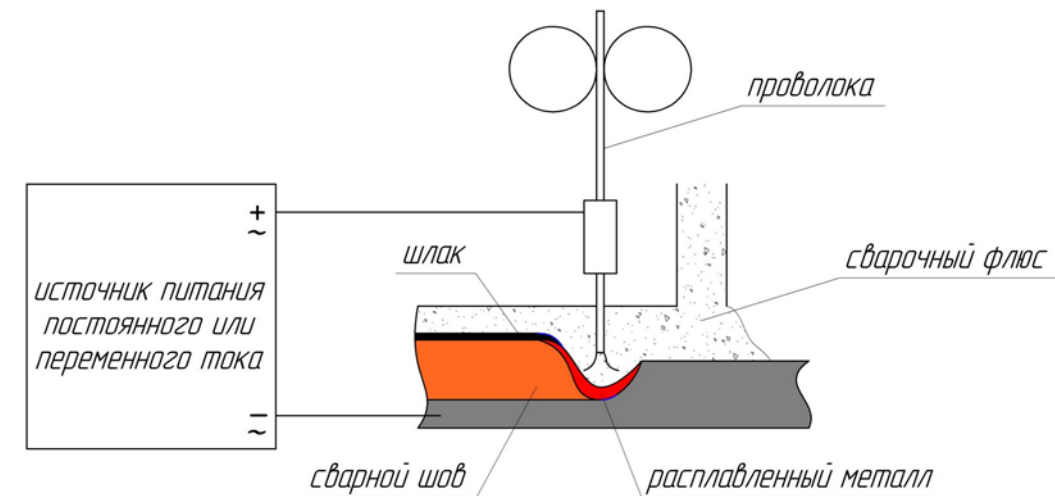
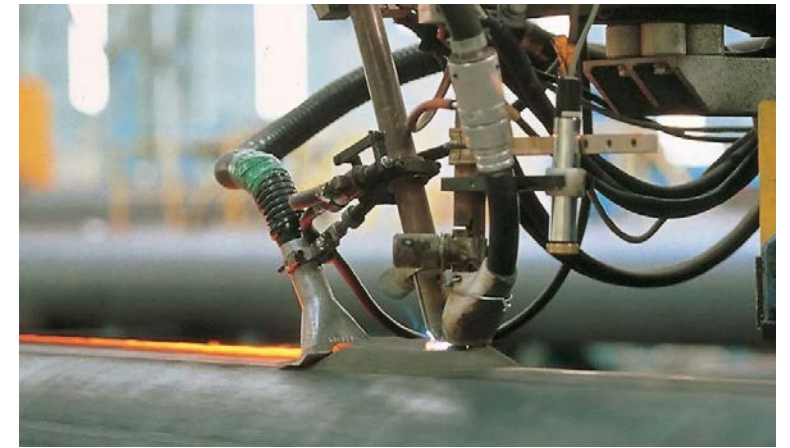
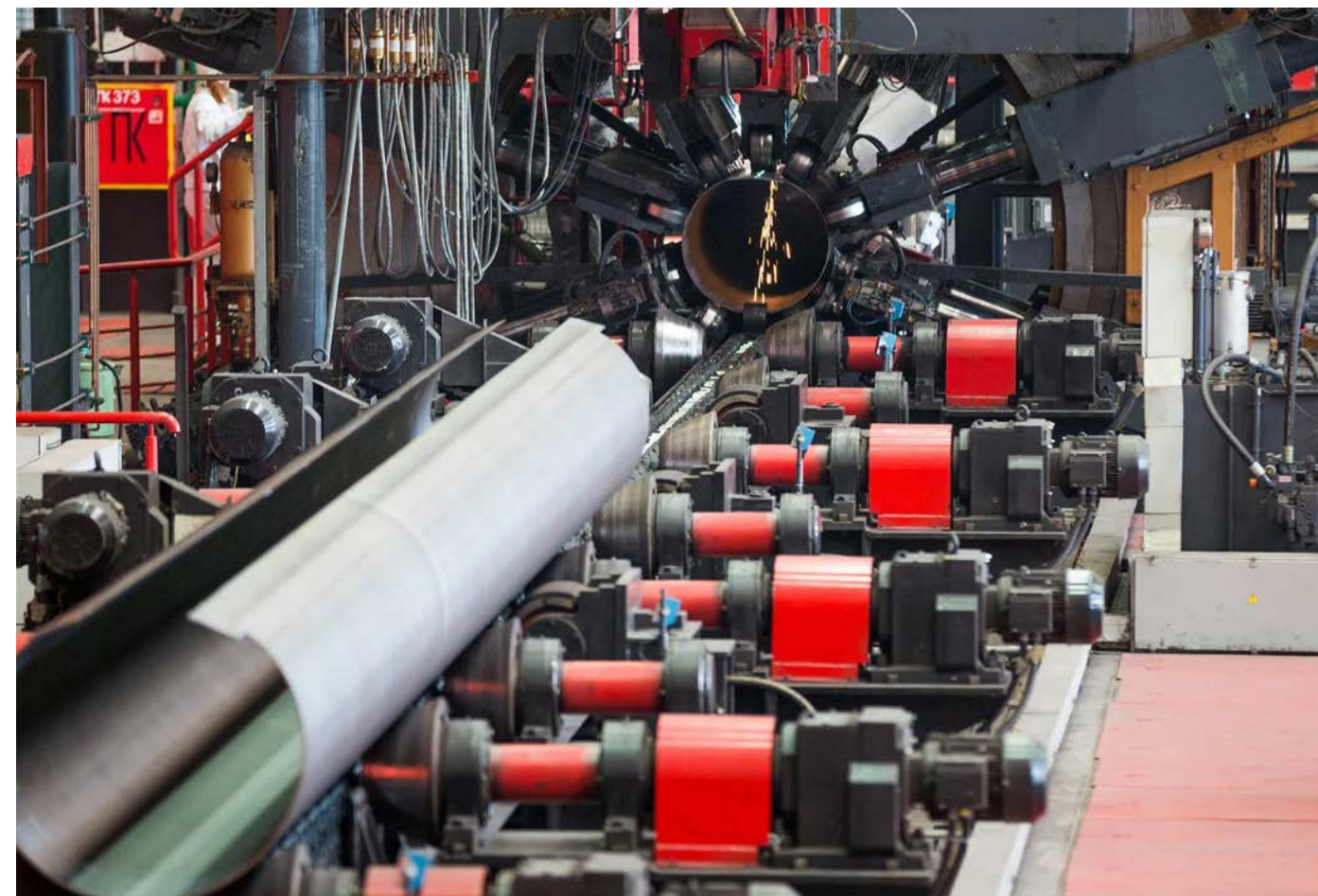


Определение режимов работы

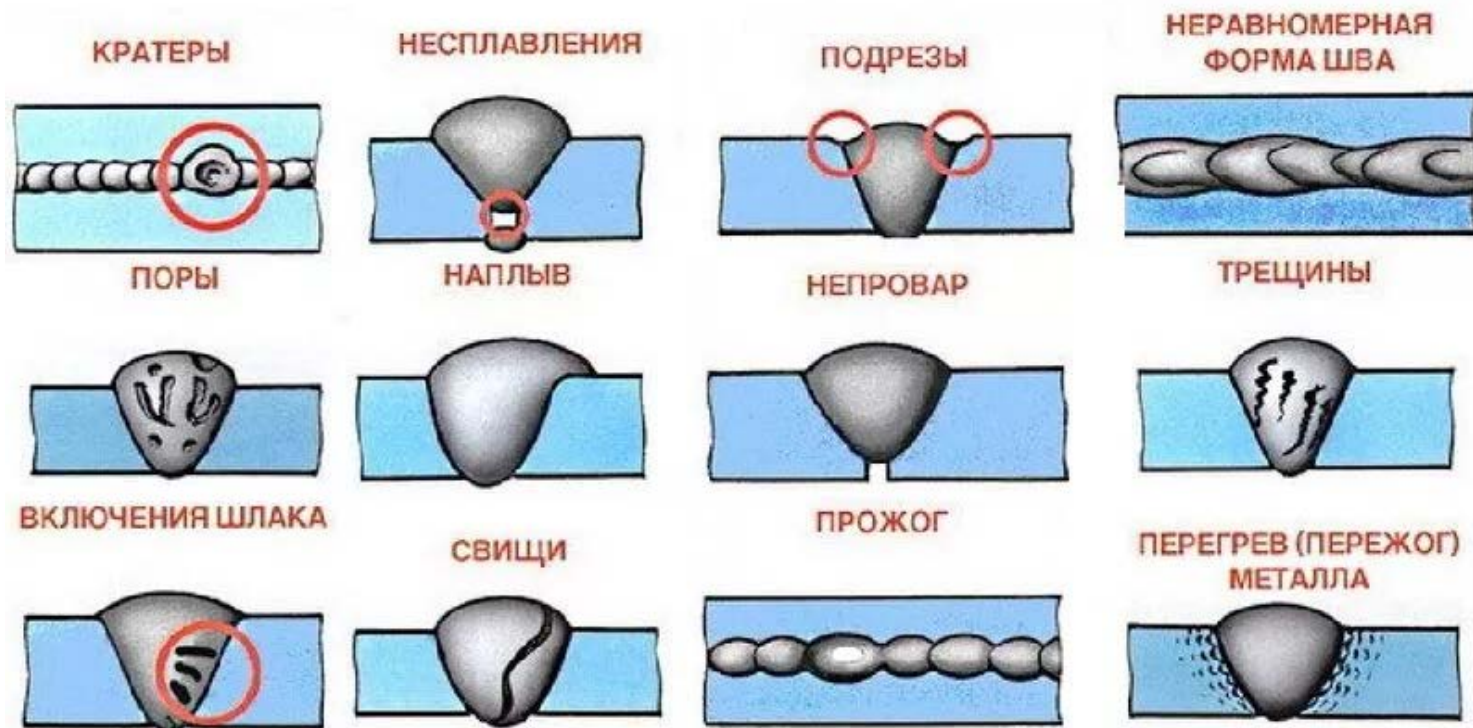
Перемещение
верхнего
гидроцилиндра
системы осевой
сдвигки валков



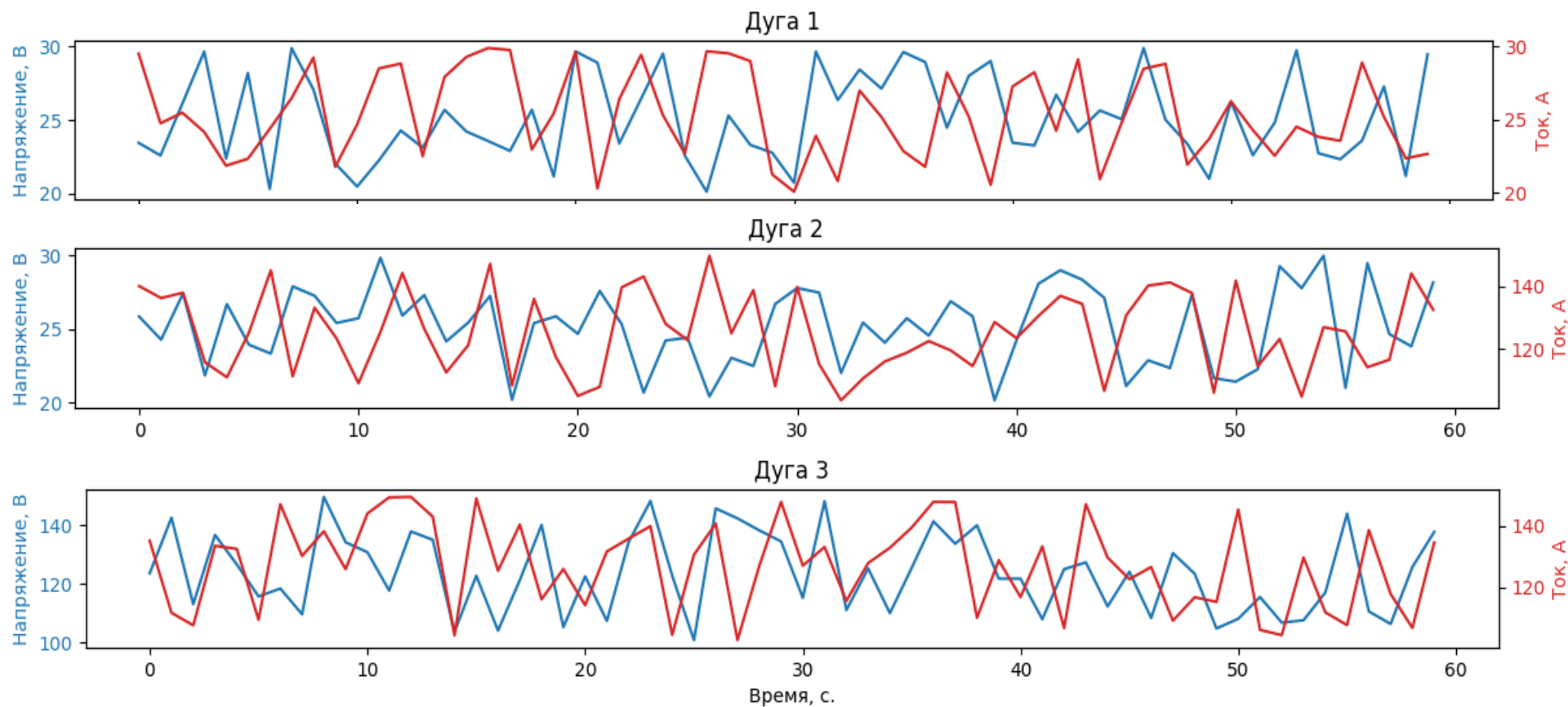
Процесс электродуговой сварки труб



Неинвазивная дефектоскопия труб



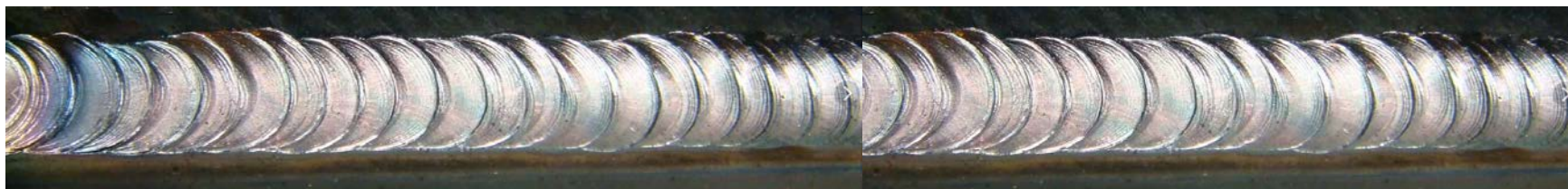
Данные временных рядов процесса сварки



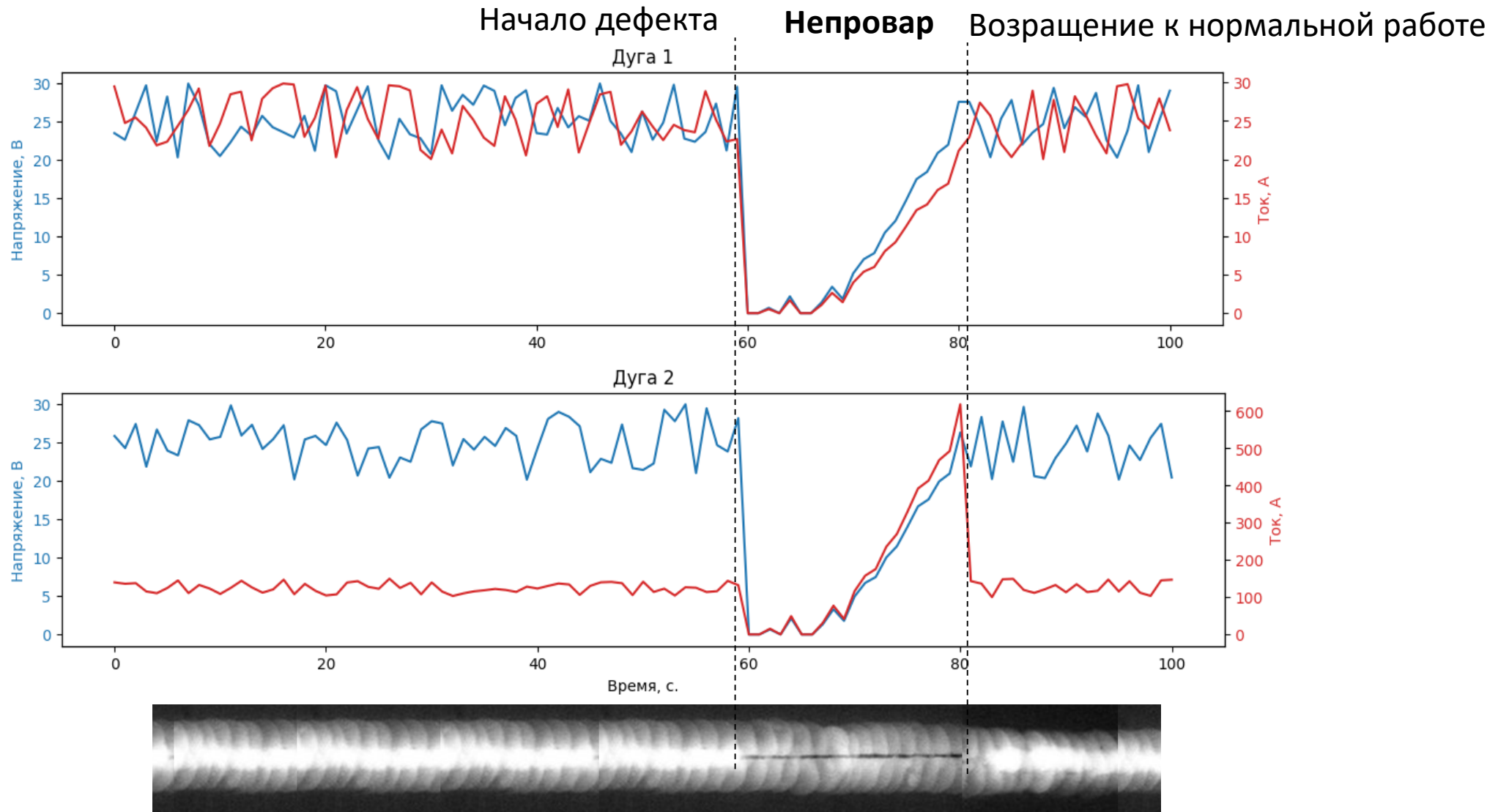
**Более 80
показателей**
(временных рядов)

**Наиболее важные
показатели сварки**
(для каждой дуги)

1. Ток
2. Напряжение
3. Сопротивление
4. Скорость подачи материала



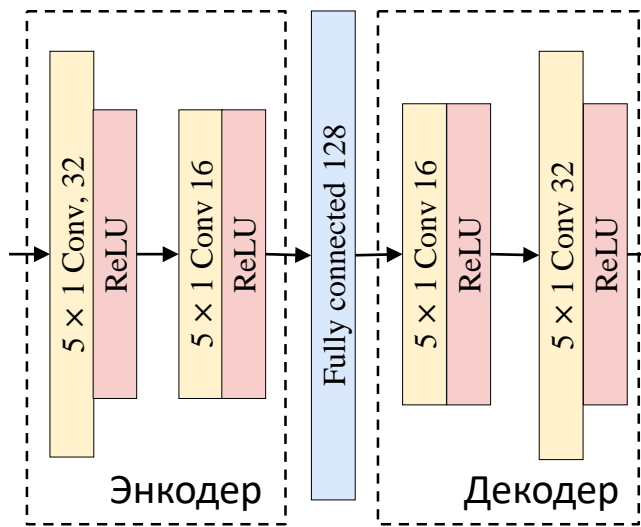
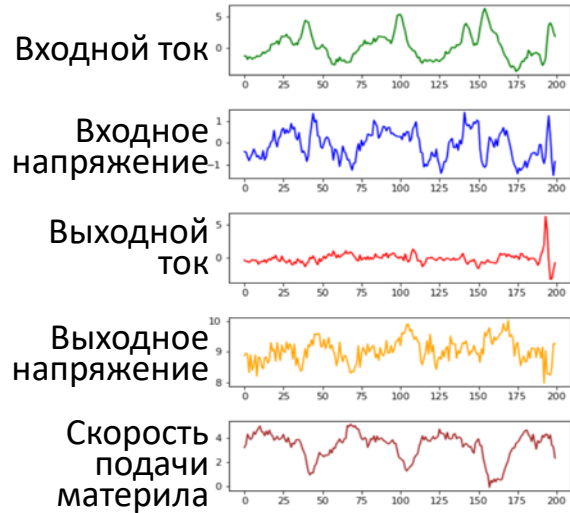
Паттерн дефекта сварного шва



Нейросетевая модель прогноза дефектов сварного шва

Данные датчиков

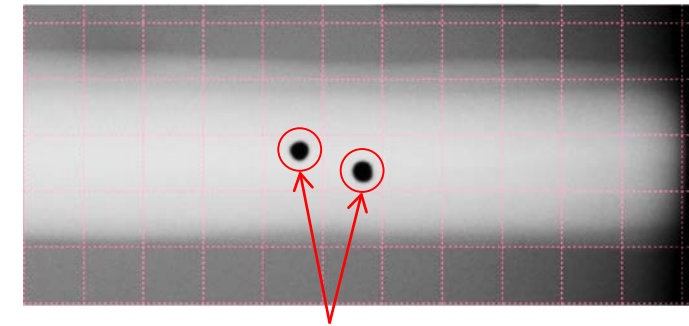
сварочной установки за 25 с



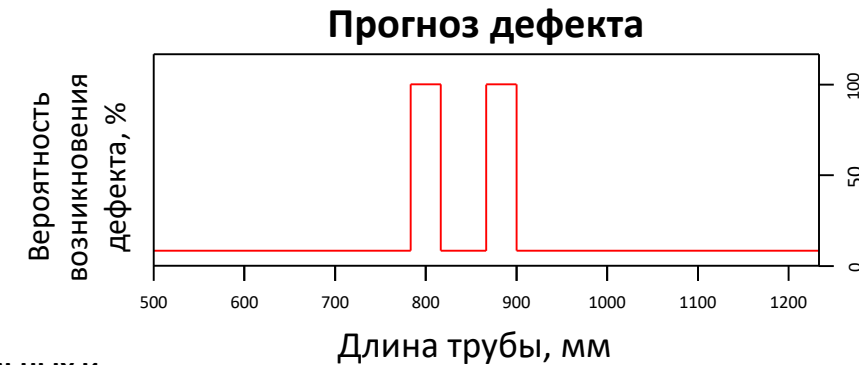
Прогноз модели



Рентгеновский снимок сварного шва



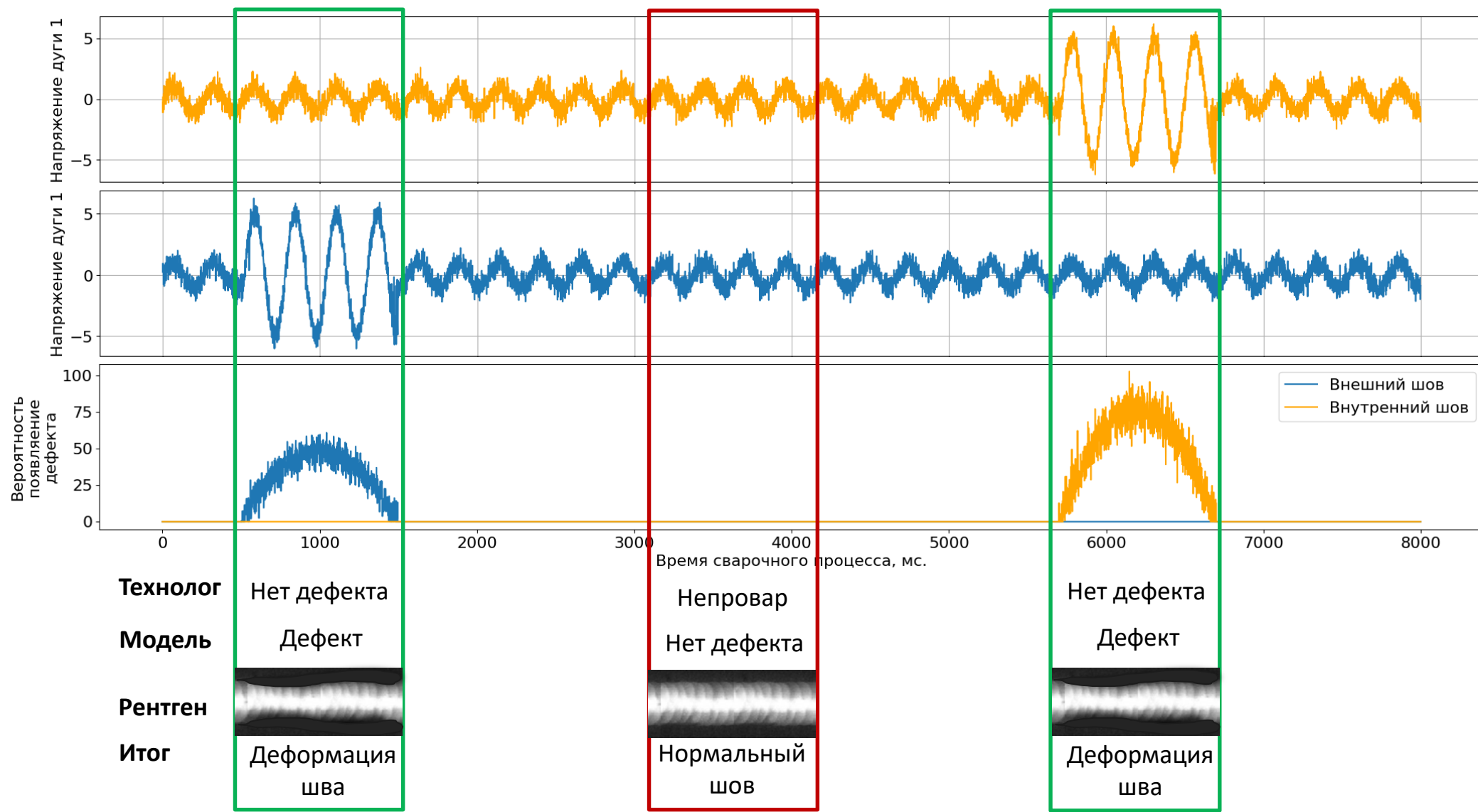
Шлаковые включения



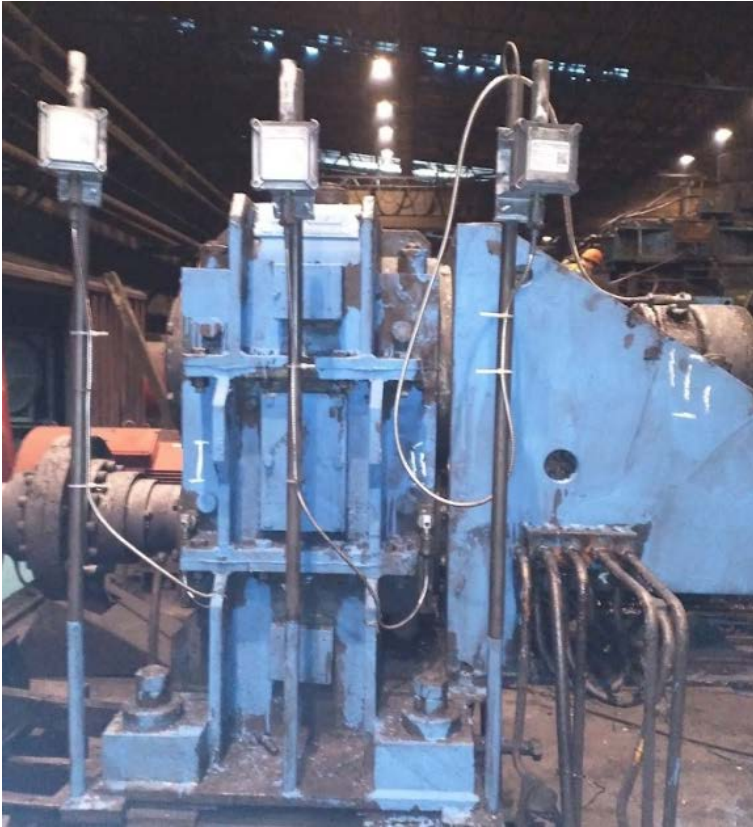
Сравнение реальных и прогнозных данных

MAE

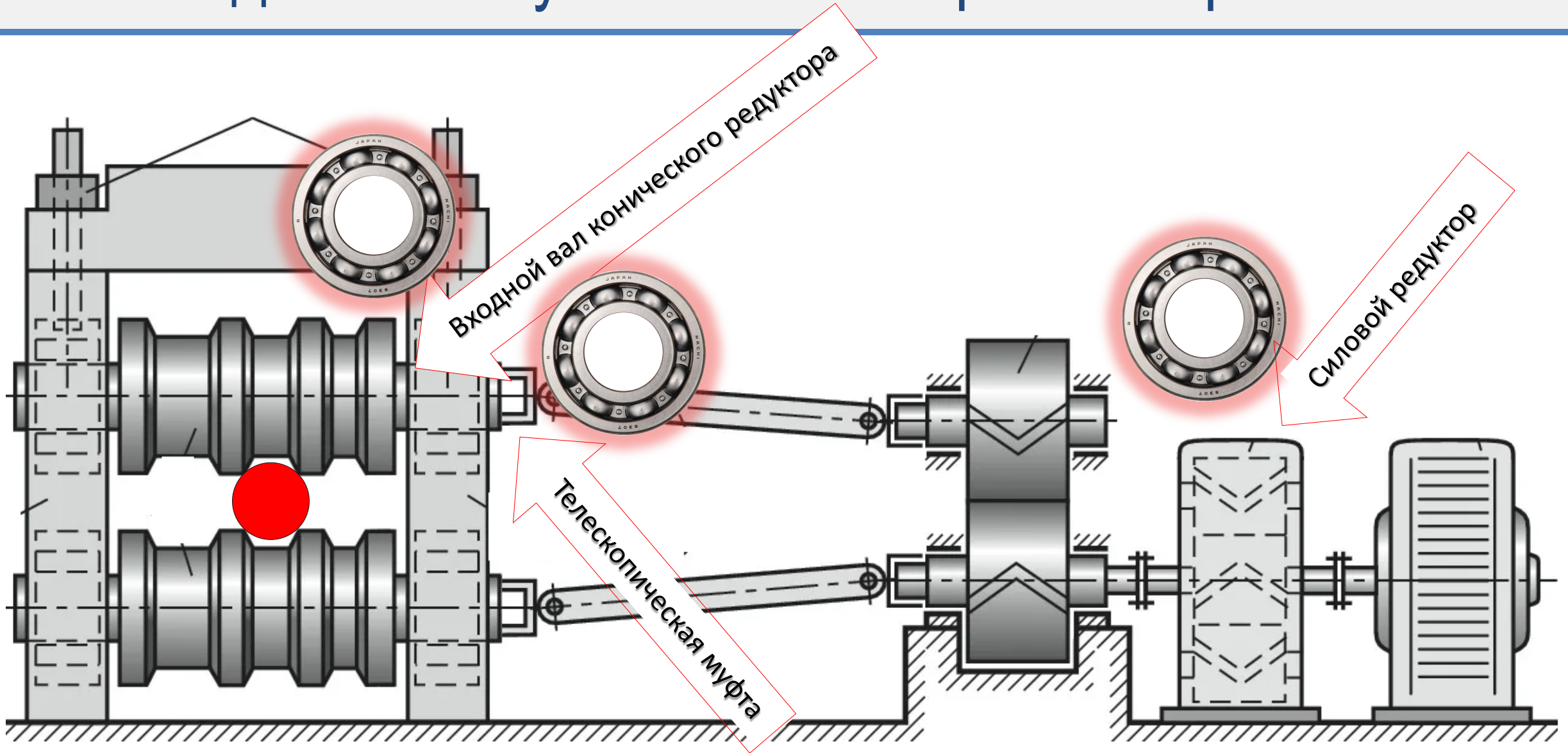
Точность модели прогноза дефектов сварного шва



Стан горячего сортового проката

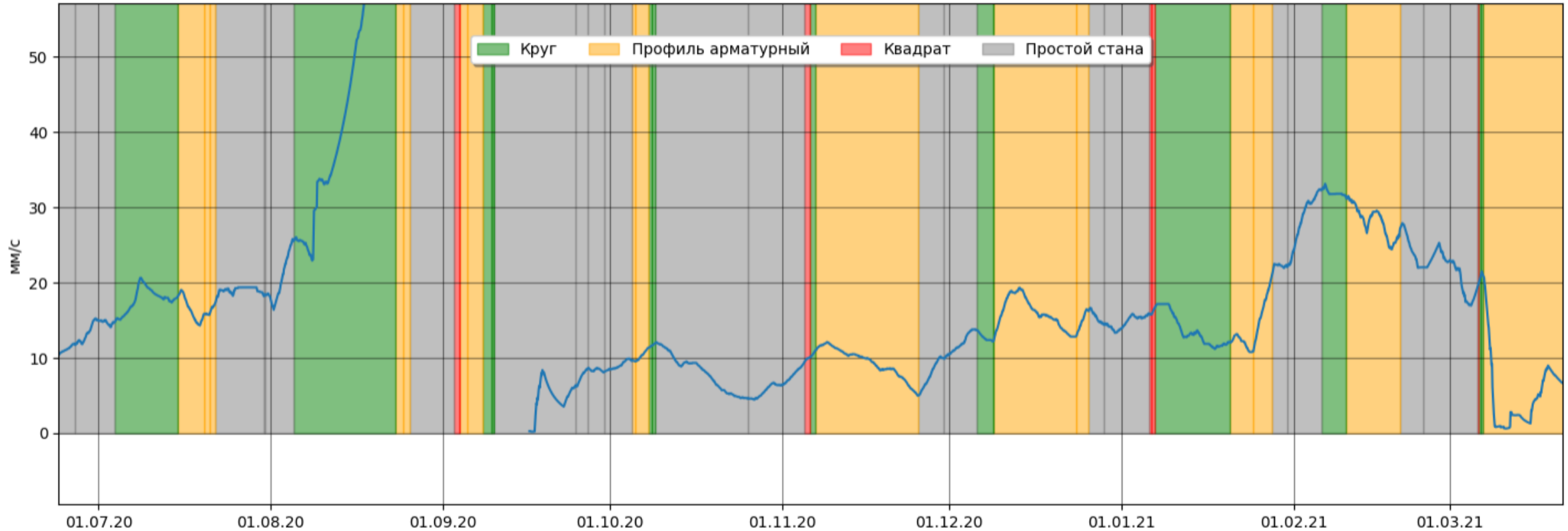


Подшипники узлов стана сортовой прокатки

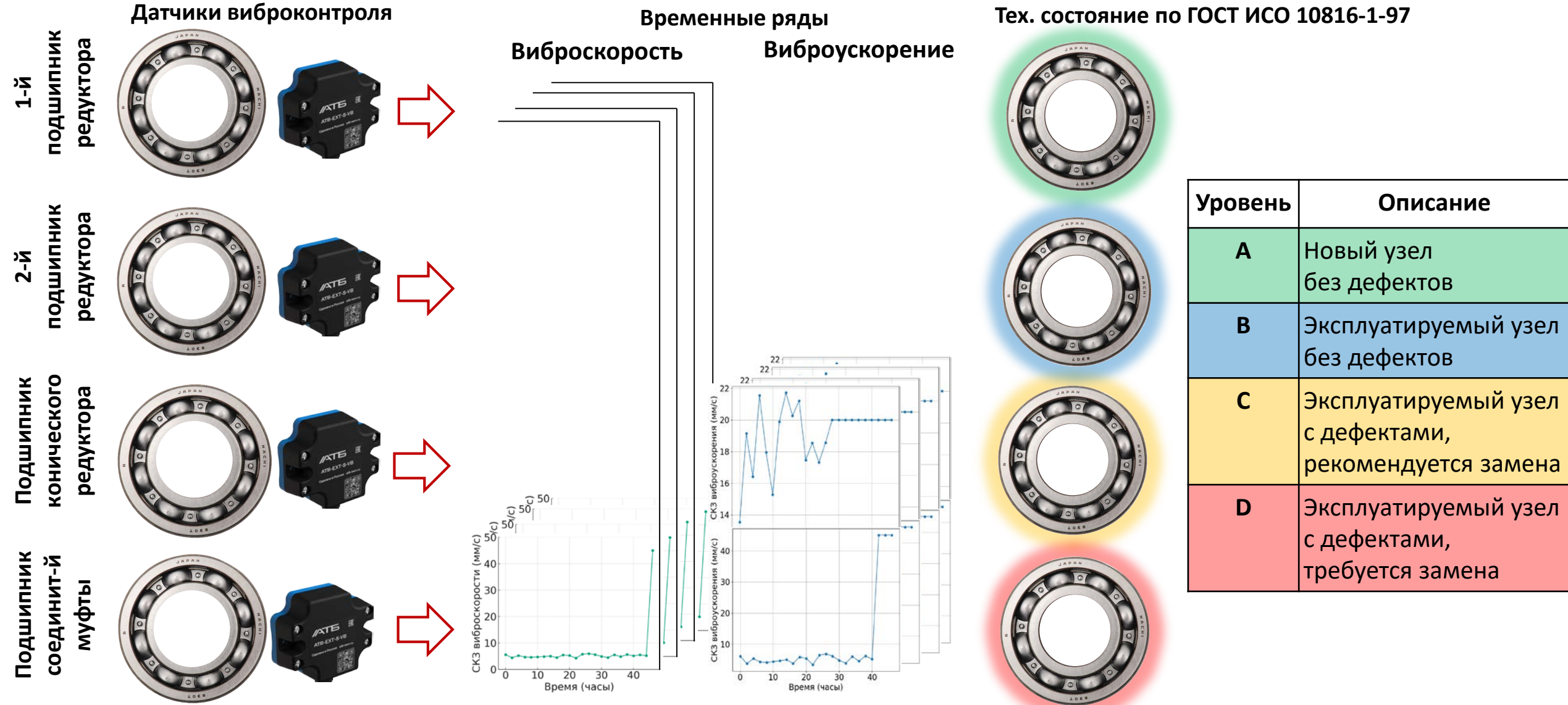


Режимы работы стана сортовой прокатки

14580, Подшипник соединительной муфты Прямой спектр виброскорости, СКЗ

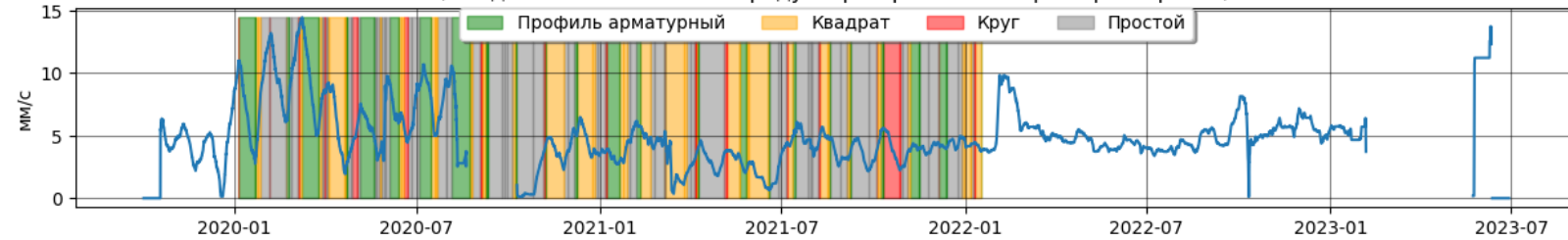


Оценка технического состояния узлов стана

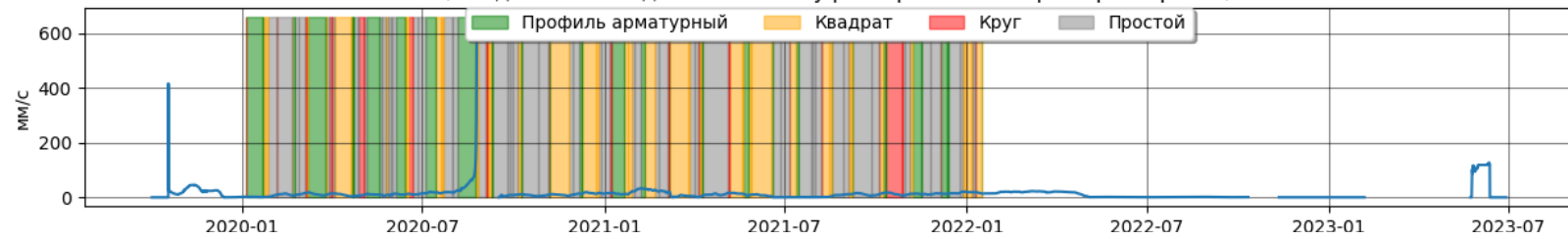


Оценка технического состояния подшипников

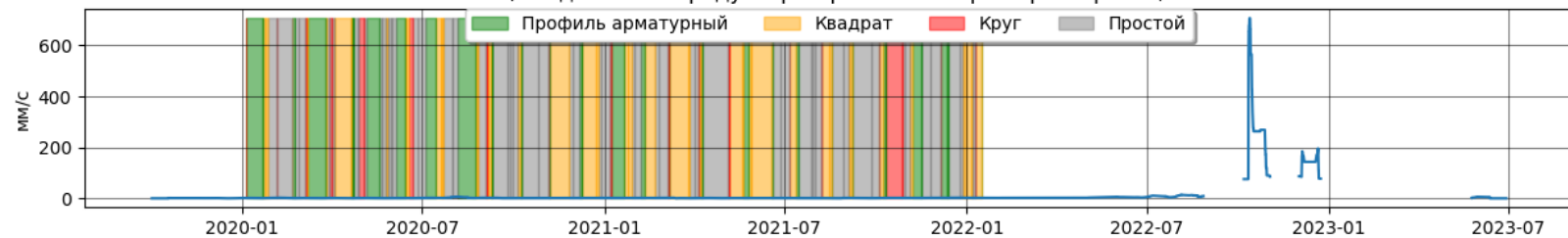
14560, Подшипник конического редуктора Прямой спектр виброскорости, СКЗ



14580, Подшипник соединительной муфты Прямой спектр виброскорости, СКЗ



14600, Подшипник 1 редуктора Прямой спектр виброскорости, СКЗ



14620, Подшипник 2 редуктора Прямой спектр виброскорости, СКЗ



Скаляры технического состояния

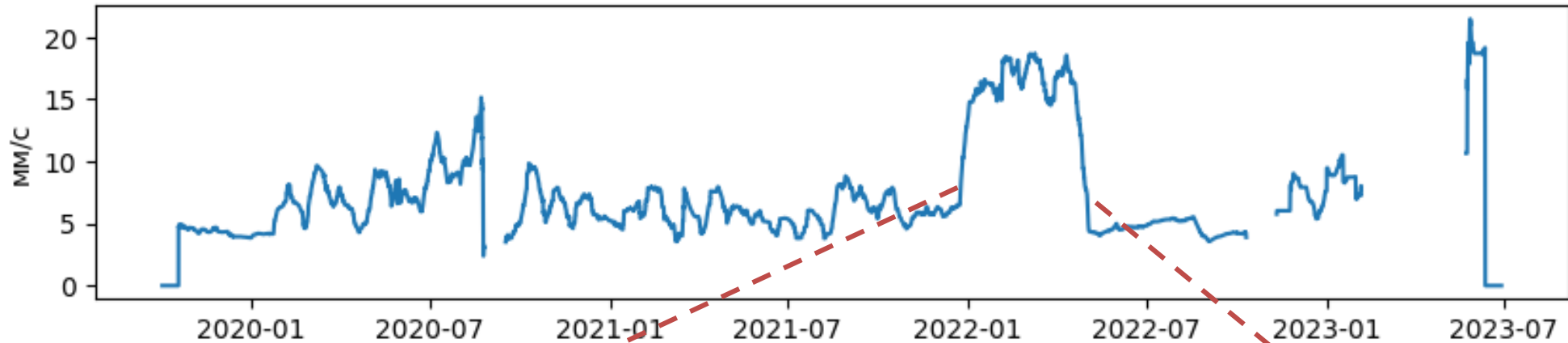
- **СКЗ:** среднеквадратичное значение
- **Пик:** макс значение
- **Размах:** разность между макс и мин значениями
- **Пик-фактор:** отношение макс значения к СКЗ

Особенности данных

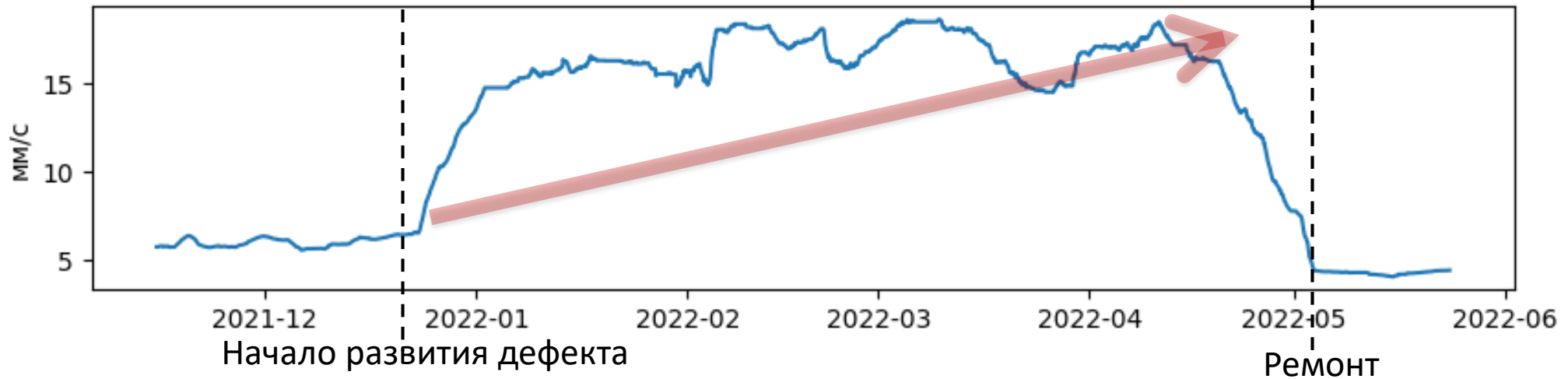
- **Пропуски:** более 35%
- **Слабая корреляция признаков:** 0.35 в среднем (по Пирсону)
- **Отсутствие экспертной разметки:** нет данных о ремонте

Паттерн выхода подшипника из строя

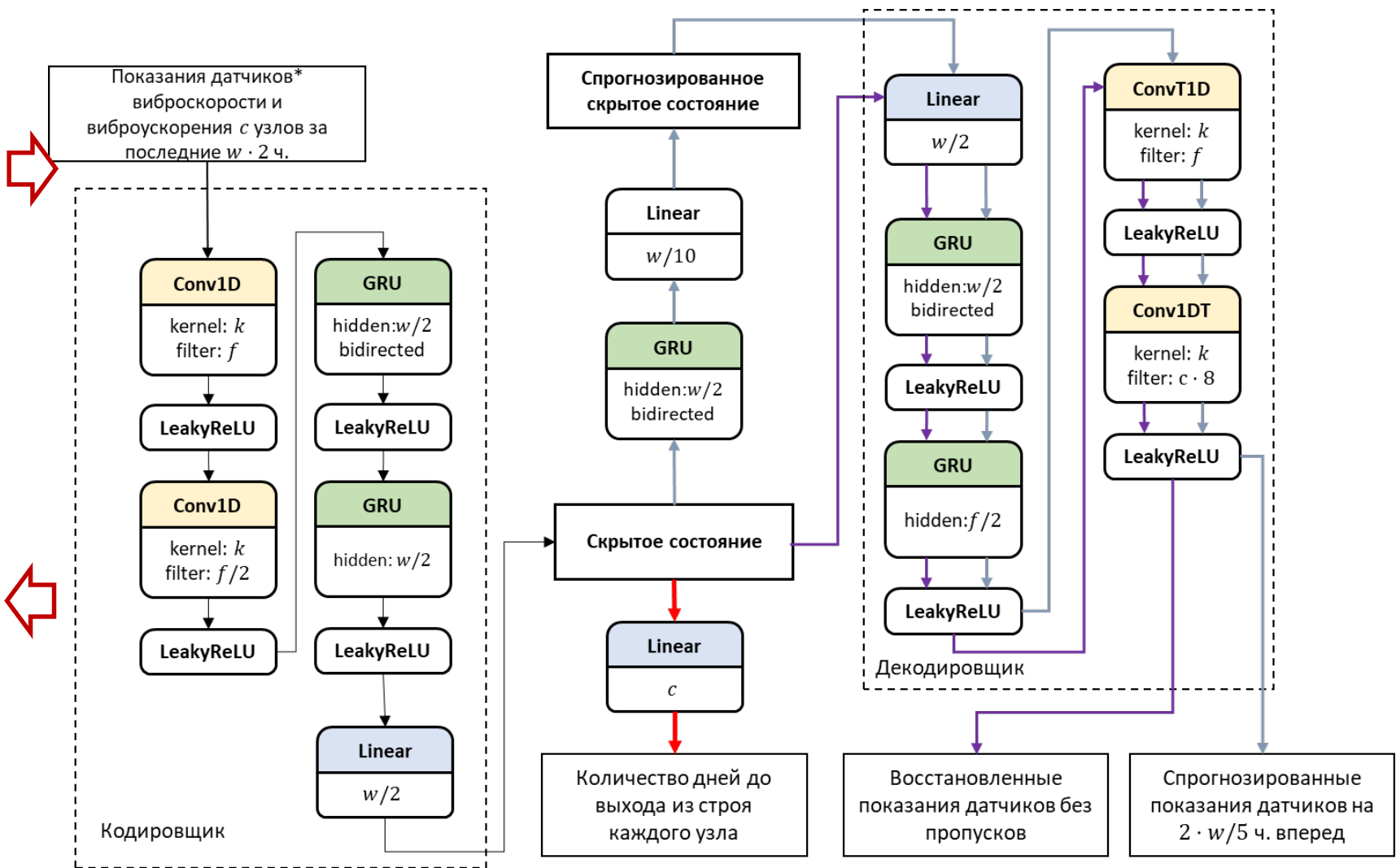
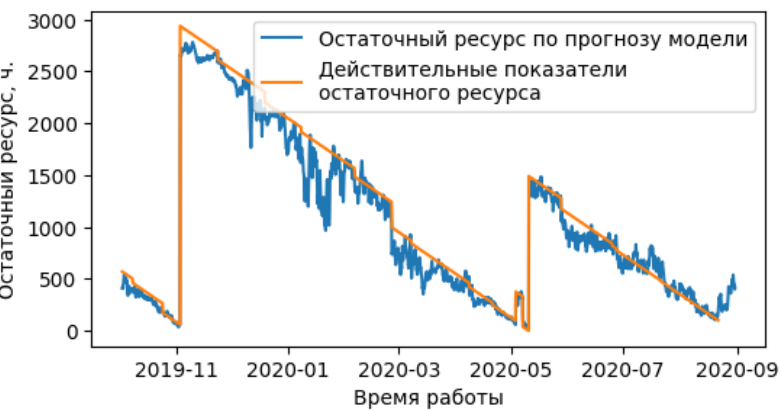
14582, Подшипник соединительной муфты Прямой спектр виброускорения, Пик-фактор



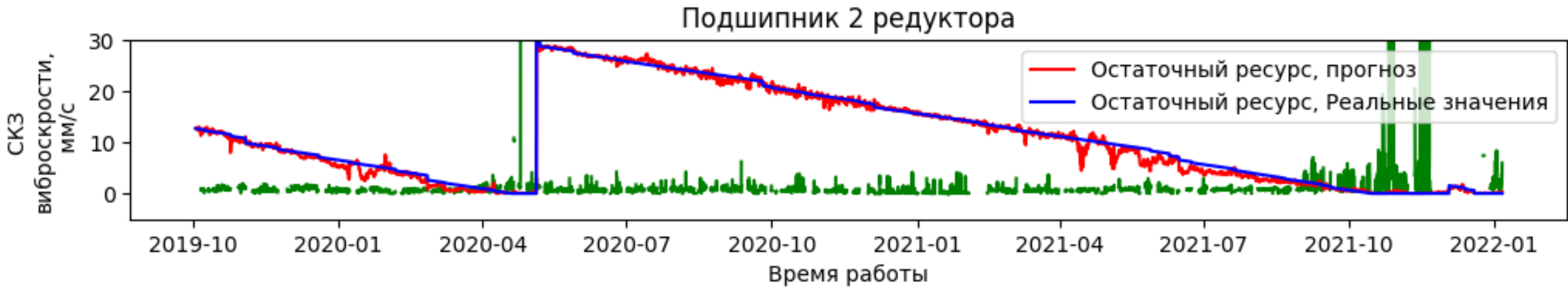
14582, Подшипник соединительной муфты Прямой спектр виброускорения, Пик-фактор



Модель прогноза остаточного ресурса подшипника



Точность модели прогноза остаточного ресурса подшипника



Точность прогноза: **81.6%**

$$\text{Точность} = 100\% - MAPE = \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right| \right) \times 100\%$$

y – факт
 \hat{y} – прогноз



Мы готовы к сотрудничеству!

- У нас есть параллельные алгоритмы и нейросетевые модели интеллектуального анализа временных рядов
 - поиск аномалий и шаблонов
 - восстановление и прогноз
 - ...
- У Вас есть задачи цифровой индустрии? Тогда мы готовы идти к Вам!
- Контакты:
Михаил Леонидович Цымблер, mzym@susu.ru



Лаборатория больших данных и машинного обучения (ЛБДМО)



М.Л. Цымблер
д.ф.-м.н.,
зам. зав. ЛБДМО



Я.А. Краева
программист, аспирант
обладатель стипендий
Президента РФ,
Заксобрания Чел. обл.



А.И. Гоглачев
программист, аспирант
лауреат конкурса
«Молодая наука
ЮУрГУ»



А.А. Юртин
программист, аспирант
победитель конкурса
«УМНИК»