

Разработка программного комплекса для отладки и калибровки детектирующей системы экспериментального стенда профилемера горячего проката

Калашников Даниил Евгеньевич,
студент группы М24-112

Хромов Александр Владимирович, научный руководитель
к.ф.-м.н., доцент кафедры №7 ИЯФиТ НИЯУ МИФИ

26.06.2026

Цели и задачи работы

Цель работы

– разработка программного комплекса для отладки и калибровки детектирующей системы, а также применение этого комплекса для анализа экспериментальных данных калибровки и предварительной верификации результатов измерений

Задачи

- проанализировать конструкцию экспериментального стенда
- протестировать корректность работы линейки детекторов
- исследовать работу рентгеновских источников
- исследовать процессы внешней и внутренней калибровки
- разработать архитектуру программного комплекса
- проверить применимость разработанных алгоритмов
- определить перспективы дальнейшей доработки комплекса

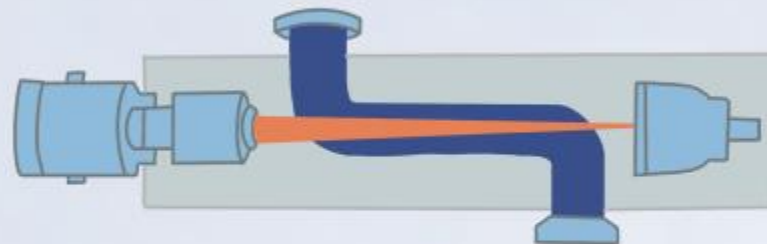
Обзор технологических процессов в металлургии

Традиционным методом неразрушающего контроля в промышленности является **радиометрический метод**. Принцип работы основывается на регистрации степени поглощения излучения с помощью детектора.

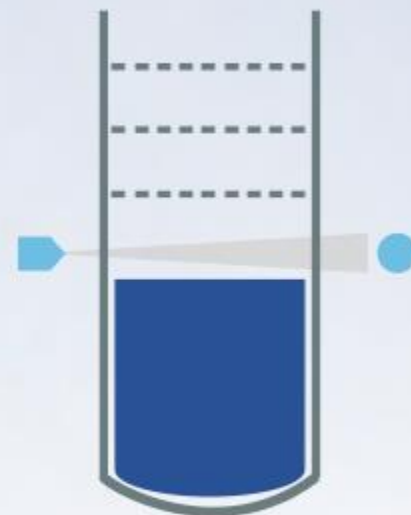
По разному отклику детекторов с помощью алгоритма обработки можно определить различные целевые параметры: уровень, плотность, расход массы и пр.



Уровнемер



Плотномер



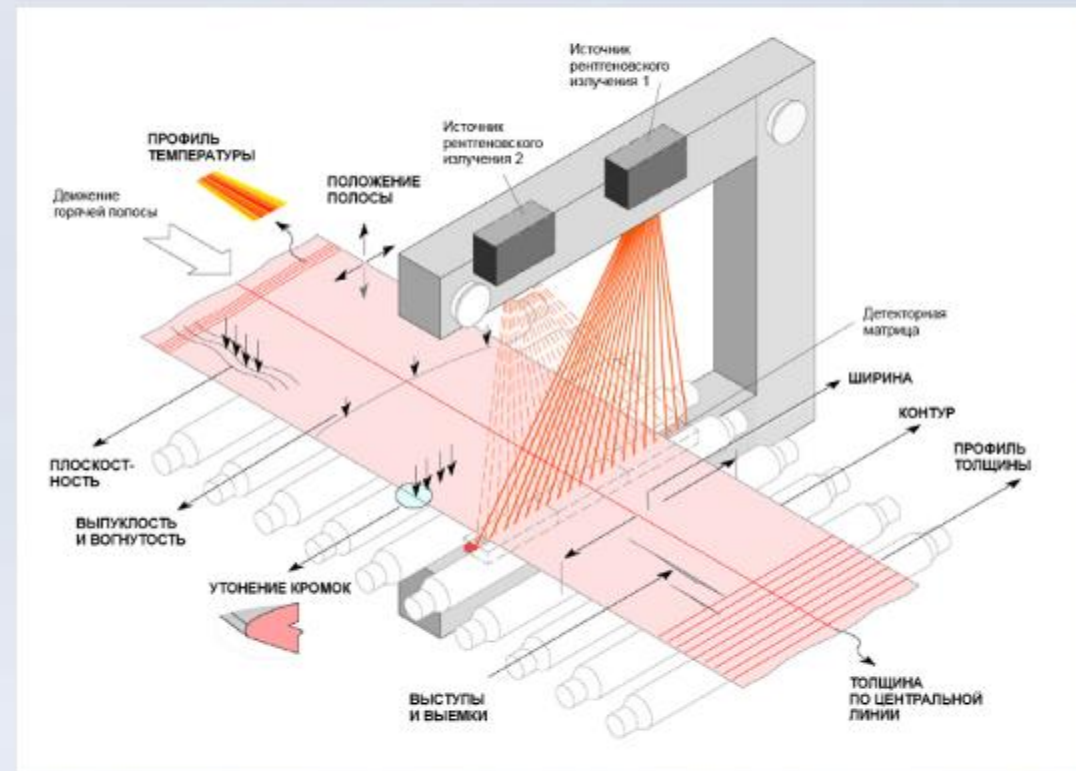
Сигнализатор уровня

Профилемер: принцип работы

Стереоскопический профилемер состоит из двух основных систем:

1. Два источника рентгеновского излучения, находящиеся на верхней раме
2. Линейка детекторов, находящаяся под прокатным станом

По ослаблению излучения определяется профиль толщины и другие параметры полосы проката



Профилемер: принцип работы

Принцип работы алгоритма восстановления:

профиль сигнала → профиль ослабления сигнала → профиль толщины
(трансмиссия)

$$s(x) \rightarrow \tau(x) = \frac{s_{ext} - s_{inf}}{s_{zero} - s_{inf}} \rightarrow h(x)$$

Прямые
измерения

Расчет
с учетом
калибровочных
данных

Применение
поправок

Сопоставление
калибровочной
кривой

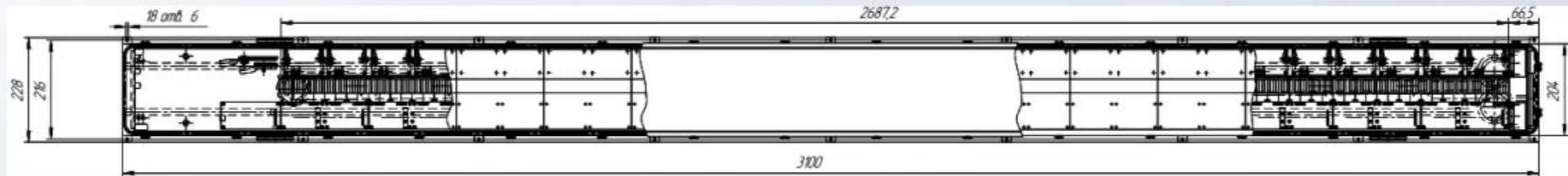
Применение
поправок и
передача
в АСУ ТП

Профилемер: экспериментальный стенд

Приведен общий вид стенда профилемера горячего проката, собранного в Институте ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ, и его структурная схема



Профилемер: линейка детекторов

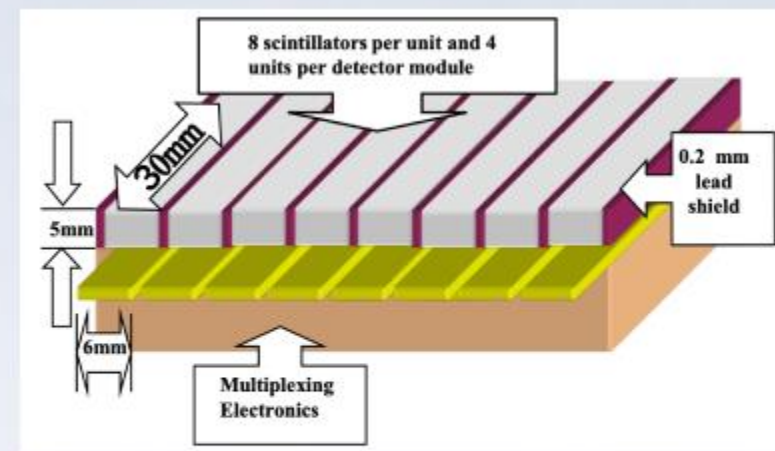


«Линейка» — многоканальный сцинтилляционный детектор

448 каналов; оцифровка при помощи
16-канальных АЦП

Сцинтиллятор: CdWO_4 (параллелепипеды
высотой 5 мм, поперечное сечение 6 x 30 мм)

Фотоприемники: фотодиоды;
токовый выходной сигнал



Экспериментальное исследование

Проанализировать работоспособность линейки детекторов

- рассмотреть темновые токи (зависимость от усиления, температуры)

Исследовать работу системы рентгеновских источников

- рассмотреть зависимость сигнала от режима работы обтюратора
- рассмотреть зависимость сигнала и трансмиссии от режима работы источников

Исследовать процессы внешней и внутренней калибровки

- разработать алгоритм внешней калибровки «проездом»
- разработать алгоритмы обработки калибровочных данных
- рассмотреть поведение сигналов и профилей трансмиссий

Исследование «линейки»: темновые токи

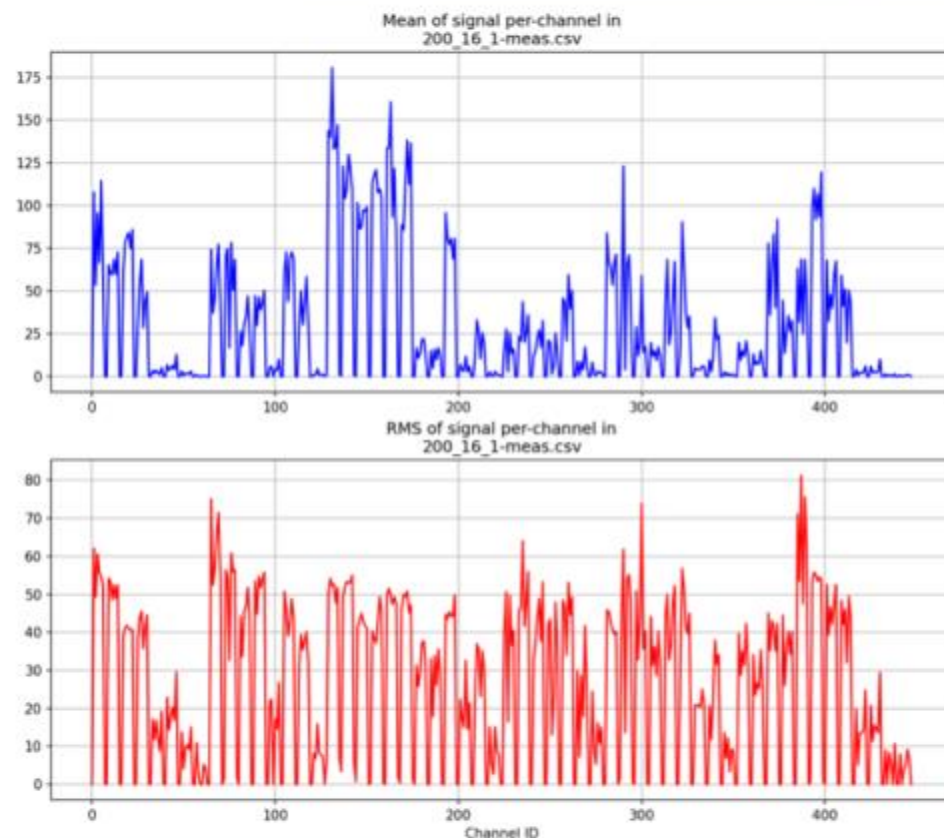


График профиля среднего значения сигнала и его RMS в эксперименте с «плохими» параметрами

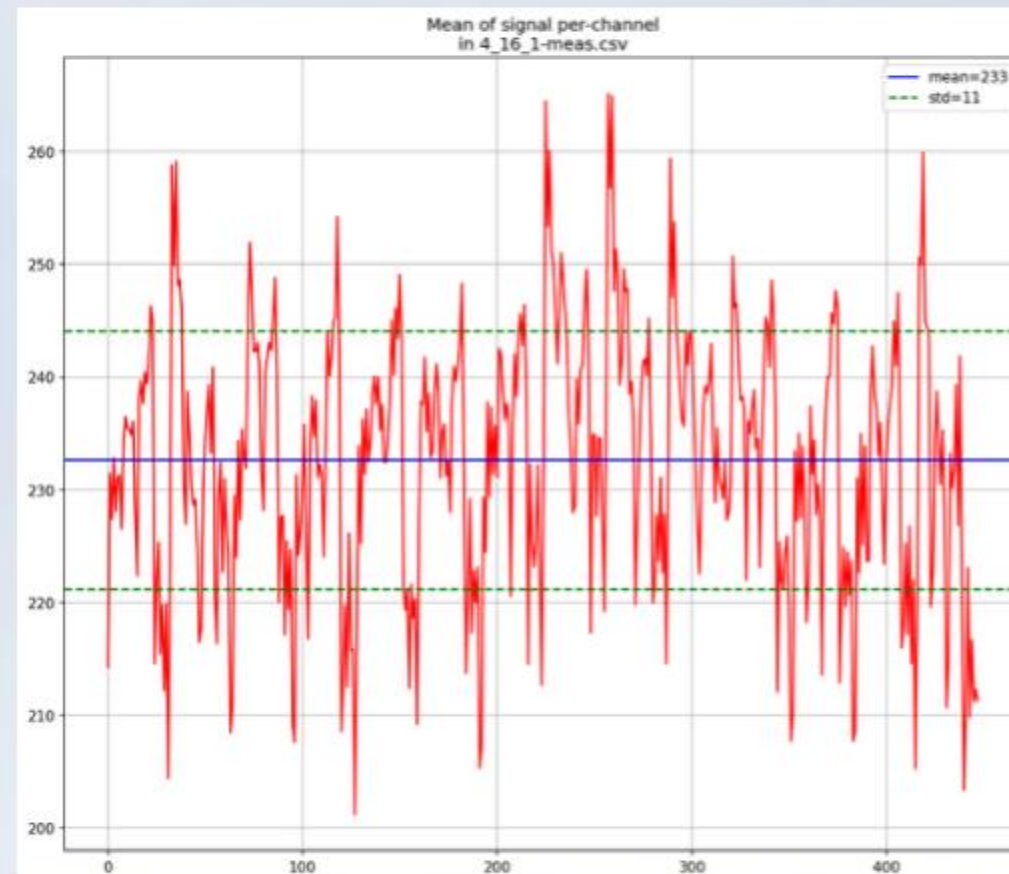
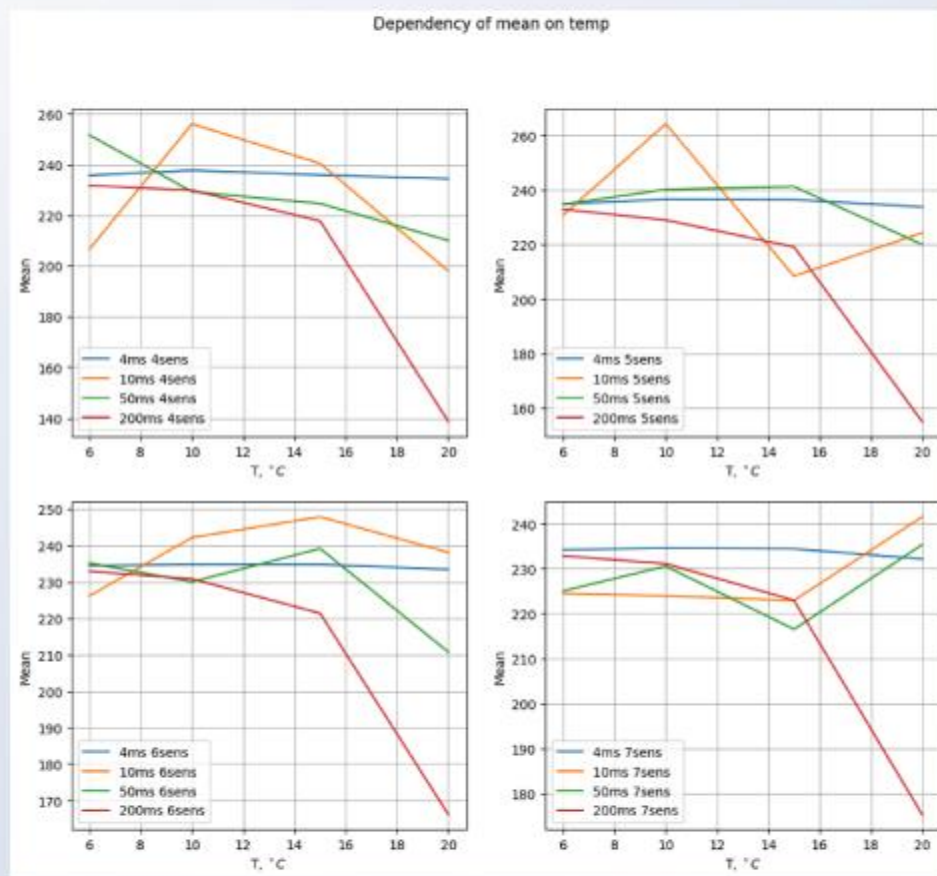
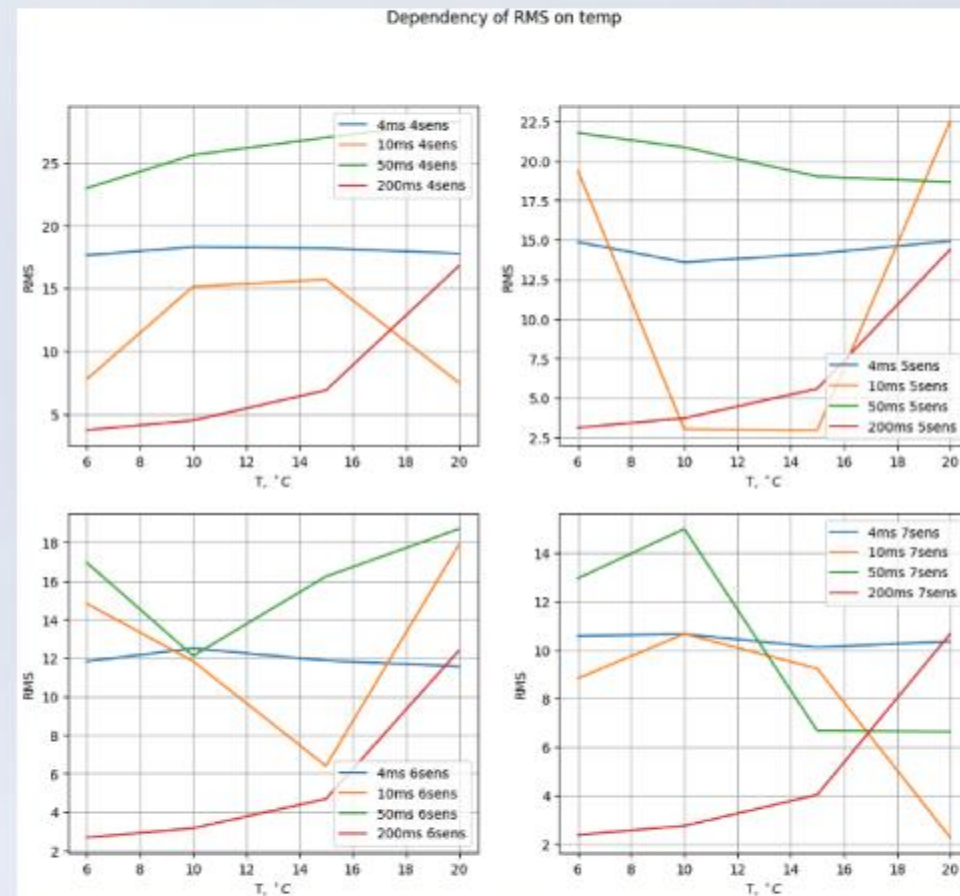


График профиля среднего значения сигнала в эксперименте с «хорошими» параметрами

Исследование «линейки»: темновые токи



Зависимость среднего
темнового тока от температуры



Зависимость RMS темнового
тока от температуры

Исследование X-Ray источников

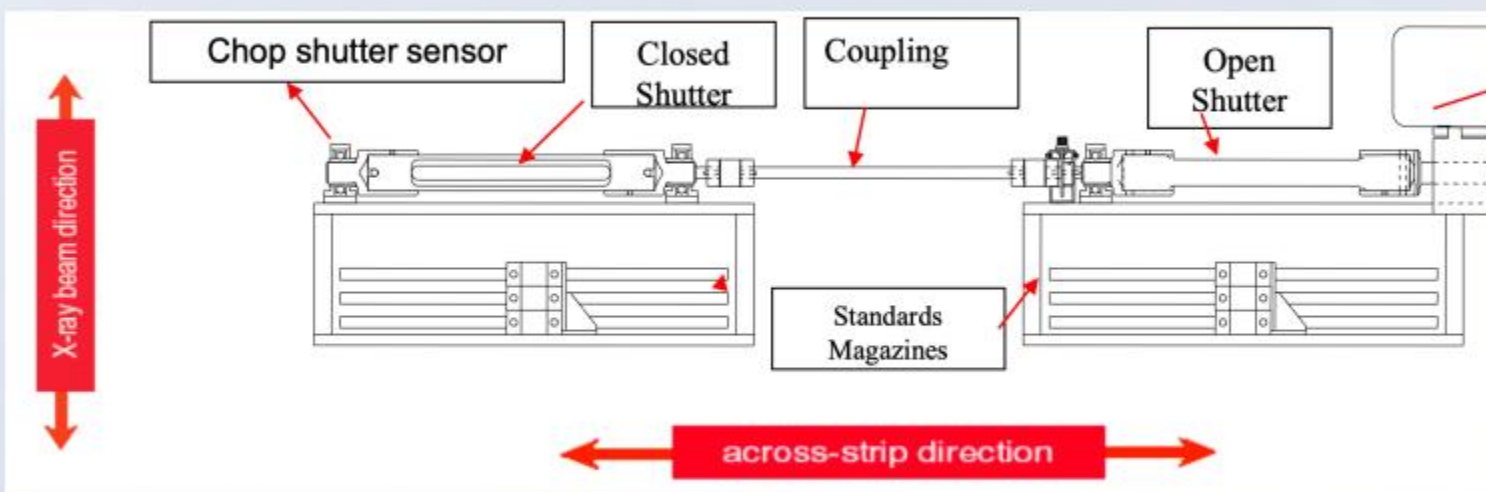
Система излучателей состоит из:

- 2 рентгеновских источников COMET MXR 225 02 FB (номинал 225 кВ, наш рабочий диапазон: 170-190 кВ, 6 мА)

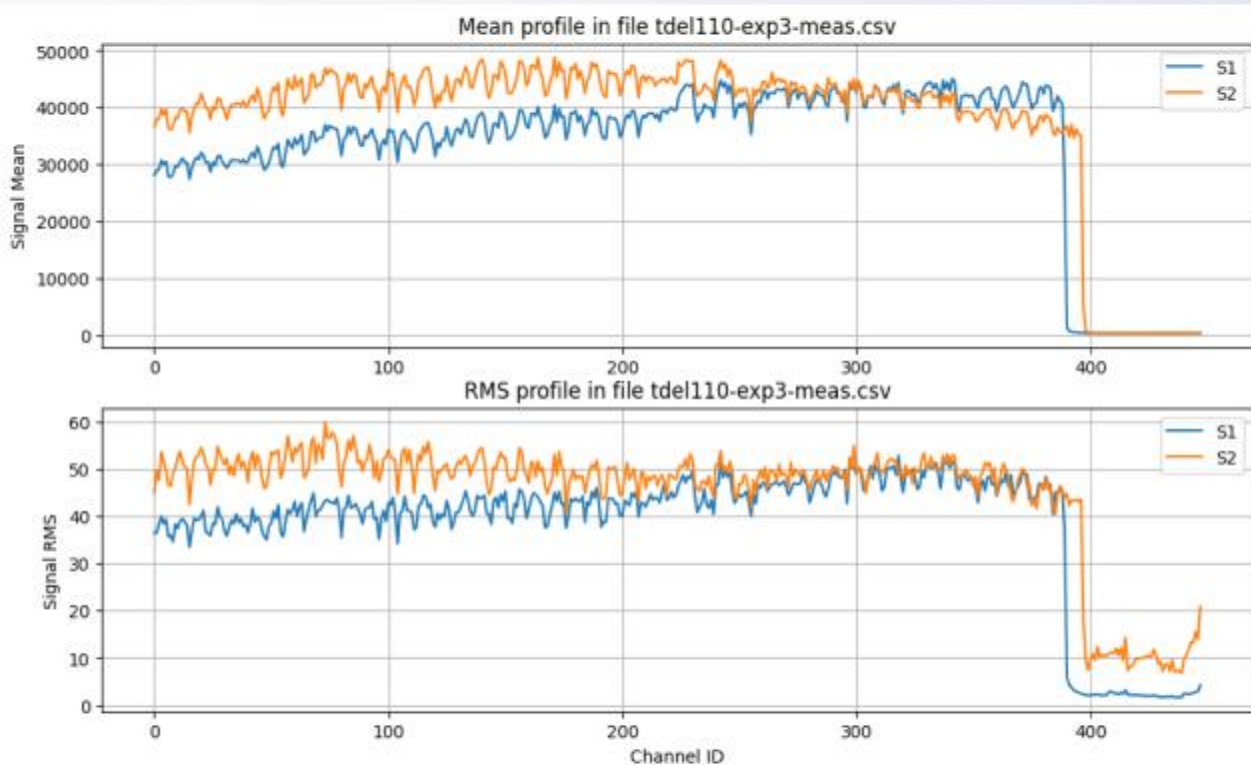
- 2 высоковольтных источника питания Gulmay CP 225 1/28
- 4 коллиматоров, по 2 на каждый источник: первичного и вторичного

- обтюратора (вращающейся шторки, перекрывающей попеременно один из пучков S1/S2)

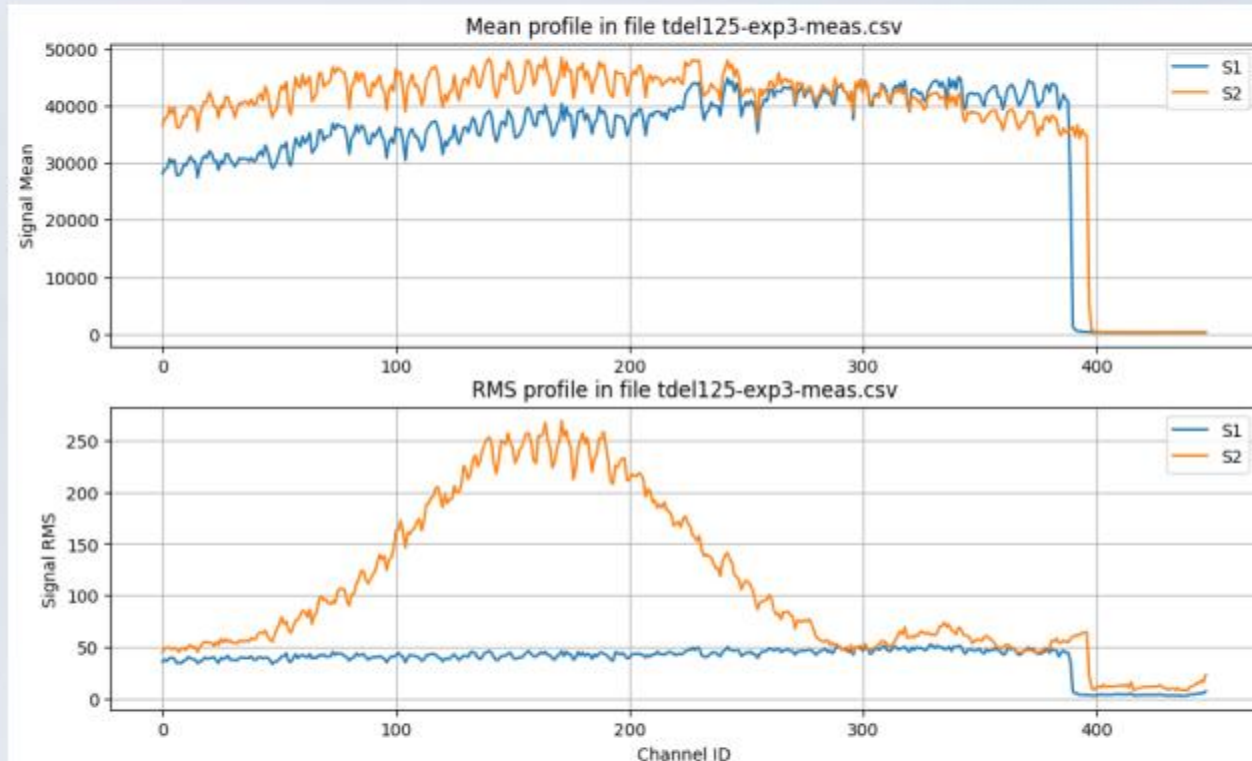
Скорость вращения 3000 об/мин, длительность «окна» 5 мс



Исследование X-Ray источников: обтюратор



Оптимальный режим



Неоптимальный режим
(окно интегрирования попадает
на край обтюратора)

Исследование X-Ray источников: режимы работы

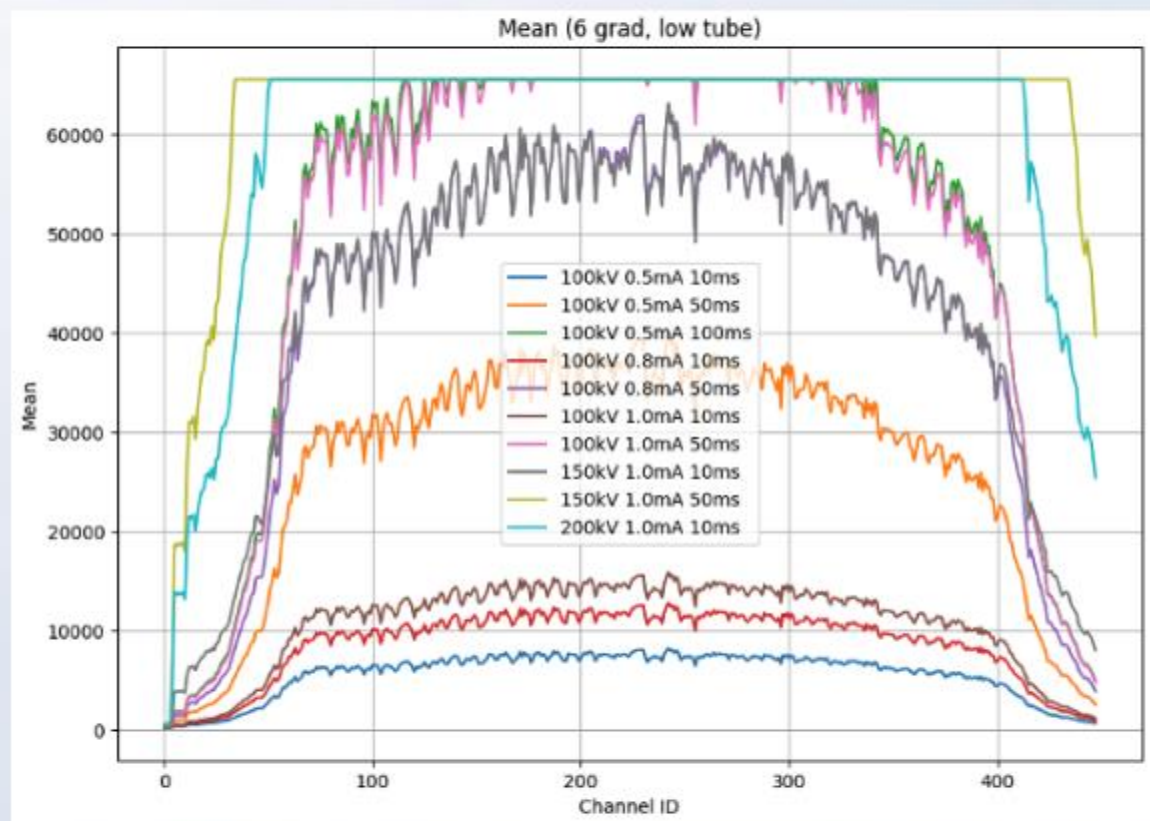


График профиля среднего
(от номера канала) без образцов

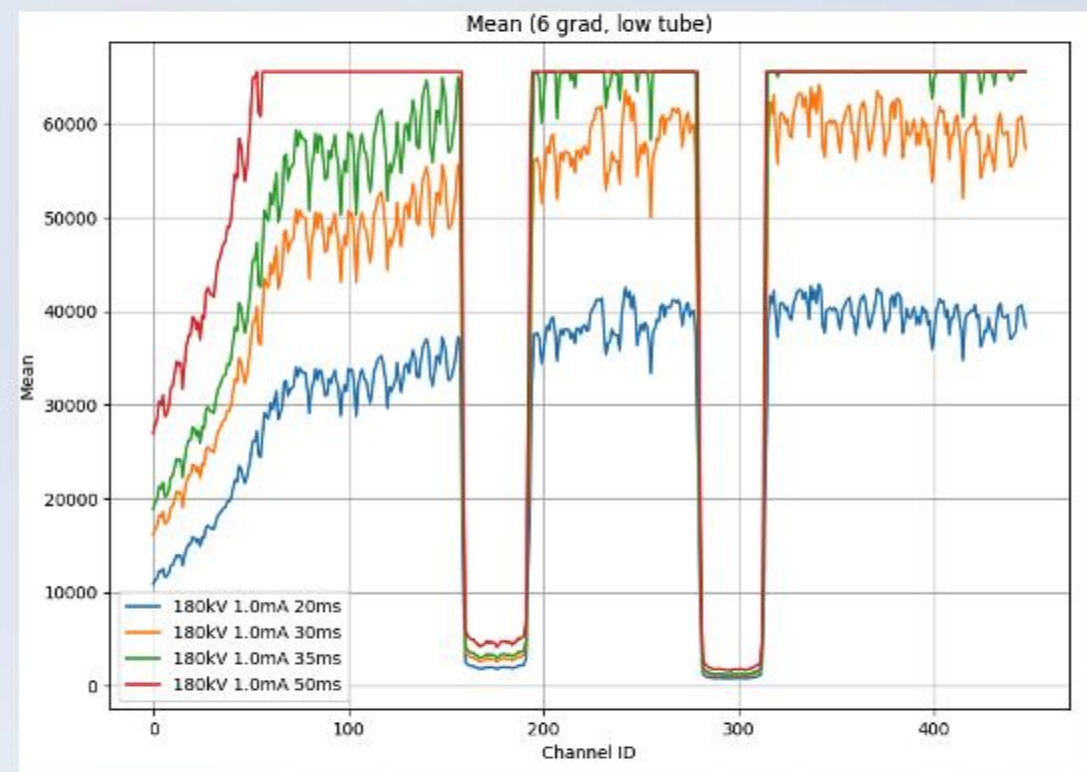
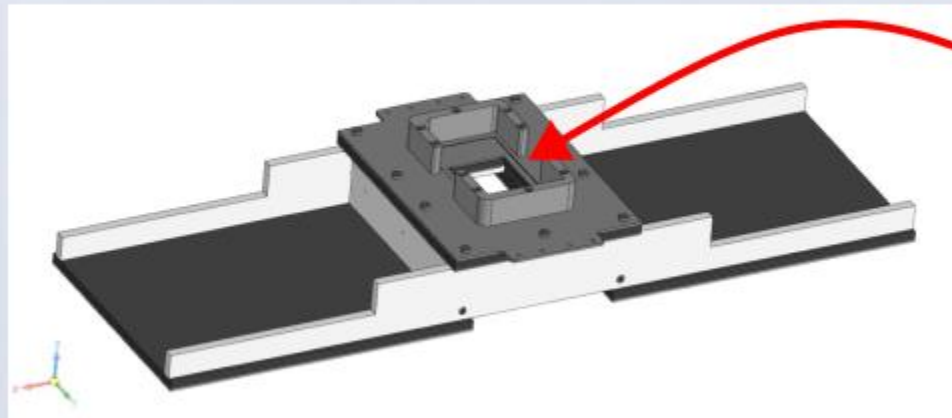


График профиля среднего
(от номера канала) с образцами

Исследование калибровок: внешняя «проездом»

Калибратор («тележка») с постоянной скоростью перемещается поперек линейки детекторов на уровне полосы проката, имитируя идеально однородную полосу (при интегрировании в правильных временных интервалах)

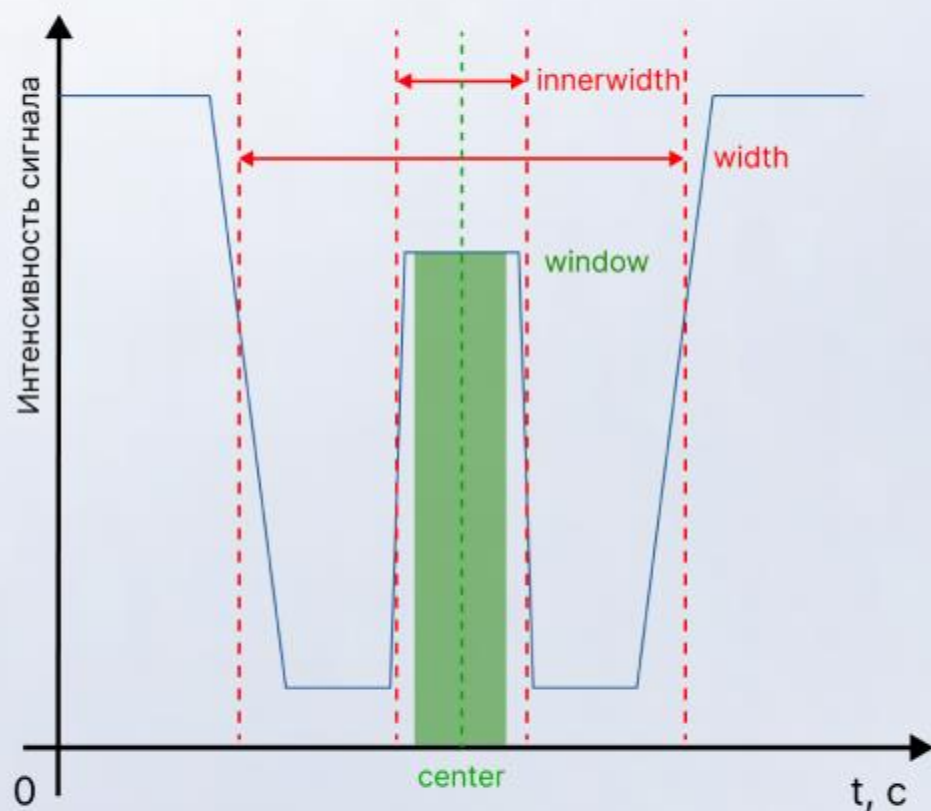
Эталоны 0.5–8 мм с идеальной точностью полировки поверхности (порядка 0.001 мм)



сюда помещаются
эталоны



Исследование калибровок: внешняя «проездом»



Модельный отклик детектора
при проезде

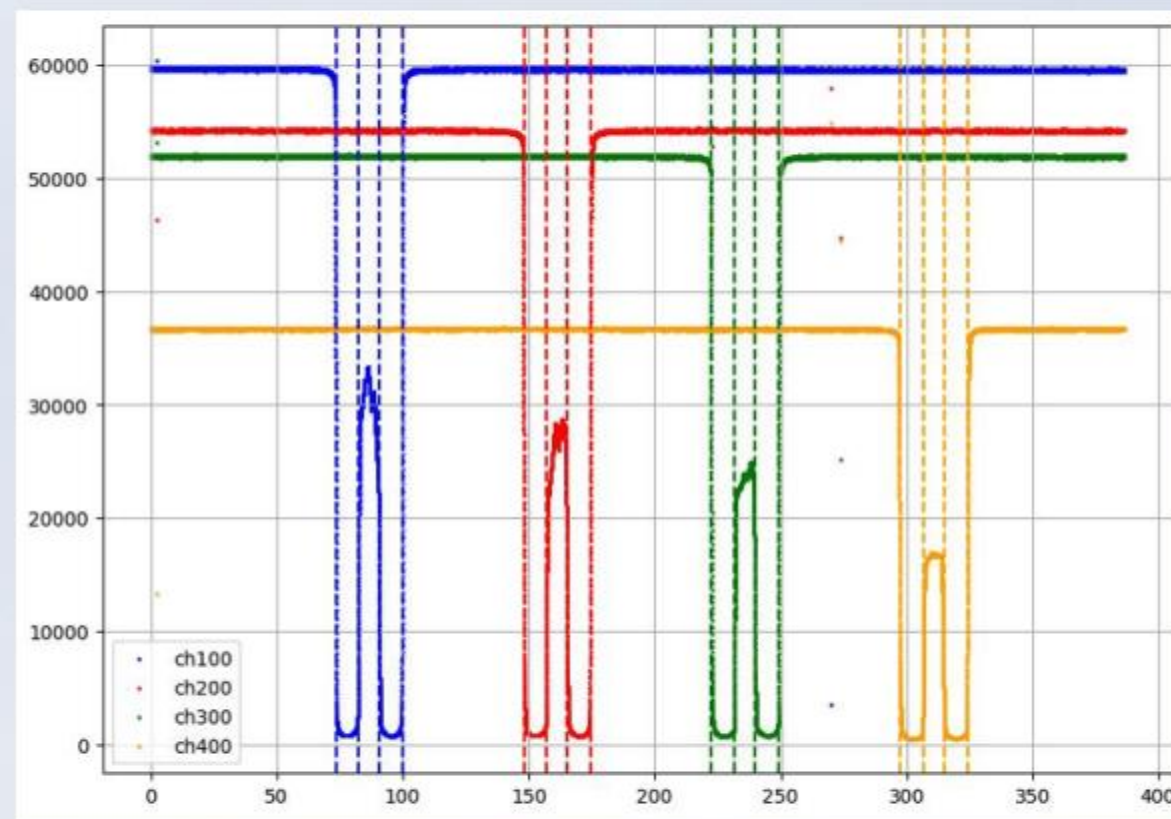
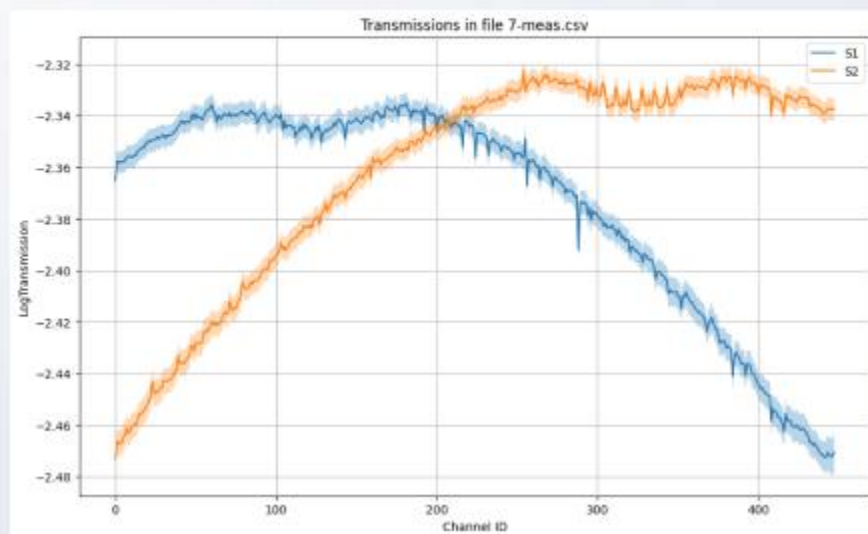
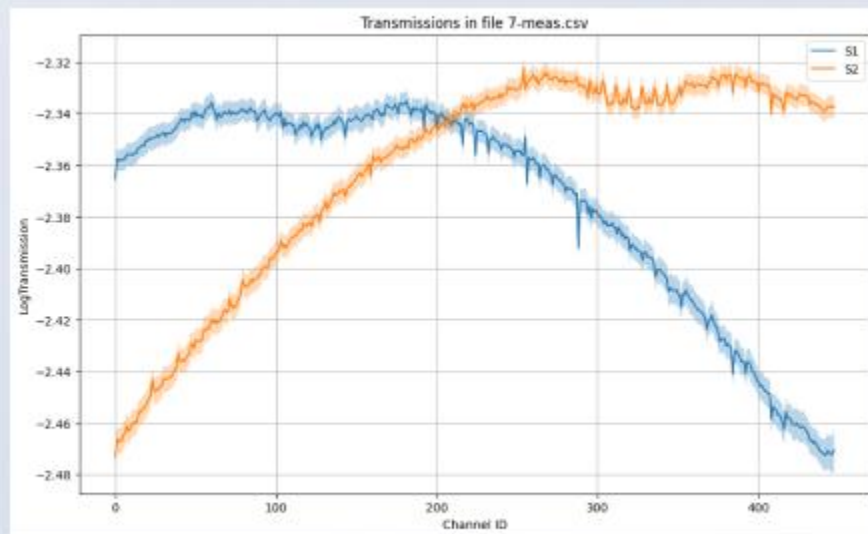


График временных разверток
сигналов при проезде

Исследование калибровок: внешняя «проездом»



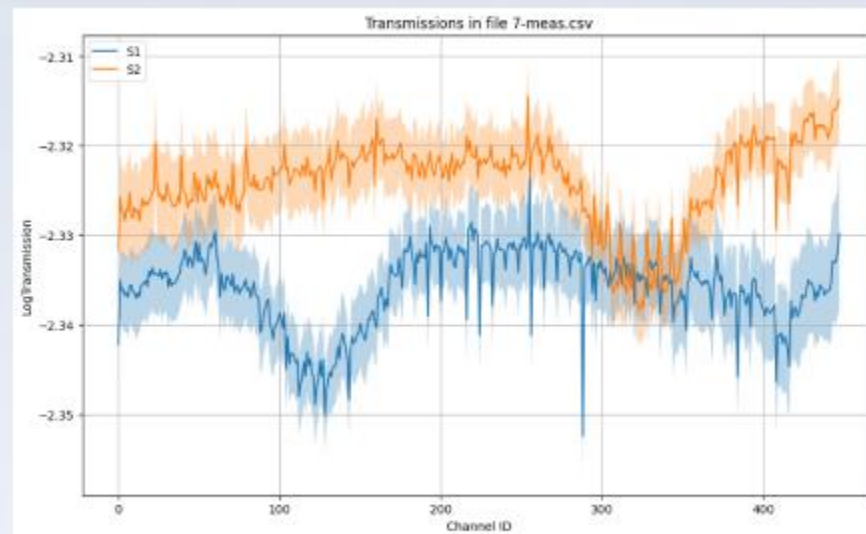
Профиль сигнала EXT



Профиль логарифма трансмиссии

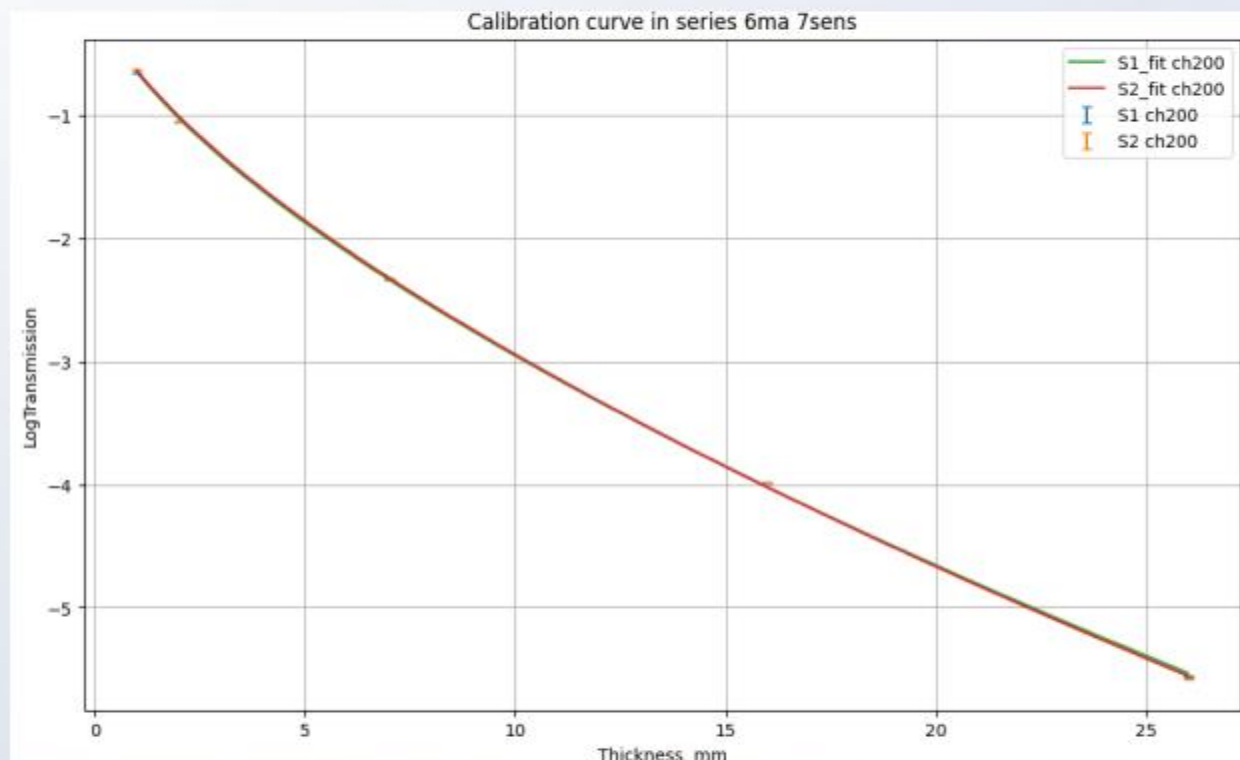
$$\tau(x) = \frac{s_{ext} - s_{inf}}{s_{zero} - s_{inf}}$$

Расчет трансмиссии
для каждого сигнала S1/S2



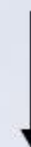
После поправки на геометрию

Исследование калибровок: калибровочная кривая



После калибровки получаем
448 таких кривых аппроксимацией:

$$\ln \tau \propto a \cdot L^b$$



Помещаем экспериментальное
значение трансмиссии на каждую
из них и восстанавливаем толщину

Калибровочная кривая
(график зависимости логарифма трансмиссии
от толщины для данного канала)

Требования к функционалу программного комплекса:

- возможность обработки одиночных измерений, внутренних и внешних калибровок
- единый формат хранения параметров эксперимента
- поддержка разных способов формирования ZERO и INF
- расчет трансмиссий и неопределенностей с учетом RMS исходного и опорных сигналов
- поддержка поправок и построения калибровочных зависимостей
- возможность интерактивного сравнения нескольких проектов
- экспорт промежуточных и итоговых таблиц для дальнейшего использования

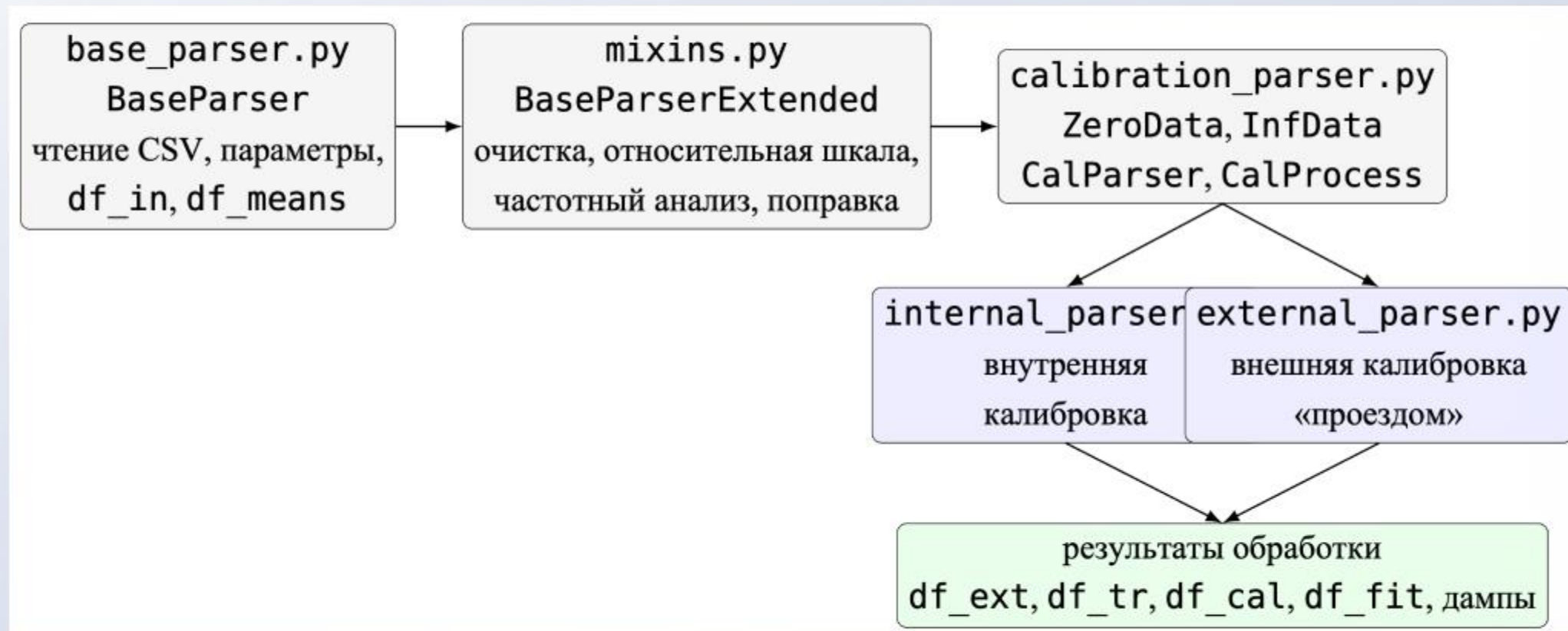
Программный комплекс: архитектура

Сравнение вариантов архитектуры комплекса

Вариант	Плюсы	Минусы	Вывод
Набор скриптов Python	удобен для быстрых расчетов	нет единого интерфейса, слабая воспроизводимость	подходит для прототипирования
Backend + frontend на Python	разделение расчета и интерфейса	требуется API между частями	основной вариант
C++ и Qt	высокая производительность	необходимо переписывать разработанное ранее ПО на Python	избыточен для текущей стадии
JS и Electron	современный и гибкий интерфейс	требует слишком много ресурсов, не интегрируется с Python	не выбран
Локальный web-сервер	возможность удаленного доступа	усложняет развертывание	не выбран

Программный комплекс: расчетная библиотека

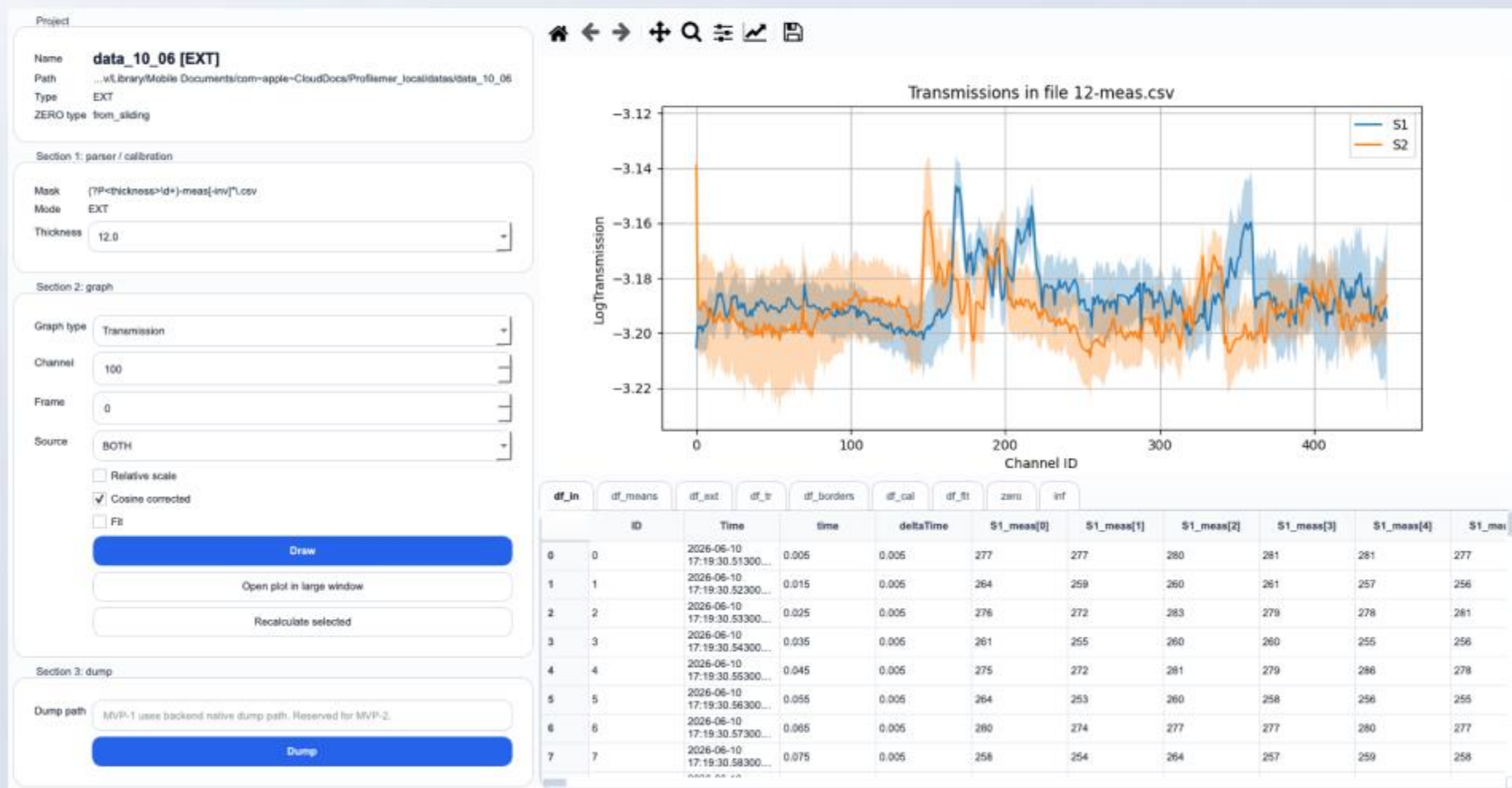
Python3.13: scipy, pandas, matplotlib, joblib



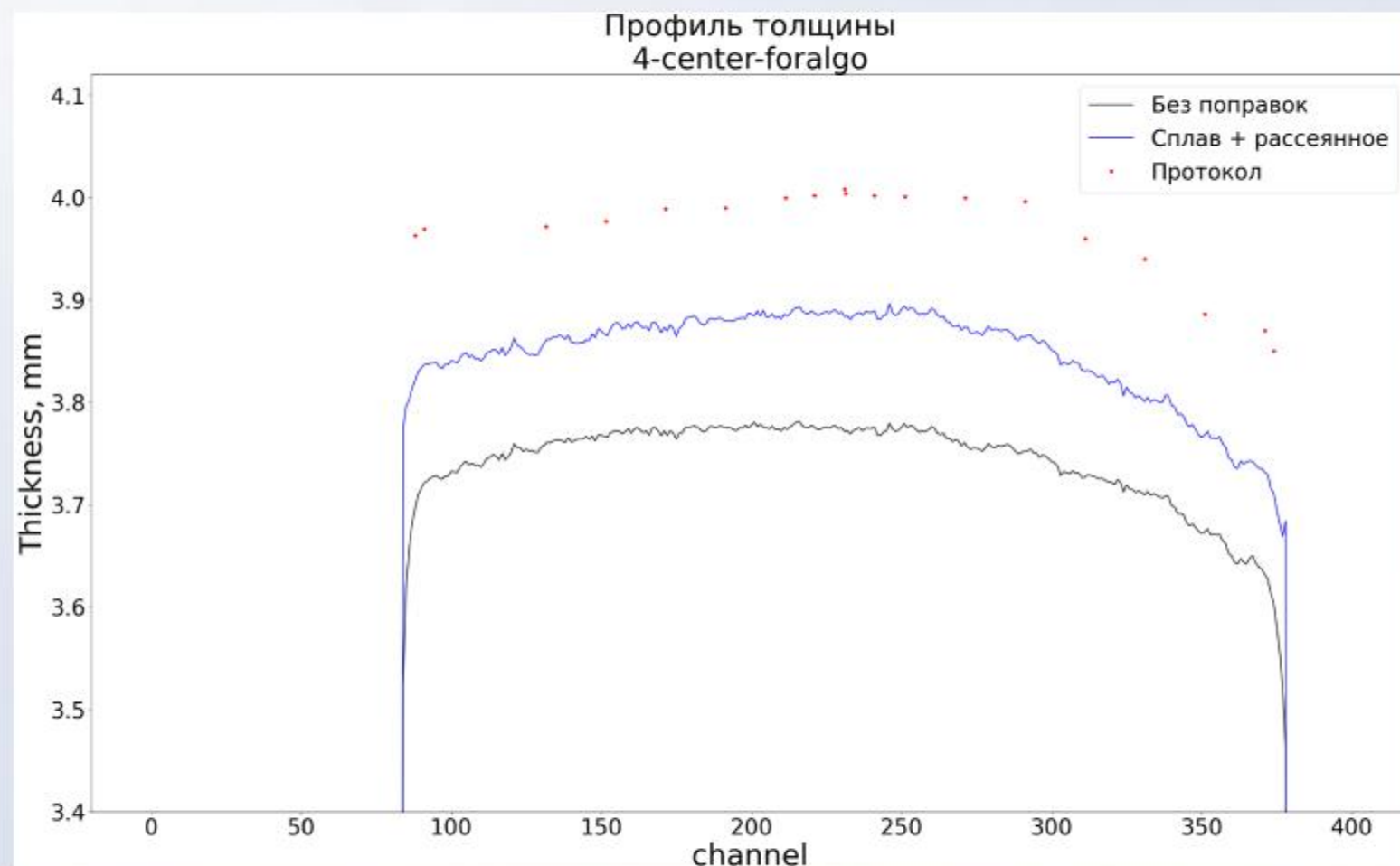
Структура расчетной библиотеки

Программный комплекс: графический интерфейс

Python3.13 + Qt6 (через PySide6) + PyInstaller



Верификация результатов измерений



Корректная форма

Отклонение от
протокола измерений:
1-3%

Допустимое
отклонение: 1%

Восстановленный профиль толщин для образца 4 мм
(с использованием результатов внешних калибровок)

Заключение

1. Выполнен анализ работоспособности линейки детекторов. Определены устойчивые режимы работы, выявлены аномальные каналы и области, требующие контроля состояния детекторных сборок и геометрии нижнего плеча профилемера
2. Исследована работа рентгеновских источников и режима внешней синхронизации. Подобраны оптимальные параметры системы излучателей для рабочего режима.
3. Разработана и проверена методика внешней калибровки «проездом». Определены характерные параметры формы временной развертки сигнала, определены и интерпретированы основные зависимости процесса.
4. Разработан программный комплекс для обработки и визуального анализа калибровочных данных. Основным решением выбрана схема расчетная библиотека + графический интерфейс на языке Python 3.
5. По предварительным измерениям установлено, что текущая версия алгоритма позволяет определять края образцов толщиной до 6 мм с точностью восстановления ширины около 1 мм и восстанавливать профиль толщины с точностью порядка 1–2%

К основным направлениям доработки комплекса относятся развитие алгоритмов контроля качества данных, уточнение геометрических и физических поправок, интеграция с алгоритмом восстановления профиля толщины.