

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 620.179.15:681.586.8

На правах рукописи

КАЛАШНИКОВ ДАНИИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОТЛАДКИ
И КАЛИБРОВКИ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ПРОФИЛЕМЕРА
ГОРЯЧЕГО ПРОКАТА**

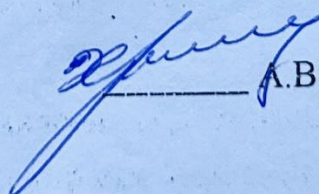
Направления подготовки:

09.04.04 «Программная инженерия»,

14.04.02 «Ядерная физика и технологии»

Диссертация на соискание степени магистра

Научный руководитель,
к.ф.-м.н.

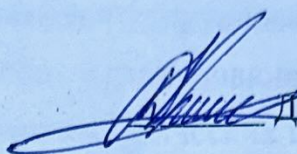
 А.В. Хромов

Москва 2026

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

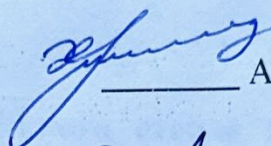
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОТЛАДКИ И КАЛИБРОВКИ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ПРОФИЛЕМЕРА ГОРЯЧЕГО ПРОКАТА

Студент

 Д.Е. Калашников

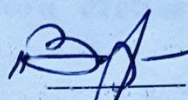
Научный руководитель,

к.ф.-м.н.

 А.В. Хромов

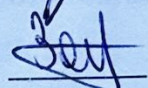
Рецензент 1,

к.ф.-м.н.

 В.Н. Корноухов

Рецензент 2,

к.т.н., доцент

 А.М. Золотарев

Секретарь ГЭК,

к.ф.-м.н.

 Е. Ю. Солдатов

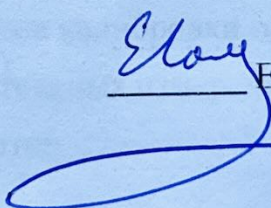
Зав. каф. №40,

д.ф.-м.н., проф.

_____ М. Д. Скорохватов

Рук. учеб. прог.,

к.ф.-м.н.

 Е. Ю. Солдатов

Содержание

Вступление	4
1 Радиометрический метод неразрушающего контроля	7
1.1 Обзор технологических процессов в металлургии	7
1.2 Виды и характеристики ионизирующего излучения, применя- емые для решения задач неразрушающего контроля	9
1.3 Принципы работы радиометрических приборов неразрушаю- щего контроля	11
2 Описание экспериментального стенда профилемера горячего проката в НИЯУ МИФИ	16
2.1 Общее описание конструкции стенда	16
2.2 Описание детектирующей системы	18
2.3 Описание системы источников рентгеновского излучения . .	21
3 Экспериментальное исследование работоспособности стенда	26
3.1 Отладка и тестирование детектирующей системы	26
3.2 Тестирование источников рентгеновского излучения	33
3.3 Исследование процессов калибровки профилемера	37
3.4 Проведение предварительных измерений профиля толщины и верификация результатов	57
4 Программный комплекс для анализа экспериментальных дан- ных калибровки	61
4.1 Сравнительный анализ и обоснование выбора архитектуры программного комплекса	61
4.2 Расчетная библиотека: структура и функционал	63
4.3 Графический интерфейс: структура и функционал	67
4.4 Перспективы доработки программного комплекса	72
Заключение	74
Список использованной литературы	76

Вступление

Современное металлургическое производство развивается в направлении повышения точности технологического контроля, снижения расхода сырья и энергии, а также сокращения доли продукции, не соответствующей заданным геометрическим характеристикам. Для горячекатаной полосы критически важны профиль толщины, ширина, клиновидность, выпуклость, утонение кромок и планшетность. Эти параметры должны определяться непосредственно в технологическом процессе, поскольку данные профилемера используются автоматизированной системой управления технологическим процессом для регулирования режимов прокатки и последующей верификации качества продукции [25, 26, 27].

Одним из наиболее перспективных методов контроля геометрических параметров горячего проката является радиометрический метод неразрушающего контроля. Он основан на регистрации ослабления интенсивности ионизирующего излучения при прохождении через контролируемый объект. В отличие от контактных методов измерения, радиометрический подход применим при высоких температурах, высокой скорости движения полосы и ограниченном доступе к объекту контроля. Дополнительным преимуществом является возможность построения многоканальной измерительной системы, позволяющей восстанавливать не только среднюю толщину, но и поперечный профиль проката.

Радиометрические методы контроля толщины листового проката применяются в промышленности как основа бесконтактных измерительных систем, работающих в условиях высокой температуры, высокой скорости движения полосы и ограниченного доступа к объекту контроля. Физическая основа таких систем связана с регистрацией ослабления фотонного излучения при прохождении через материал, а точность восстановления толщины определяется стабильностью источника, характеристиками детекторов, геометрией измерения и качеством калибровочных процедур [1, 2, 3, 4, 5]. Промышленные рентгеновские толщиномеры и профилемеры реализуются в виде многоканальных систем онлайн-контроля, использующих управляемые источники излучения, детекторные линейки и алгоритмы компенсации геометрических и спектральных эффектов [13, 14, 15, 16, 17, 18].

В НИЯУ МИФИ совместно с индустриальным партнером ведется разработка экспериментального стенда профилемера горячего проката для Стана-2000 Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь». Стенд предназначен для отладки основных узлов профилемера, проверки детектирующей системы, исследования работы рентгеновских источников и разработки методик внешней и внутренней калибровки. В состав стенда входят две рентгеновские трубки, система высоковольтного питания, коллиматоры, обтюратор, магазин стандартов, калибратор-тележка, линейка сцинтилляционных детекторов и система сбора данных.

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью разработки собственных алгоритмов тестирования и калибровки детекторной системы, а также создания соответствующей программной инфраструктуры. Без специализированного программного комплекса обработка данных калибровки сводится к набору разрозненных скриптов, что усложняет воспроизводимость результатов и затрудняет диагностику аппаратных проблем стенда.

Цель работы — разработка программного комплекса для отладки и калибровки детектирующей системы экспериментального стенда профилемера горячего проката, а также применение этого комплекса для анализа экспериментальных данных калибровки и предварительной верификации результатов измерений.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- изучить радиометрический метод неразрушающего контроля и принципы работы приборов, применяемых в металлургическом производстве;
- рассмотреть конструкцию экспериментального стенда профилемера горячего проката в НИЯУ МИФИ, включая детектирующую систему и систему источников рентгеновского излучения;
- проанализировать работоспособность линейки детекторов по темновым токам, сигналам полной засветки и трансмиссиям;
- исследовать работу рентгеновских источников, обтюлятора и режима внешней синхронизации;

- исследовать процессы внешней калибровки «проездом» и внутренней калибровки с использованием магазина стандартов;
- проверить применимость разработанных алгоритмов для восстановления профиля толщины образцов;
- разработать архитектуру программного комплекса, включающую backend-библиотеку обработки данных и графическое приложение для интерактивного анализа;
- определить перспективы дальнейшей доработки программного комплекса.

Работа построена следующим образом. В первой главе рассмотрены физические основы радиометрического контроля, области применения радиометрических приборов в металлургии и принципы восстановления измеряемых величин по ослаблению излучения. Во второй главе описан экспериментальный стенд профилемера горячего проката, его детектирующая система и система рентгеновских источников. В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования работоспособности стенда, процессов калибровки и предварительного восстановления профиля толщины. В четвертой главе описан разработанный программный комплекс: выполнен сравнительный анализ архитектурных решений, рассмотрены расчетная backend-библиотека, графический интерфейс и перспективы дальнейшего развития.

1 Радиометрический метод неразрушающего контроля

1.1 Обзор технологических процессов в металлургии

Производство продукции черной металлургии представляет собой цепочку взаимосвязанных процессов: подготовка сырья, получение чугуна, выплавка стали, внепечная обработка, непрерывное литье заготовок, горячая прокатка и последующий контроль качества. Эти этапы подробно рассматриваются в работах по технологии горячей прокатки, непрерывного литья и объемной деформации металлов [25, 26, 27, 28, 29, 30]. На каждом этапе требуется измерять технологические параметры, которые напрямую связаны с устойчивостью процесса и качеством металла. К таким параметрам относятся уровень расплава, плотность и концентрация пульповых или шламовых потоков, температура, расход, положение кромок, толщина и поперечный профиль проката.

В автоматизированной системе управления технологическим процессом измерительные приборы относятся к *полевому уровню*. Полевой уровень — это нижний уровень АСУ ТП, непосредственно связанный с технологическим объектом. В него входят датчики, детекторы, исполнительные механизмы, локальные преобразователи, первичная электроника и линии связи с контроллерами. Именно на полевом уровне физическая величина преобразуется в электрический или цифровой сигнал, пригодный для дальнейшей обработки. Выше располагается уровень программируемых логических контроллеров, где выполняются алгоритмы регулирования, блокировки и противоаварийная защита; еще выше находится уровень диспетчерского управления и архивирования данных [8, 10].

Радиометрические приборы занимают важное место на полевом уровне, поскольку позволяют выполнять бесконтактные измерения через стенки сосудов, трубопроводов, кристаллизаторов и защитных кожухов. Для черной металлургии это особенно важно: приборы работают в условиях высокой температуры, пыли, вибраций, ограниченного доступа, агрессивных сред и высокой скорости движения материала. В этих условиях радиометрический метод применяется, например, в профилемерах, уровнемерах, сигнала-

лизаторах уровня и плотномерах.

В машинах непрерывного литья заготовок радиометрические уровнемеры используются для контроля уровня жидкой стали в кристаллизаторе. Источник гамма-излучения и детектор устанавливаются снаружи кристаллизатора; при увеличении уровня расплава большее количество излучения проходит через металл и поглощается в нем, поэтому сигнал на детекторе уменьшается. По скорости счета можно поддерживать положение мениска, предотвращать переливы и прорывы оболочки заготовки. Промышленные системы такого типа применяются на слябовых, сортовых и блюмовых МНЛЗ; для них характерны миллисекундные времена обновления и устойчивость к пыли, температуре и вибрациям [9, 10].

Радиометрические плотномеры применяются на трубопроводах и аппаратах, где необходимо контролировать плотность или концентрацию жидкостей, растворов, суспензий, шламов и пульп. В черной металлургии такие задачи возникают при подготовке сырья, гидротранспорте пульп, работе газоочисток, оборотных шламовых потоков и технологических растворов. Источник и детектор крепятся снаружи трубы, поэтому прибор не контактирует со средой и не создает гидравлического сопротивления. При увеличении плотности среды поглощение возрастает, а зарегистрированная интенсивность уменьшается; после калибровки это позволяет получать плотность или массовую долю твердой фазы в режиме реального времени [8, 10].

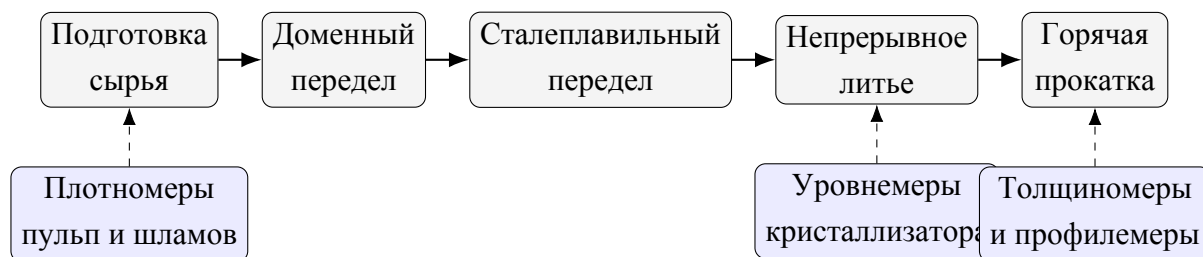


Рисунок 1 – Примеры применения радиометрических приборов на этапах черной металлургии

Для контроля толщины горячего проката применяются разные физические методы: механические, оптические, электромагнитные, ультразвуковые и радиометрические. Контактные методы ограничены температурой и скоростью движения объекта. Оптические методы эффективны для измерения ширины и положения кромок, но не позволяют напрямую восстановить толщину непрозрачного материала. Электромагнитные и ультразвуковые мето-

ды чувствительны к состоянию поверхности, зазорам, температуре и структуре материала. Радиометрический метод позволяет измерять толщину по ослаблению проникающего излучения и поэтому остается одним из базовых подходов для промышленных толщиномеров и профиломеров.

Экономическая значимость точности работы профиломеров определяется тем, что отклонение геометрических параметров от паспортных значений снижает стоимость продукции и может приводить к необходимости дополнительной обработки или браковки. Для современных станов горячей прокатки требуется не только точечное измерение толщины, но и восстановление профиля по всей ширине полосы. Поэтому вместо одиночного детектора применяется линейка детекторов, регистрирующая пространственное распределение ослабленного излучения. Таким образом, профиломер является более сложным развитием тех же радиометрических принципов, которые используются в уровнемерах и плотномерах.

1.2 Виды и характеристики ионизирующего излучения, применяемые для решения задач неразрушающего контроля

Ионизирующим называется излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию ионов. По физической природе оно может представлять собой поток тяжелых заряженных частиц, электронов и позитронов, нейтронов, гамма-квантов или рентгеновских фотонов. В задачах промышленного неразрушающего контроля наибольшее распространение получили фотонные виды излучения: гамма-излучение радиоизотопных источников и рентгеновское излучение, создаваемое рентгеновскими излучателями [1, 2, 4].

Основными характеристиками излучения являются энергия частиц, энергетический спектр, угловое распределение, интенсивность и пространственная геометрия пучка. Для моноэнергетического излучения все фотоны имеют одинаковую энергию, тогда как реальный спектр рентгеновского излучателя является непрерывным и содержит как тормозную, так и характеристическую составляющие. Изменение напряжения и тока излучателя позволяет управлять жесткостью и интенсивностью рентгеновского пучка.

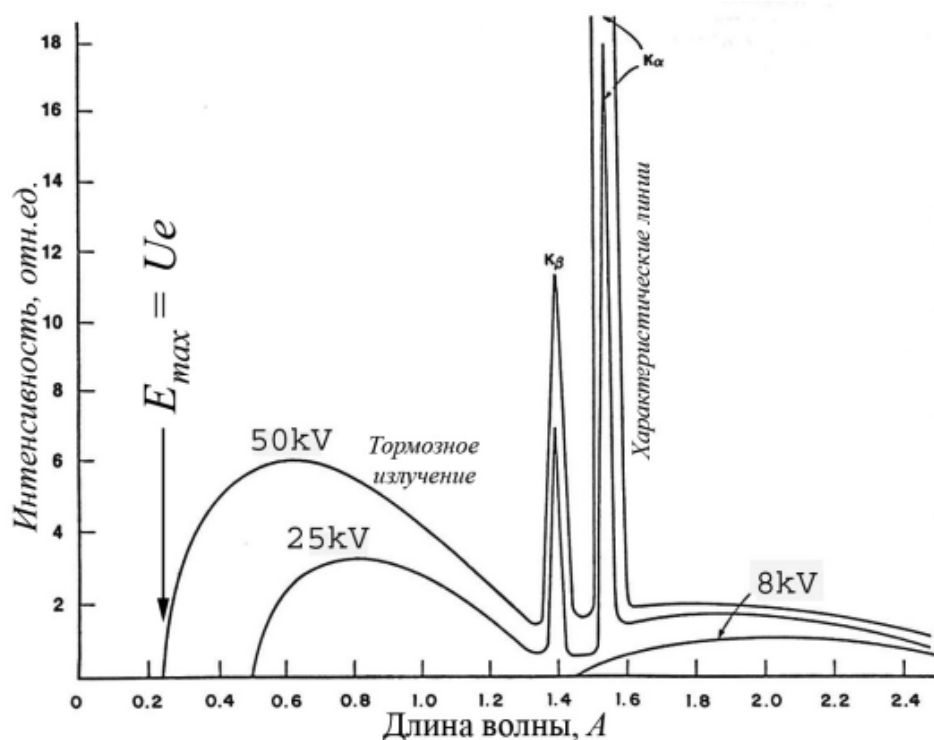


Рисунок 2 – Пример спектра рентгеновского излучателя: непрерывный тормозной спектр и характеристические линии материала анода

При прохождении фотонного излучения через вещество его интенсивность уменьшается из-за поглощения и рассеяния. В первом приближении для узкого монохроматического пучка справедлив закон экспоненциального ослабления:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1.1)$$

где I_0 — начальная интенсивность, $I(x)$ — интенсивность после прохождения слоя толщиной x , μ — линейный коэффициент ослабления. Коэффициент μ зависит от энергии фотонов и элементного состава вещества. Для стального проката это означает, что одна и та же толщина может давать разные уровни сигнала при изменении спектра источника или химического состава материала.

Для корректного описания ослабления рентгеновского излучения необходимо учитывать энергетическую зависимость массовых коэффициентов ослабления. В диапазоне энергий, характерном для промышленных рентгеновских толщиномеров, вклад в ослабление дают фотоэффект, комптоновское рассеяние и, при достаточно высоких энергиях, образование электрон-позитронных пар. Поэтому при работе с немонахроматическим спектром рентгеновской трубки простая экспоненциальная модель используется толь-

ко как первое приближение [1, 2, 3, 4, 6, 7].

Рентгеновское излучение в рассматриваемом диапазоне энергий является немонохроматическим. Поэтому более корректная запись интенсивности требует интегрирования по энергетическому спектру:

$$I(x) = \int \frac{dI_0}{dE} e^{-\mu(E)x} dE. \quad (1.2)$$

Именно спектральная неоднородность приводит к эффектам, которые необходимо учитывать при калибровке: например, мягкая компонента излучения сильнее поглощается тонкими фильтрами и калибровочными образцами, поэтому «чистый» сигнал без образца может быть не полностью физически сопоставим с сигналом после прохождения металла.

Для задач контроля горячего проката рентгеновский излучатель имеет ряд преимуществ по сравнению с радиоизотопным источником. Он позволяет отключать излучение, регулировать напряжение и ток, получать большую интенсивность и адаптировать режимы работы под толщину объекта. К недостаткам относятся необходимость высоковольтной системы питания, охлаждения, радиационной защиты и синхронизации с детектирующей системой.

1.3 Принципы работы радиометрических приборов неразрушающего контроля

Схематически плотномер и уровнемер используют один и тот же физический принцип: между источником и детектором находится среда с неизвестной толщиной или плотностью, а измеряемая скорость счета определяется ослаблением излучения. Для плотномера при фиксированной геометрии и известной массовой толщине стенок можно записать

$$I = I_0 C_{\text{wall}} \exp(-\mu_m \rho l), \quad (1.3)$$

где I_0 — интенсивность без контролируемой среды, C_{wall} — постоянный множитель, учитывающий стенки трубопровода и крепеж, μ_m — массовый коэффициент ослабления, ρ — плотность среды, l — длина пути излучения в

среде. После калибровки из (1.3) восстанавливается плотность:

$$\rho = -\frac{1}{\mu_m l} \ln \left(\frac{I}{I_0 C_{\text{wall}}} \right). \quad (1.4)$$

Рассмотрим упрощенную модель уровнемера расплава в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок. Целевой параметр такого прибора — уровень расплава h , то есть положение границы раздела «металл–газовая зона». Уровень можно восстановить по скорости счета $I(h)$, фиксируемой детектором: излучение ослабляется по-разному в воздухе и расплаве, поскольку $\mu_{\text{metal}} > \mu_{\text{air}}$.

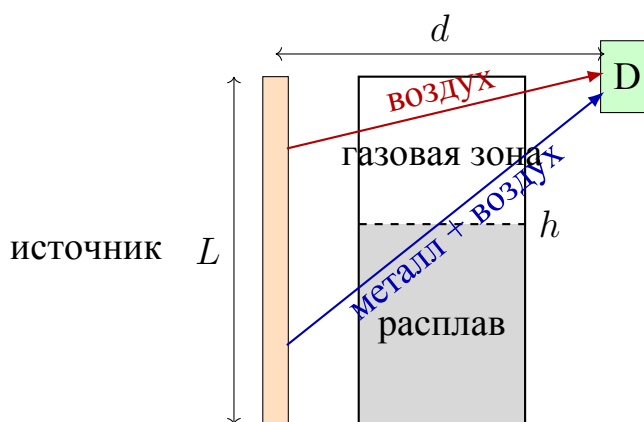


Рисунок 3 – Геометрия модельного расчета радиометрического уровнемера

Пусть протяженный источник длиной L расположен вдоль оси x , нижний край источника соответствует $x = 0$, верхний — $x = L$, а детектор расположен напротив верхнего края на расстоянии d . Бесконечно малый элемент источника dx имеет активность $dA = A dx/L$. Расстояние от элемента источника до детектора равно

$$r(x) = \sqrt{d^2 + (L - x)^2}. \quad (1.5)$$

Если считать угловое распределение излучения однородным, то без учета ослабления вклад элемента источника в сигнал детектора можно записать как

$$dI_0(x) = \frac{\Delta S}{r^2(x)} \frac{A}{L\Omega} dx, \quad (1.6)$$

где ΔS — эффективная площадь детектора, Ω — полный телесный угол, в который испускается излучение.

Если элемент источника находится ниже уровня расплава ($x < h$), луч проходит часть пути в металле и часть пути в воздухе. Из подобия треугольников получаем длины путей

$$s_{\text{air}}(h, x) = r(x) \frac{L - h}{L - x}, \quad s_{\text{metal}}(h, x) = r(x) \frac{h - x}{L - x}. \quad (1.7)$$

Тогда дифференциальный вклад такого луча в сигнал равен

$$dI_1(h, x) = dI_0(x) \exp [-\mu_{\text{air}} s_{\text{air}}(h, x) - \mu_{\text{metal}} s_{\text{metal}}(h, x)]. \quad (1.8)$$

Если же элемент источника расположен выше уровня расплава ($x \geq h$), луч проходит только через воздух, и вклад имеет вид

$$dI_2(h, x) = dI_0(x) \exp [-\mu_{\text{air}} r(x)]. \quad (1.9)$$

Итоговая скорость счета как функция уровня получается интегрированием по двум областям источника:

$$I(h) = \int_0^h dI_1(h, x) + \int_h^L dI_2(h, x). \quad (1.10)$$

Интеграл (1.10) в общем случае не обязан выражаться через элементарные функции, но для инженерной задачи это не является ограничением: достаточно рассчитать калибровочную таблицу $I(h)$ с шагом, меньшим требуемой точности измерения. Для сигнализатора уровня задача еще проще: выбирается порог скорости счета между состоянием «луч проходит преимущественно через воздух» и состоянием «луч перекрыт расплавом».

Переход от уровнемера к профилемеру состоит в усложнении измеряемой величины и геометрии. Уровнемер восстанавливает один параметр h по одной скорости счета или небольшому набору каналов. Плотномер при фиксированной геометрии восстанавливает плотность среды по ослаблению в трубе. Профилемер горячего проката регистрирует уже вектор сигналов по каналам линейки, то есть пространственное распределение интенсивности после прохождения через металлическую полосу.

В случае профилемера ключевой величиной является трансмиссия (или

ее натуральный логарифм), определяющаяся по следующей формуле:

$$\tau = \frac{S - S_{\text{inf}}}{S_{\text{zero}} - S_{\text{inf}}}, \quad (1.11)$$

где S — измеренный сигнал, S_{zero} — сигнал без калибровочного образца, соответствующий максимальному уровню излучения, S_{inf} — темновой сигнал или сигнал при полном ослаблении. Такая нормировка уменьшает влияние темнового тока, базового уровня электроники и нестабильности усиления.

В реальных радиометрических толщиномерах зависимость между толщиной и трансмиссией обычно определяется экспериментально по набору эталонных образцов. Такой подход позволяет учесть спектральный состав излучения, рассеянное излучение, геометрические поправки, неоднородность чувствительности каналов и долговременный дрейф измерительной системы [8, 9, 10, 11, 12].

После расчета трансмиссии толщина восстанавливается по калибровочной зависимости. Если пренебречь рассеянием и спектральными эффектами, из выражения (1.1) следует логарифмическая связь:

$$x = -\frac{1}{\mu} \ln \tau. \quad (1.12)$$

Однако в реальном профилемере используются экспериментальные калибровочные кривые, полученные на эталонных образцах. Это позволяет учесть геометрию стенда, спектр источников, чувствительность каналов, наличие фильтров, коллиматоров и рассеянного излучения, которые отклоняют калибровочную зависимость от чисто логарифмической.

Для профилемера горячего проката оказывается важна также геометрическая зависимость. Лучи, попадающие на разные каналы линейки, проходят через образец под разными азимутальными углами. Если координата канала относительно центра равна x_i , а высота источника над детекторной линейкой равна h , то

$$\cos \theta_i = \frac{1}{\sqrt{1 + (x_i/h)^2}}. \quad (1.13)$$

В экспериментальных материалах использовалась аппроксимация за-

висимости профиля трансмиссии от угла в виде

$$\ln \tau_i \propto \cos^b \theta_i = \left(1 + \frac{x_i^2}{h^2}\right)^{-b/2}, \quad (1.14)$$

где показатель b подбирается по данным моделирования или экспериментальной калибровки.

2 Описание экспериментального стенда профилемера горячего проката в НИЯУ МИФИ

2.1 Общее описание конструкции стенда

Экспериментальный стенд профилемера горячего проката создан на базе Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ для отладки узлов будущего промышленного профилемера и верификации методики измерения геометрических параметров полосы стального проката. К измеряемым параметрам относятся профиль толщины, ширина и некоторые вторичные, вычисляемые по распределению толщины (клиновидность, выпуклость, утонение кромок и планшетность).

Общая логика работы стенда соответствует аналогичным приборам, применяемым сейчас в промышленности: рентгеновские источники размещаются в верхнем плече опорной рамы, объект контроля находится в области рольганга, а линейка детекторов располагается в нижнем плече. Пучок рентгеновского излучения проходит через контролируемый образец и регистрируется многоканальной линейкой. Далее данные поступают в систему сбора и программной обработки.



Рисунок 4 – Функциональная схема экспериментального стенда профилемера горячего проката

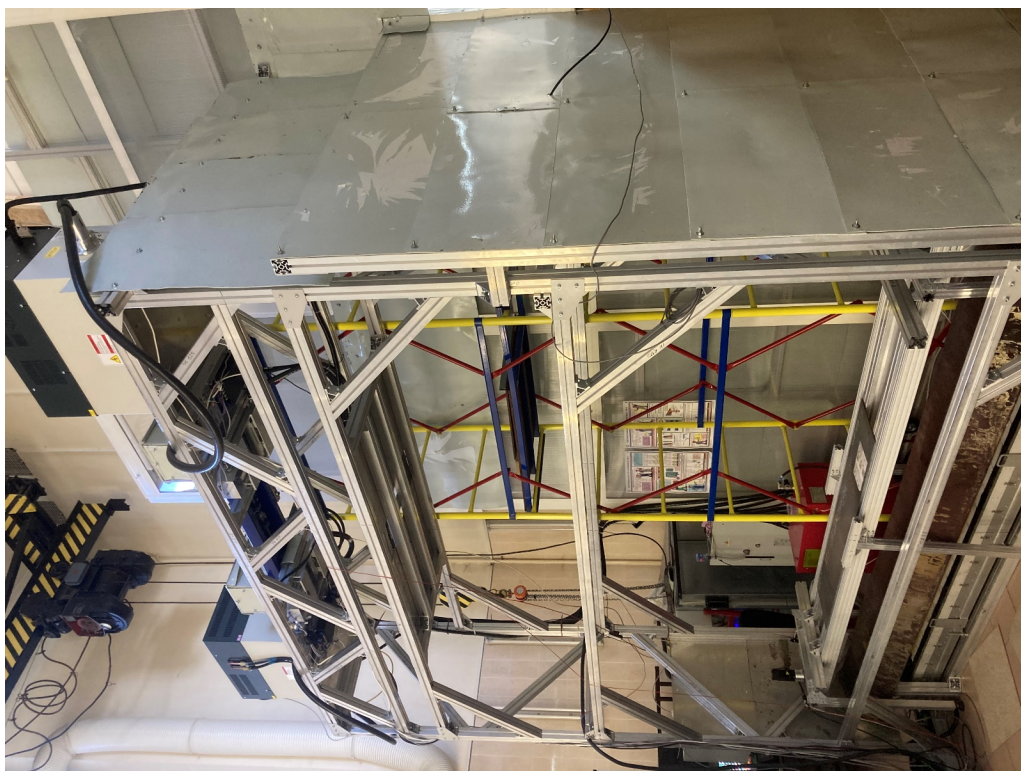


Рисунок 5 – Фото общего вида экспериментального стенда профилемера горячего проката в сборе

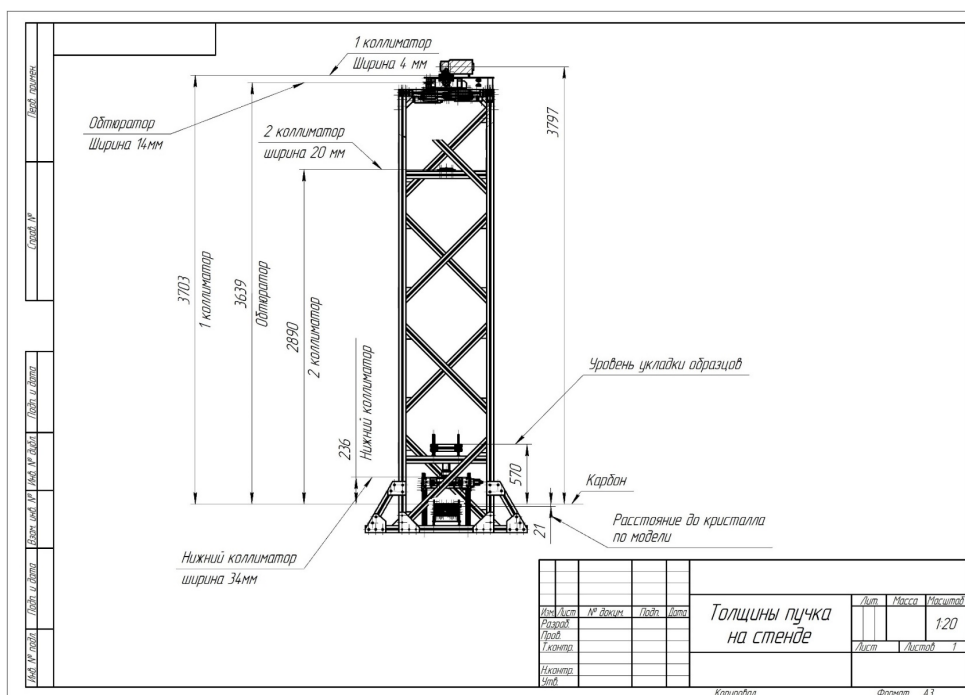


Рисунок 6 – Конфигурация экспериментального стенда с основными габаритными размерами

Основные компоненты стенда приведены в таблице 1. Конструкция рамы рассчитана на размещение оборудования верхнего плеча и обеспечивает

возможность позиционирования образцов проката. Для защиты персонала и оборудования используются свинцовая биологическая защита, шторы безопасности и управляемое перекрытие пучков.

Таблица 1 – Основные компоненты экспериментального стенда

Компонент	Назначение
Опорная рама	Размещение верхнего и нижнего плеча, юстировка оборудования и образцов проката.
Рентгеновские источники	Формирование двух пучков излучения для просвечивания образца.
Коллиматоры	Ограничение ширины и направления пучка, настройка геометрии засветки.
Обтюратор	Попеременное перекрытие пучков S1 и S2 для синхронного считывания сигналов.
Магазин стандартов	Проведение внутренней калибровки с выдвиганием эталонных образцов.
Калибратор-тележка	Проведение внешней калибровки «проездом» вдоль линейки детекторов.
Линейка детекторов	Регистрация пространственного профиля ослабленного рентгеновского излучения.
Система сбора данных	Управление режимами измерения, запись сигналов и передача данных в ПО.

2.2 Описание детектирующей системы

Детектирующая система является центральным элементом профилиметра, поскольку именно она преобразует пространственное распределение интенсивности рентгеновского излучения в цифровые данные. Линейка детекторов содержит 448 сцинтилляционных кристаллов на основе вольфрамата кадмия CdWO_4 . Общая длина чувствительной области составляет 2688 мм, шаг расположения детекторов — 6 мм. Электроника линейки включает 14 детектирующих плат и 56 детектирующих модулей.

Использование сцинтилляторов на основе CdWO_4 в многоканальной линейке детекторов обосновано высокой плотностью и эффективным атомным номером материала, что обеспечивает высокую эффективность регистрации рентгеновского и гамма-излучения. Для промышленных измерительных систем также важны радиационная стойкость сцинтиллятора, ста-

бильность световыхода и возможность работы в составе компактных многоканальных детекторных сборок [21, 22, 23, 24].

Каждый канал линейки регистрирует излучение, падающее на сцинтиллятор. В сцинтилляторе энергия рентгеновских фотонов преобразуется в оптические фотоны, которые регистрируются кремниевым фотоумножителем. Далее аналоговый сигнал усиливается, оцифровывается и передается управляющему контроллеру. Контроллер обеспечивает прием команд от внешней системы, настройку параметров измерения и передачу данных на компьютер.

Таблица 2 – Основные параметры линейки детекторов

Параметр	Значение
Количество каналов	448
Длина чувствительной области	2688 мм
Шаг каналов	6 мм
Количество детектирующих модулей	56
Количество детектирующих плат	14
Материал сцинтиллятора	CdWO_4
Питающее напряжение	24 В
Ток потребления	не более 4 А
Рабочая температура активной области	$+6^\circ\text{C}$ с допустимым отклонением порядка $\pm 0.5^\circ\text{C}$

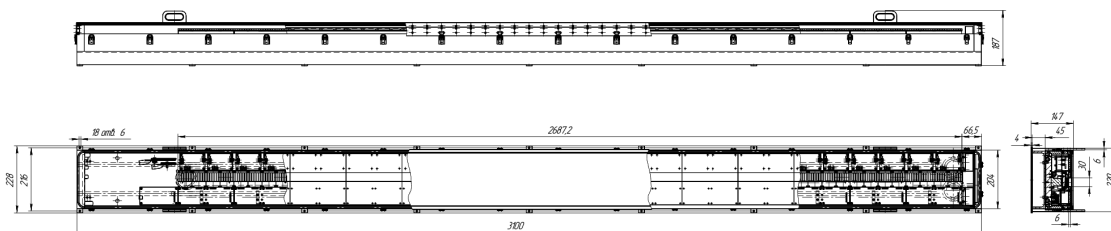


Рисунок 7 – Чертеж линейного детектора профилемера

Стабильность показаний детектора существенно зависит от температуры активной области. Поэтому в конструкции предусмотрены элементы Пельтье, теплообменник, водяной контур охлаждения, внешний чиллер и система осушения воздуха. Отвод тепла от горячей стороны элементов Пельтье осуществляется через теплообменник, интегрированный вдоль линейки.

Поддержание влажности внутри герметичного кожуха реализуется подачей осушенного воздуха, что снижает риск конденсации при охлаждении.

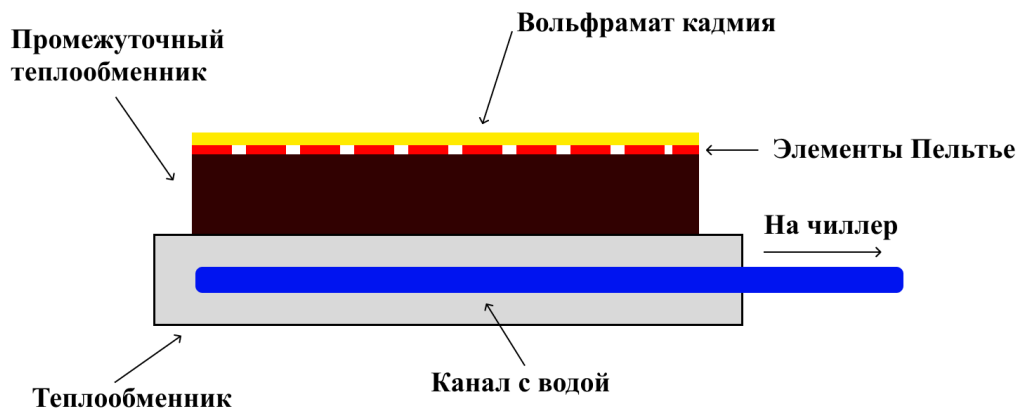


Рисунок 8 – Схема каскадной системы охлаждения линейки детекторов

Для управления линейкой используется специализированное программное обеспечение, работающее по протоколу обмена Ethernet. Оно позволяет задавать время экспозиции, коэффициент усиления, разрядность данных 16 или 20 бит, визуализировать сигнал по каналам в реальном времени и сохранять экспериментальные данные в файл. Отдельный программный модуль отвечает за термостабилизацию и контроль влажности по интерфейсу RS-485.

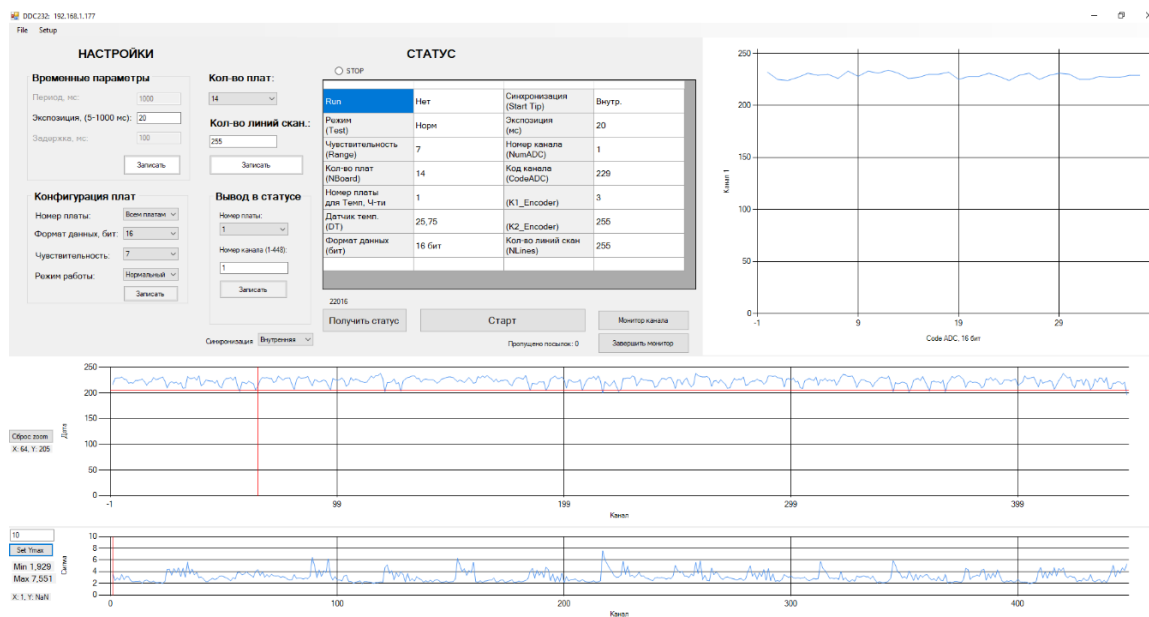


Рисунок 9 – Интерфейс программы управления линейкой детекторов и считывания данных

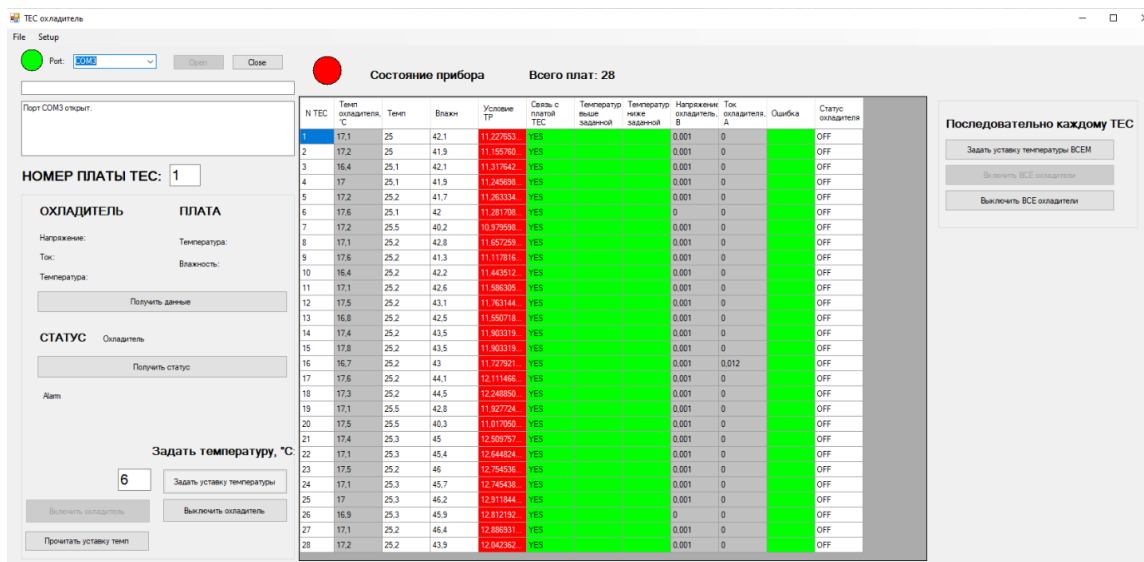


Рисунок 10 – Интерфейс программы управления системой термостабилизации

С точки зрения последующей обработки каждый экспериментальный файл содержит временную последовательность сигналов по каналам. Для статических измерений анализируются средние значения и RMS по каждому каналу. Для внешней калибровки дополнительно требуется восстановить временное окно, в течение которого калибратор находится над соответствующим каналом, и рассчитать интегральный сигнал EXT.

2.3 Описание системы источников рентгеновского излучения

Система источников рентгеновского излучения включает две рентгеновские трубки COMET MXR 225 02 FB и два высоковольтных генератора Gulmay CP225 1/28. Номинальное анодное напряжение источников составляет до 225 кВ, номинальная мощность на аноде — до 2 кВт. Трубки установлены в верхнем плече стенда и соединены с генераторами высоковольтными кабелями.

Применение рентгеновских трубок вместо радиоизотопных источников позволяет регулировать энергию и интенсивность излучения за счет изменения анодного напряжения и тока. Это повышает гибкость настройки профилемера под различные диапазоны толщин проката, хотя одновременно требует более сложной системы высоковольтного питания, охлаждения,

блокировок и радиационной защиты [17, 18, 19, 20].

Для формирования требуемого пучка от каждой трубки используется система из двух коллиматоров: первичного и вторичного. Коллиматоры ограничивают ширину пучка, уменьшают паразитную засветку и позволяют адаптировать геометрию к измерительной задаче. Ширина щели вторичного коллиматора регулируется перемещением свинцовых пластин, а изменение ширины щели влияет на интенсивность сигнала и форму трансмиссии.



Рисунок 11 – Фотография вторичного коллиматора с регулируемой щелью

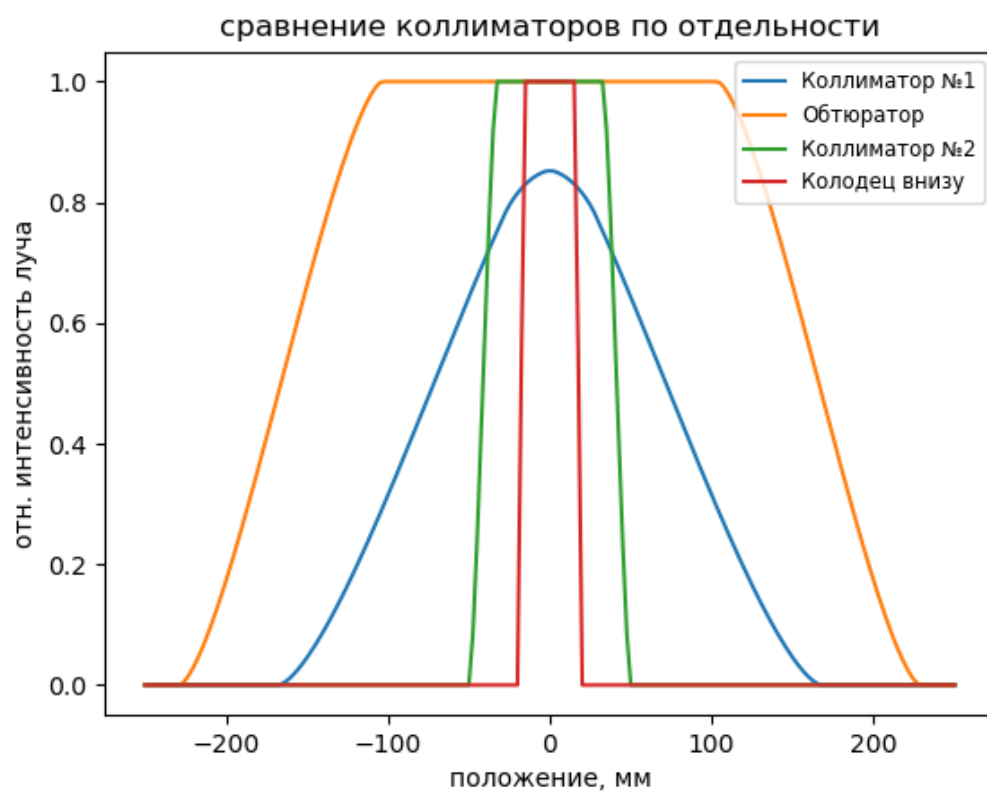


Рисунок 12 – Зависимость интенсивности излучения и ширины пучка от положения коллиматоров



Рисунок 13 – Щель регулируемого коллиматора

Важным узлом является obtюратор, обеспечивающий попеременное перекрытие потоков от двух источников. При скорости вращения 3000 об/мин четверть оборота соответствует 5 мс. С учетом фронтов прохождения шторки через пучок оптимальное время экспозиции на стенде было выбрано равным 3 мс. В экспериментах по тестированию внешней синхронизации варьировались время экспозиции T_{exp} и задержка T_{del} , задающая нулевое положение вала obtюратора. Для экспозиций больше 3 мс наблюдались состояния, при которых окно интегрирования сигнала захватывало край obtюратора, что приводило к росту флуктуаций сигналов S1 или S2. Поэтому рабочим режимом был выбран $T_{\text{exp}} = 3$ мс и задержка порядка 105–110 импульсов энкодера сервопривода.

Работа двух источников требует согласования нескольких подсистем: высоковольтного питания, охлаждения, коллимации, радиационной защиты,

обтюратора, синхронизации считывания и программной обработки. Ошибка в любой из этих подсистем проявляется в профиле сигнала: возникают провалы на профилях среднего, рост стандартных отклонений, сдвиг областей засветки или нарушение повторяемости форм трансмиссий. Поэтому программный комплекс должен позволять быстро строить профили S1 и S2, сравнивать данные разных режимов и выявлять аномальные каналы.

3 Экспериментальное исследование работоспособности стенда

3.1 Отладка и тестирование детектирующей системы

Первым этапом отладки детектирующей системы стало исследование темновых токов, то есть сигналов линейки в отсутствие рентгеновского излучения. Были проведены измерения с экспозициями 4, 10, 50, 200 и 1000 мс, режимами усиления 0–7 (где 0 – максимум, 7 – минимум) и разрядностью АЦП 16 или 20 бит при рабочей температуре около $+6^{\circ}\text{C}$. Целью анализа было определить режимы, в которых отсутствуют «пустые» каналы, скачки среднего уровня и сильная нестабильность.

На высоких уровнях чувствительности, соответствующих меньшим численным значениям параметра, наблюдалось нестабильное поведение: отдельные каналы возвращали нулевые или резко изменяющиеся значения. В результате для разных экспозиций были определены диапазоны чувствительности, пригодные для устойчивой работы. Эти диапазоны приведены в таблице 3.

time	S1_meas[0]	S1_meas[1]	S1_meas[2]	S1_meas[3]	S1_meas[4]	S1_meas[5]	S1_meas[6]	S1_meas[7]	S1_meas[8]	S1_meas[9]	S1_meas[10]
0	0	105	69	129	24	194	73	0	0	96	120
2.003	0	52	165	44	83	96	81	0	0	86	42
4.006	0	140	130	43	130	100	115	0	0	80	120
5.994	0	104	59	64	143	124	19	0	0	42	155
7.999	0	169	104	71	135	147	62	0	0	94	95
10.003	0	149	112	15	184	46	145	0	0	164	100
12.009	0	118	156	98	97	66	165	0	0	127	55
14.001	0	139	97	193	22	145	144	0	0	73	127
16.007	0	128	118	95	80	186	61	0	0	153	113
17.998	0	86	103	85	56	160	122	0	0	7	101
20.005	0	85	125	129	104	112	165	0	0	172	86
21.997	0	74	51	157	75	152	71	0	0	2	120
23.998	0	105	120	123	37	165	0	0	0	78	58
26.004	0	118	118	94	132	96	105	0	0	77	110
27.995	0	140	172	12	160	103	127	0	0	60	100
29.999	0	112	68	112	160	93	112	0	0	118	56
32.005	0	138	109	85	128	138	118	0	0	108	73
34.008	0	73	96	152	73	139	50	0	0	100	112
36.006	0	69	121	15	162	87	76	0	0	79	88
38	0	107	73	94	148	139	120	0	0	113	39
40.005	0	90	189	62	156	58	111	0	0	84	173
41.997	0	158	54	76	73	156	125	0	0	144	94
44.002	0	74	84	95	116	144	43	0	0	87	117
46.007	0	52	151	63	113	144	52	0	0	168	12
48.004	0	184	7	164	76	65	148	0	0	62	125
49.995	0	97	87	115	98	147	82	0	0	86	91
51.999	0	84	119	48	116	81	166	0	0	21	132
54.001	0	90	93	107	76	120	106	0	0	115	150
55.995	0	130	127	44	161	63	188	0	0	76	125
58.005	0	27	160	124	96	128	84	0	0	36	137
60.008	0	116	64	85	89	153	101	0	0	104	87
62.003	0	124	77	150	83	117	84	0	0	60	94
64.009	0	22	145	103	120	72	171	0	0	58	57
66	0	168	29	154	71	126	73	0	0	57	140
67.996	0	131	86	100	92	108	75	0	0	105	21
70.002	0	128	96	138	111	47	0	0	0	112	45
72.009	0	128	101	135	79	80	163	0	0	92	97

Рисунок 14 – Пример нестабильной работы линейки при экспозиции 1000 мс, чувствительности 0 и разрядности 16 бит

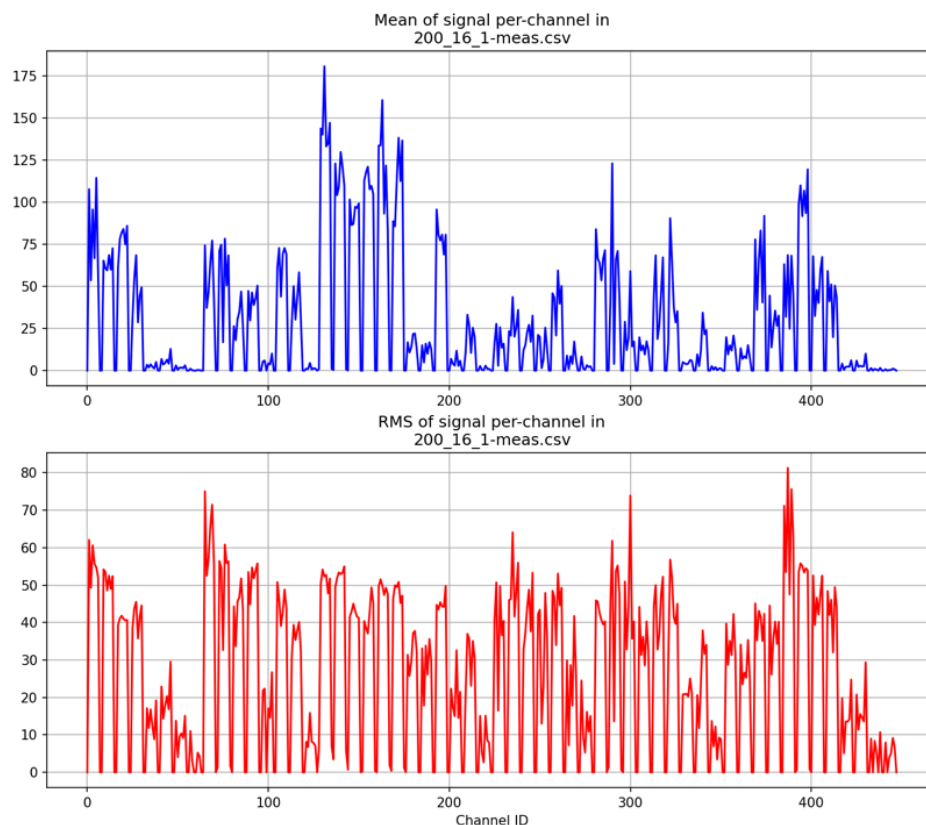


Рисунок 15 – Визуализация скачков среднего сигнала в нестабильном режиме работы линейки

Таблица 3 – Диапазоны чувствительности для стабильной работы линейки при температуре $+6^{\circ}\text{C}$

Экспозиция	Чувствительность для стабильной работы
4 мс	2–7
10 мс	2–7
50 мс	3–7
200 мс	4–7
1000 мс	5–7

Для каждого режима рассчитывались средние значения сигналов по каналам и стандартные отклонения. В 16-битном режиме средний темновой сигнал в устойчивых режимах находился приблизительно в диапазоне 220–240 отсчетов, а среднее RMS уменьшалось при снижении чувствительности. Наиболее понятным и воспроизводимым оказался режим с экспозицией 4 мс: при нем отчетливо проявлялась периодическая структура свойств

фотоприемников, а температурное влияние было относительно слабым. Для дальнейшей работы с линейкой рекомендованы экспозиции не более 50 мс и чувствительности 4–7.

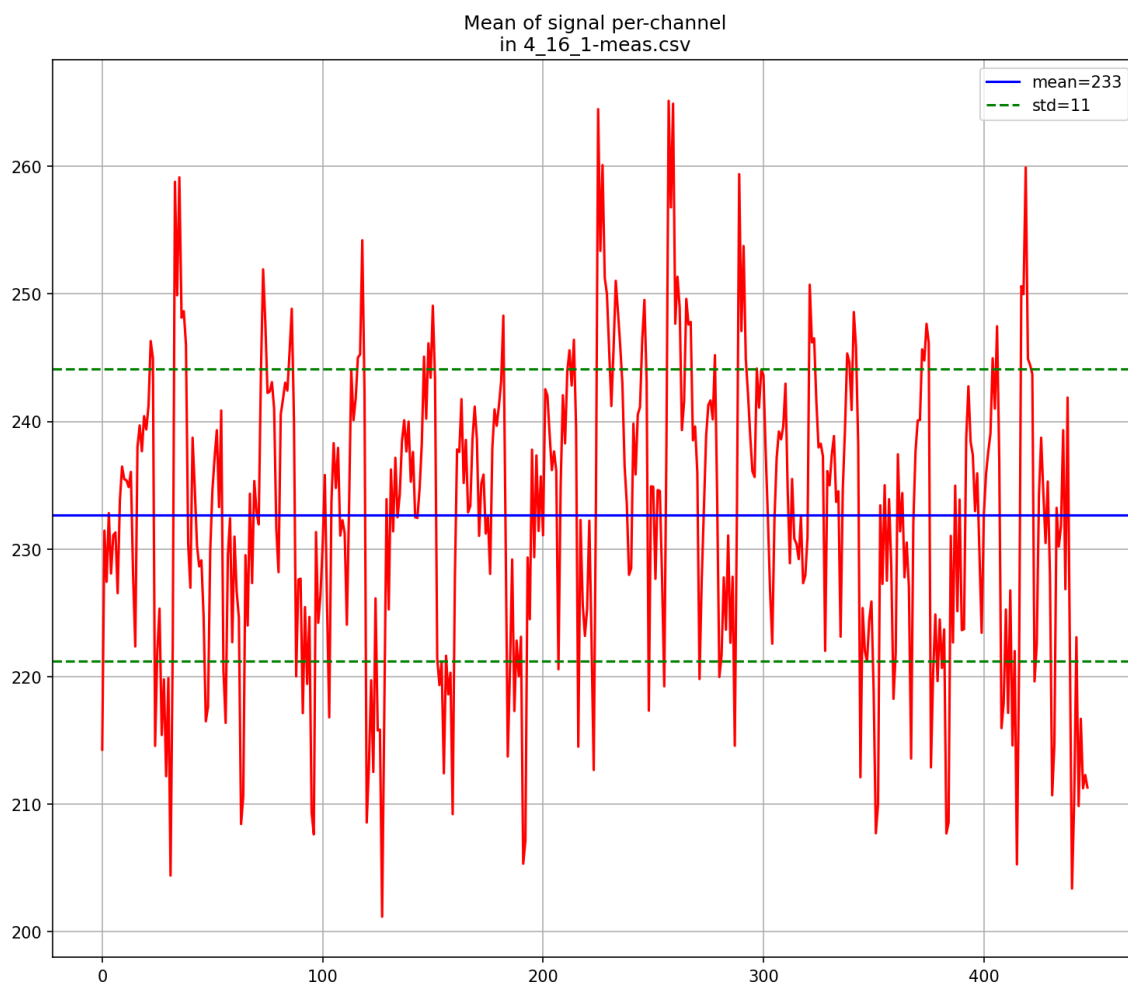


Рисунок 16 – Зависимость средних значений темнового сигнала от номера канала

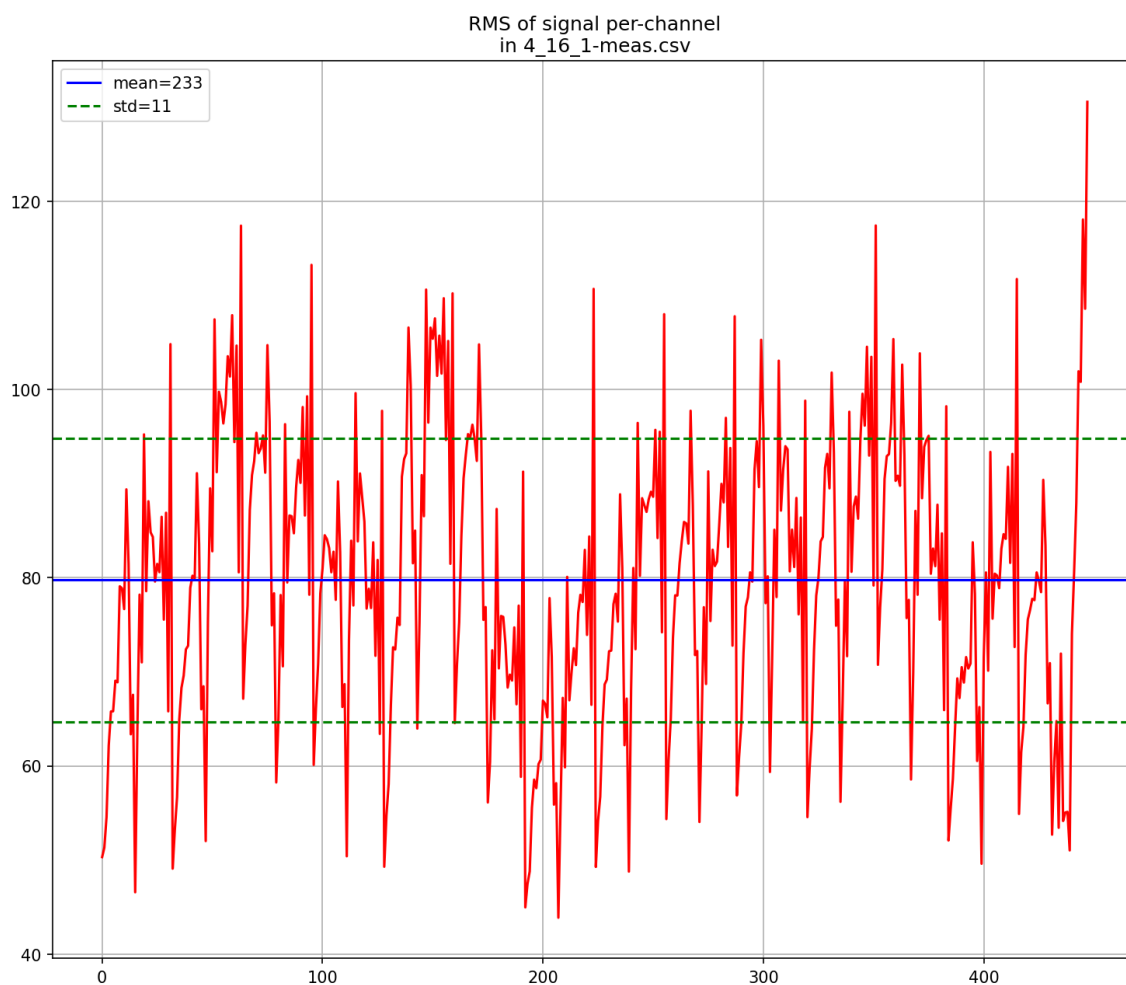


Рисунок 17 – Зависимость стандартного отклонения темнового сигнала от номера канала

Отдельно исследовалась температурная зависимость шумовых характеристик. В материалах испытаний показано, что при увеличении температуры растет среднеквадратичное отклонение сигнала. Для чувствительностей 4–7 были рассчитаны температурные коэффициенты шума; среднее значение составило около 3.4 RMS/°C. Это подтверждает необходимость поддержания температуры активной области детекторов вблизи +6°C и обосновывает применение системы активного охлаждения.

Dependency of mean on temp

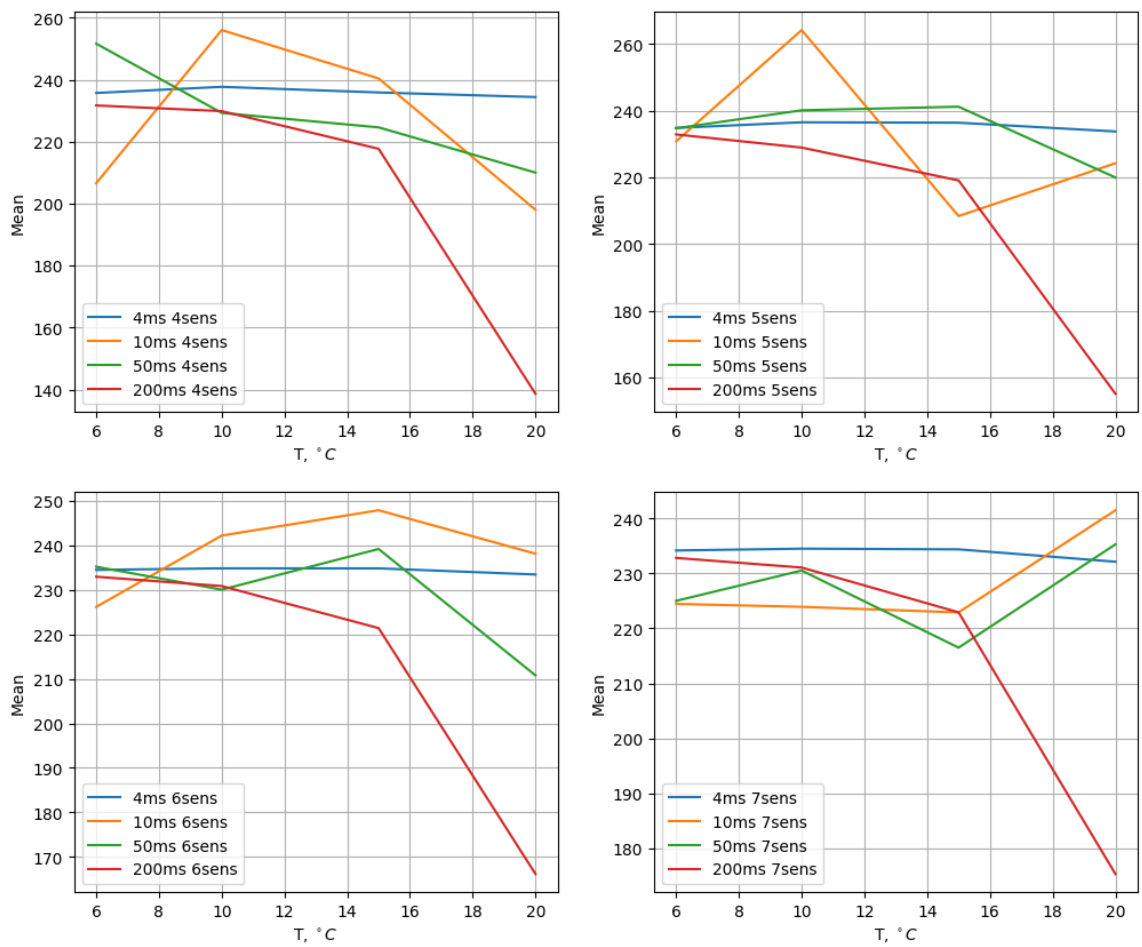


Рисунок 18 – Температурная зависимость усредненных сигналов линейки для чувствительностей 4–7

Dependency of RMS on temp

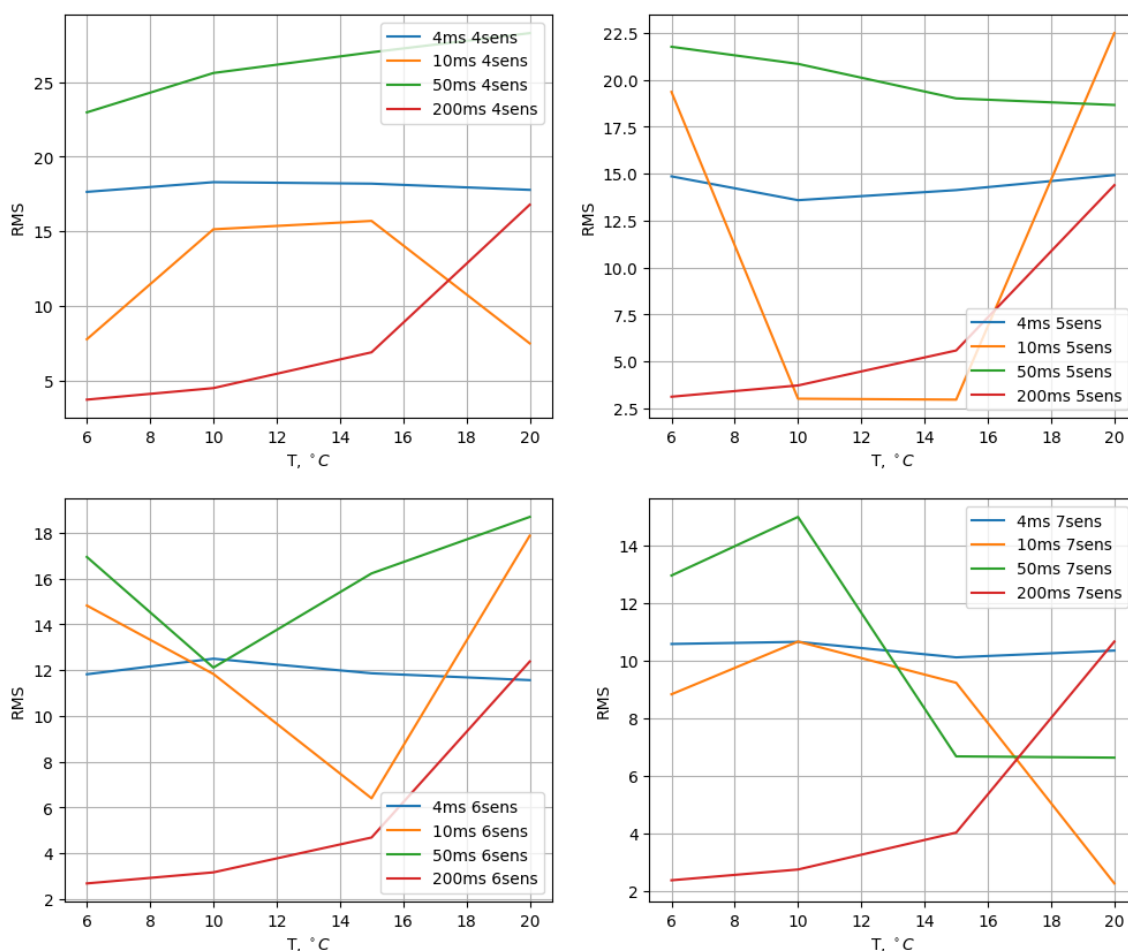


Рисунок 19 – Температурная зависимость усредненных RMS линейки для чувствительностей 4–7

В процессе построения трансмиссий были выявлены аномальные области: каналы 32–39, 207–255 и 415–422 демонстрировали характерные провалы относительно общего уровня. После замены центральных детекторных сборок в диапазоне 207–255 форма трансмиссии в этих каналах приблизилась к общему уровню. Также отмечались провал в районе канала 288 и повторяющиеся особенности на стыках плат, что указывает на необходимость дальнейшего контроля состояния детекторных сборок и механической геометрии нижнего плеча.

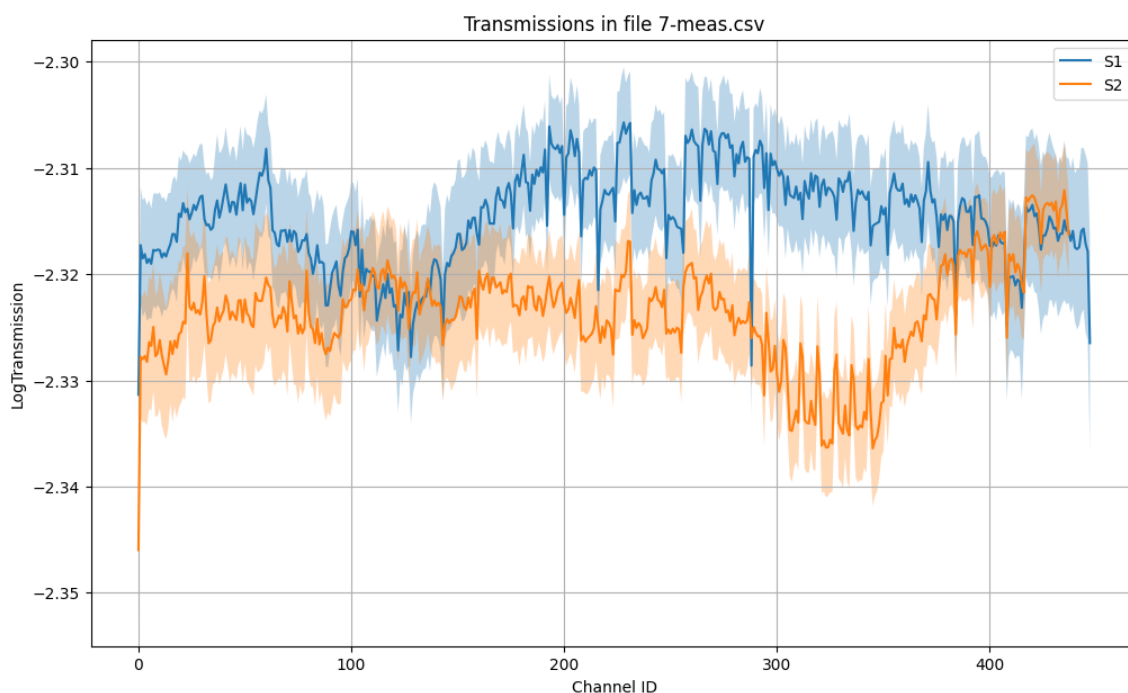


Рисунок 20 – Профиль трансмиссии для эталона толщиной 7 мм до замены центральных плат

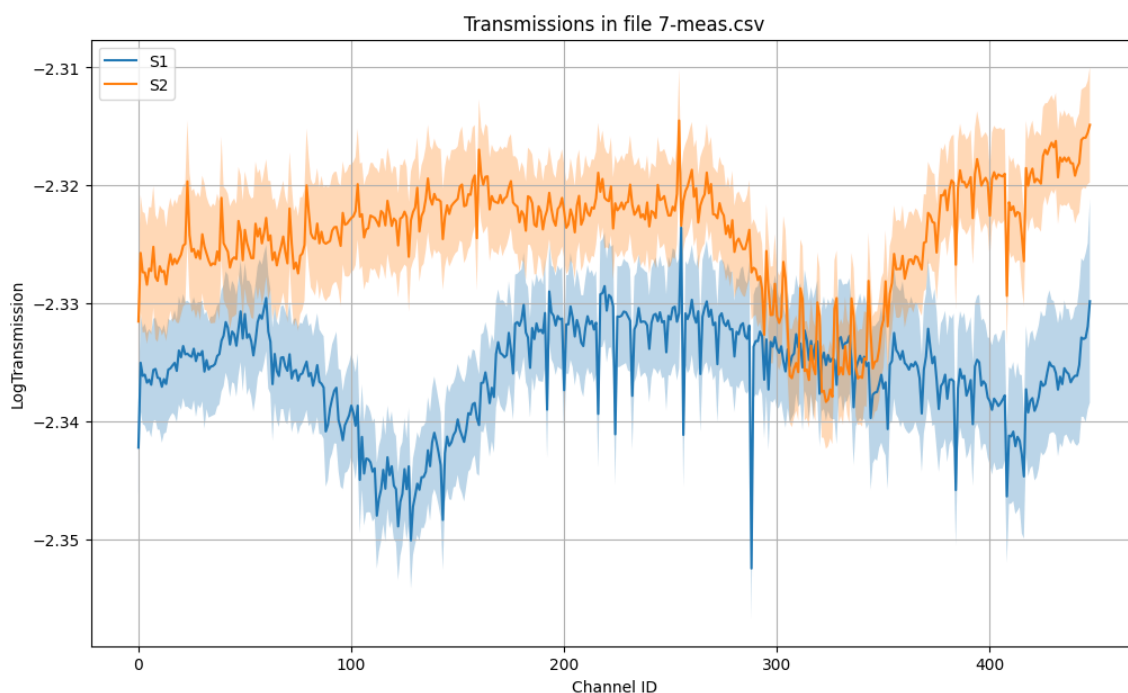


Рисунок 21 – Профиль трансмиссии для эталона толщиной 7 мм после замены центральных плат

При непрерывном наборе данных была обнаружена возможность потери связи линейки с ПК. Причина связана с высокой частотой опроса около 5 мс для используемого протокола Modbus TCP/IP, работающего близко

к пределу пропускной способности. Это обстоятельство также учитывалось при проектировании программного комплекса: обработчик данных должен корректно диагностировать пропуски, выбросы и неполные временные развертки.

3.2 Тестирование источников рентгеновского излучения

Тестирование источников рентгеновского излучения выполнялось в составе полной измерительной системы: рентгеновские трубки, высоковольтные генераторы, коллиматоры, обтюратор, линейка детекторов и система синхронизации. Основное внимание уделялось стабильности сигналов S1 и S2, подбору режима внешней синхронизации, влиянию коллиматоров и воспроизводимости трансмиссий.

Эксперименты с внешней синхронизацией показали, что при времени экспозиции более 3 мс окно считывания может захватывать край обтюратора. В результате один из сигналов демонстрирует повышенный RMS, поскольку часть экспозиции приходится на переходное состояние пучка. Для $T_{\text{exp}} = 3$ мс были найдены допустимые значения задержки, при которых RMS сигналов S1 и S2 находится в приемлемом диапазоне. Этот режим стал базовым для дальнейших измерений.

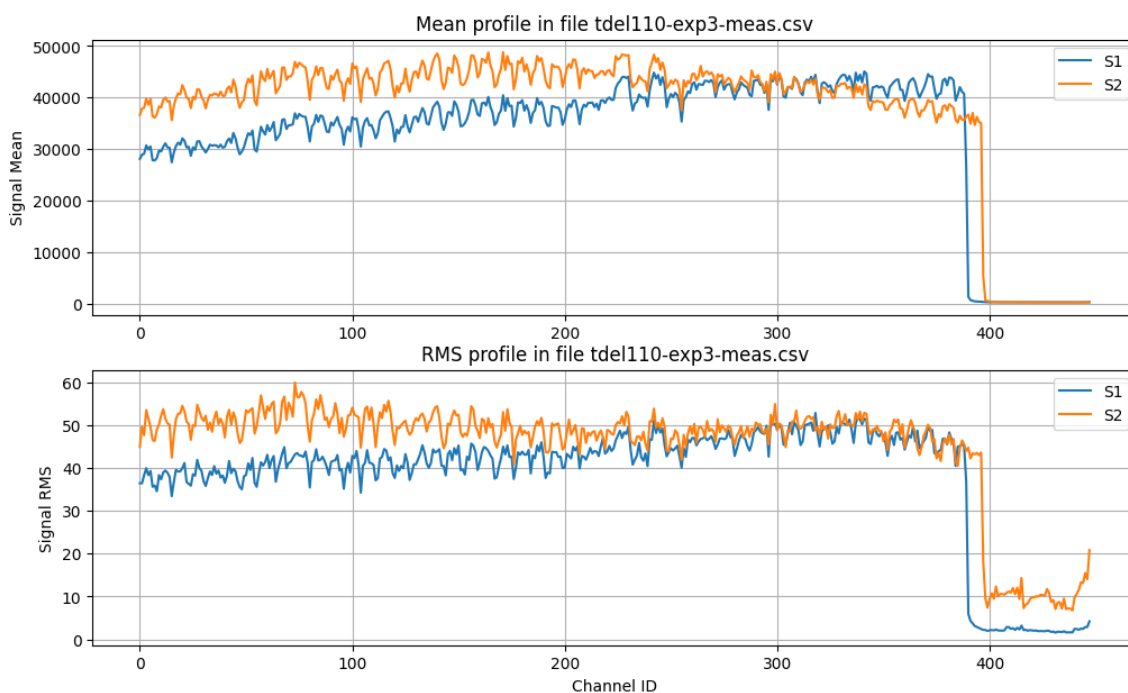


Рисунок 22 – Пример устойчивого синхронного сигнала при $T_{\text{del}} = 110$ и $T_{\text{exp}} = 3$ мс

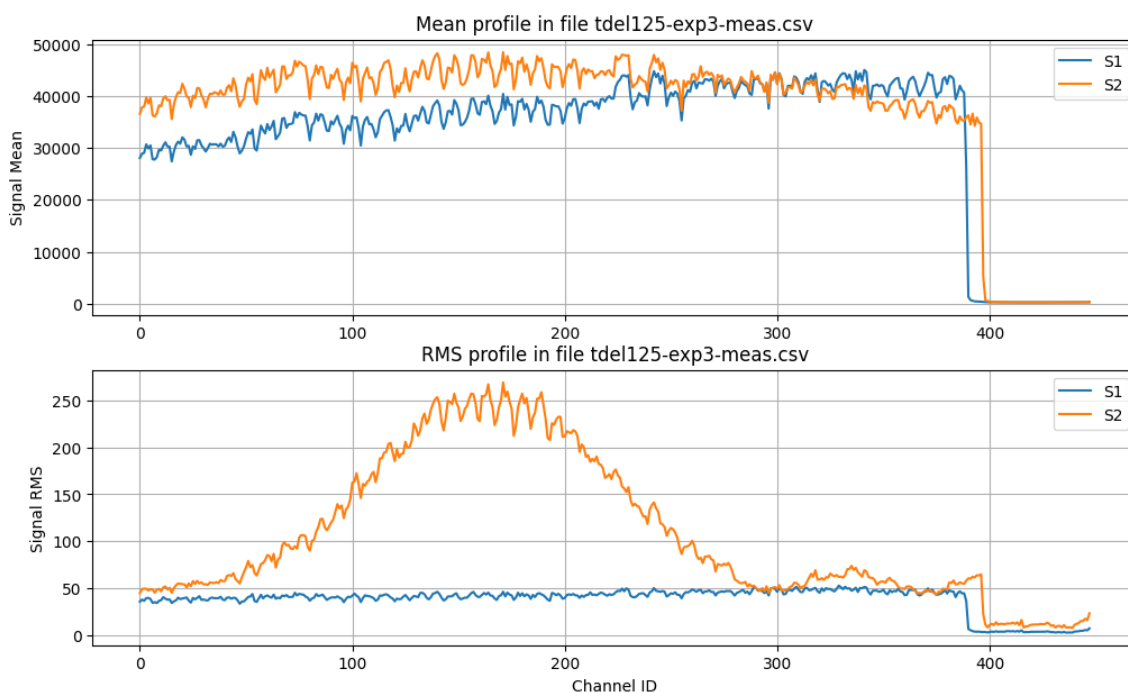


Рисунок 23 – Пример повышенного RMS при попадании рентгеновского пучка на край обтюратора

При анализе сигналов полной засветки и трансмиссий были построены профили по каналам линейки. Для проверки влияния коллиматоров изменялась ширина выходной щели, что приводило к ожидаемому снижению интенсивности при сужении пучка. Сравнение режимов чувствительности показало, что форма трансмиссий сохраняется, а смещение на два уровня чувствительности дает существенный прирост сигнала (+40%). Это важно для выбора режима, обеспечивающего достаточный динамический диапазон без насыщения каналов.

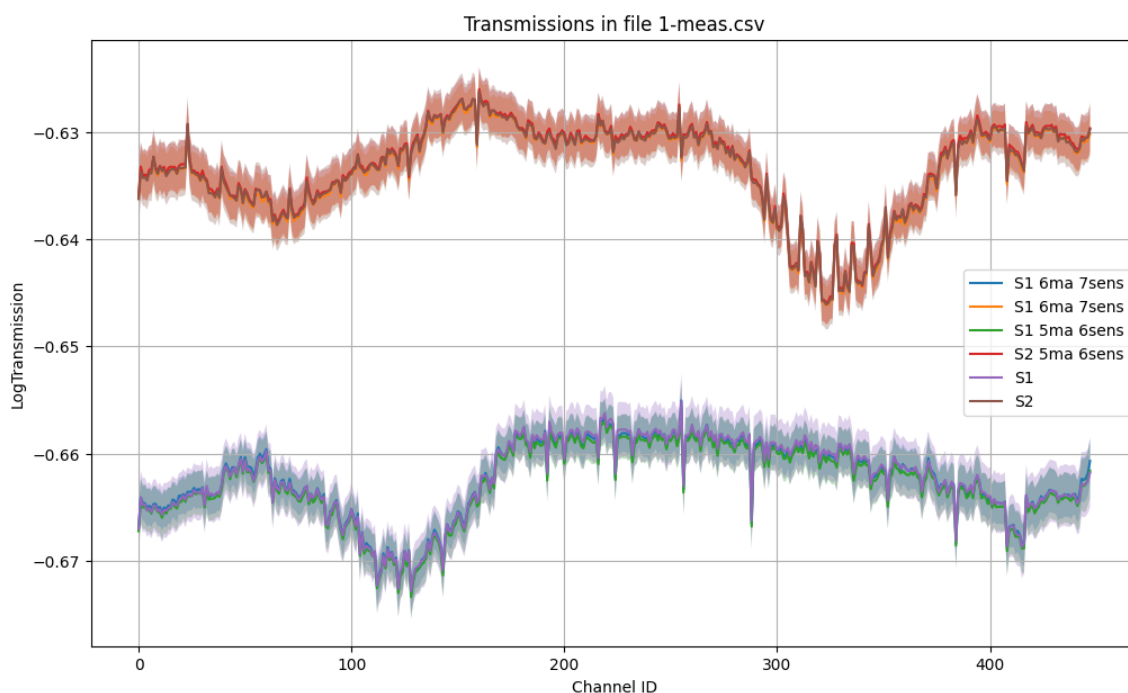


Рисунок 24 – Сравнение формы трансмиссий для различных режимов тока и чувствительности

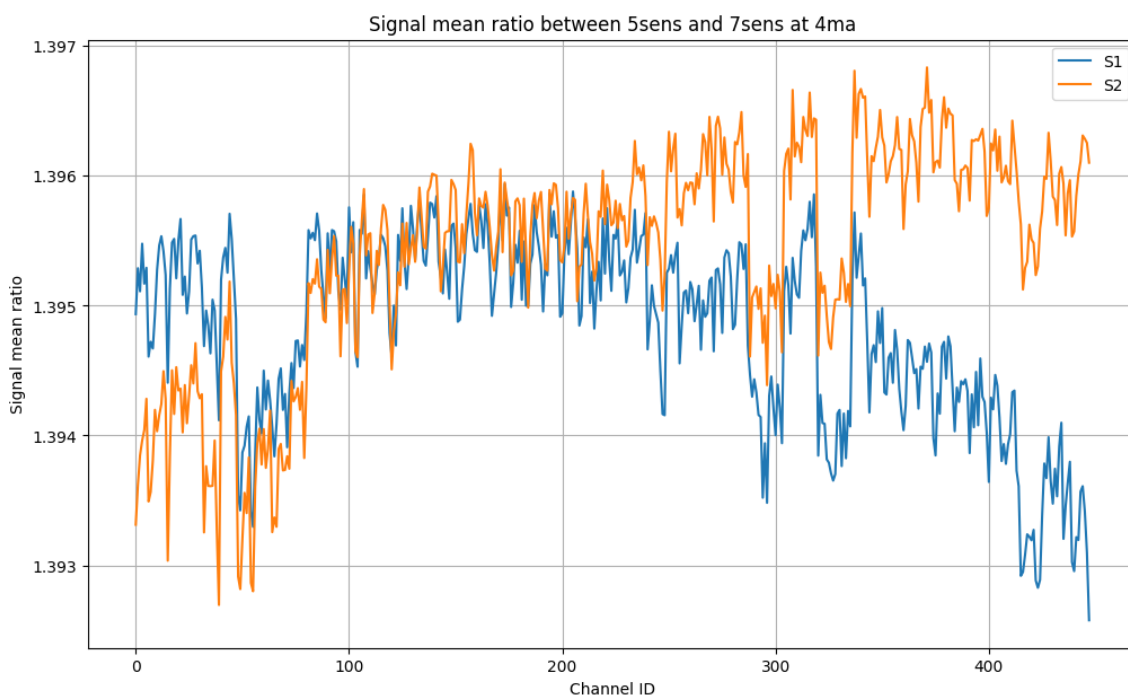


Рисунок 25 – Отношение средних сигналов между разными уровнями чувствительности

В некоторых режимах отмечались периодические компоненты во временной развертке сигнала, включая частоты порядка 1 Гц и более высокие гармоники. Такие особенности могут быть связаны как с работой источни-

ков и обтюратора, так и с электроникой считывания. Для задач калибровки эти колебания не являются непреодолимым ограничением, но требуют учета при выборе ширины временного окна и расчете RMS.

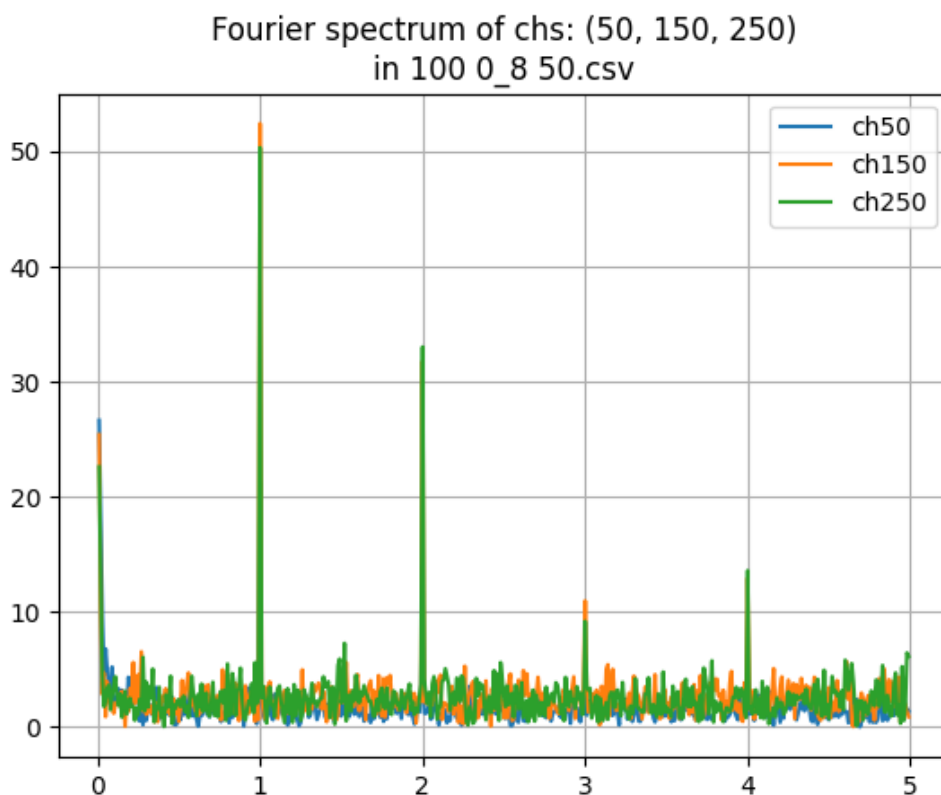


Рисунок 26 – Фурье-спектры сигналов в каналах 50, 150 и 250 при экспозиции 50 мс, напряжении 100 кВ и токе 0.8 мА

Построение трансмиссий с модифицированной геометрией нижнего плеча, включающей титановую крышку, показало появление характерных областей «прогаров» на профиле. Это означает, что защитные и фильтрующие элементы конструкции заметно влияют на форму регистрируемой трансмиссии. Поэтому для поиска аномальных каналов целесообразно использовать измерения без дополнительного кожуха, а для финальной калибровки — учитывать реальную промышленную геометрию.

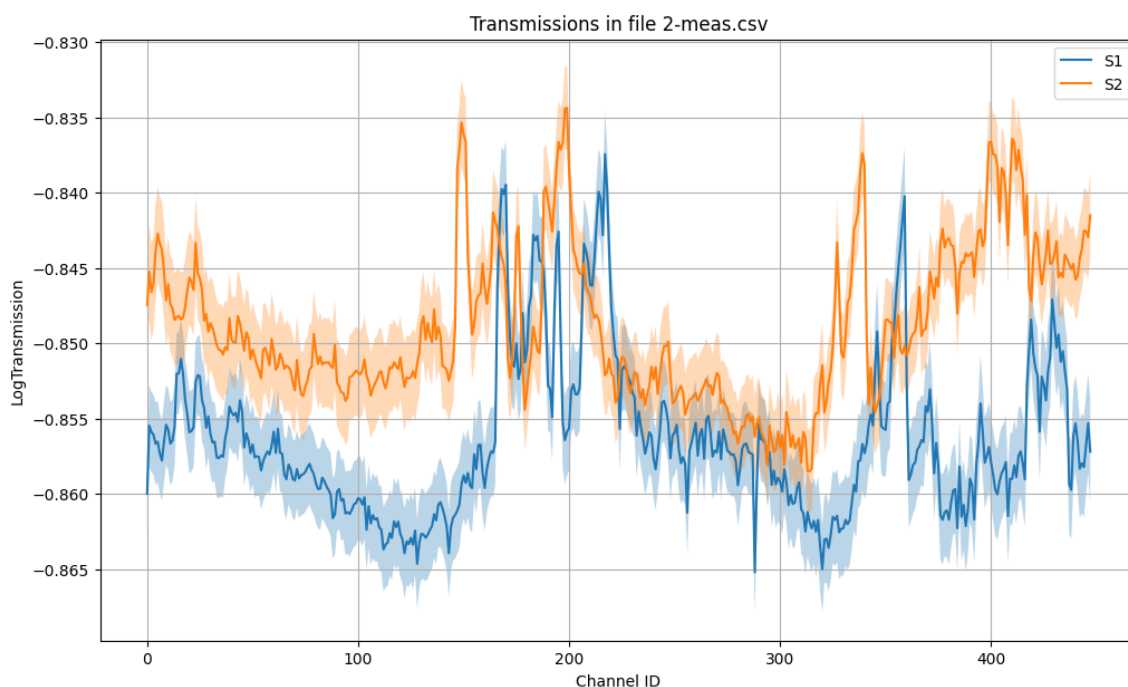


Рисунок 27 – Форма трансмиссии при установке титановой крышки нижнего плеча

3.3 Исследование процессов калибровки профилемера

Для восстановления толщины проката профилемеру необходимы опорные состояния INF, ZERO и REF. Сигнал INF соответствует темновому уровню или полному ослаблению излучения. Сигнал ZERO соответствует максимальному сигналу без калибровочного образца. Сигналы REF формируются на эталонных образцах известной толщины и используются для построения калибровочных кривых.

В работе исследовались две схемы калибровки: внутренняя и внешняя. Внутренняя калибровка выполняется с помощью магазина стандартов, расположенного под источниками. Эталонный образец выдвигается в пучок, целиком перекрывая поток излучения в заданной геометрии. Такая схема быстра, но чувствительна к механике выдвижения стандартов и отличается по геометрии от реального прохождения излучения через прокат.

Внешняя калибровка «проездом» выполняется с помощью калибратора-тележки, который перемещает эталон вдоль всей линейки. Метод основан на двух предположениях: скорость тележки постоянна, а линейка однородна по длине. Тогда положение центра временного окна, соответствующего прохождению тележки над каналом, должно линейно

зависеть от номера канала, а ширины временных интервалов должны быть приблизительно постоянными.

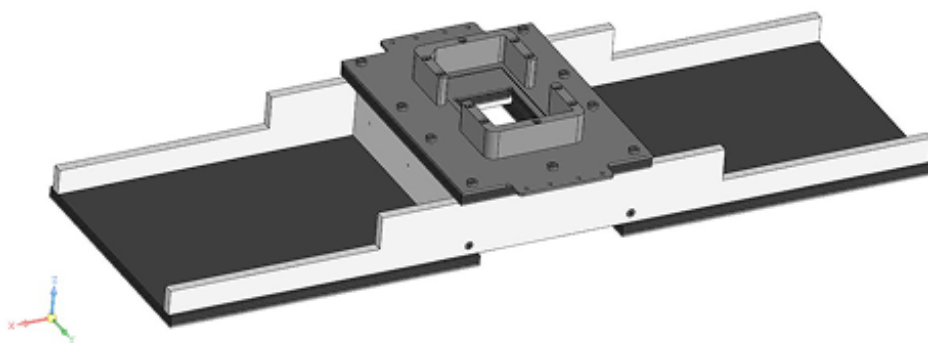


Рисунок 28 – Модель калибратора-тележки для внешней калибровки «проездом»



Рисунок 29 – Фотография калибратора-тележки на экспериментальном стенде

По временной развертке каждого канала определялись внешнее окно нахождения тележки над каналом и внутреннее окно нахождения отверстия тележки над каналом. Сначала данные переводились к относительному масштабу от 0 до 1, затем края интервалов искались по порогам. Для внешнего

интервала использовался пороговый множитель 0.5, для внутреннего — 0.2, а отступ для поиска внутреннего окна составлял 375 фреймов, что соответствует примерно 3 с.

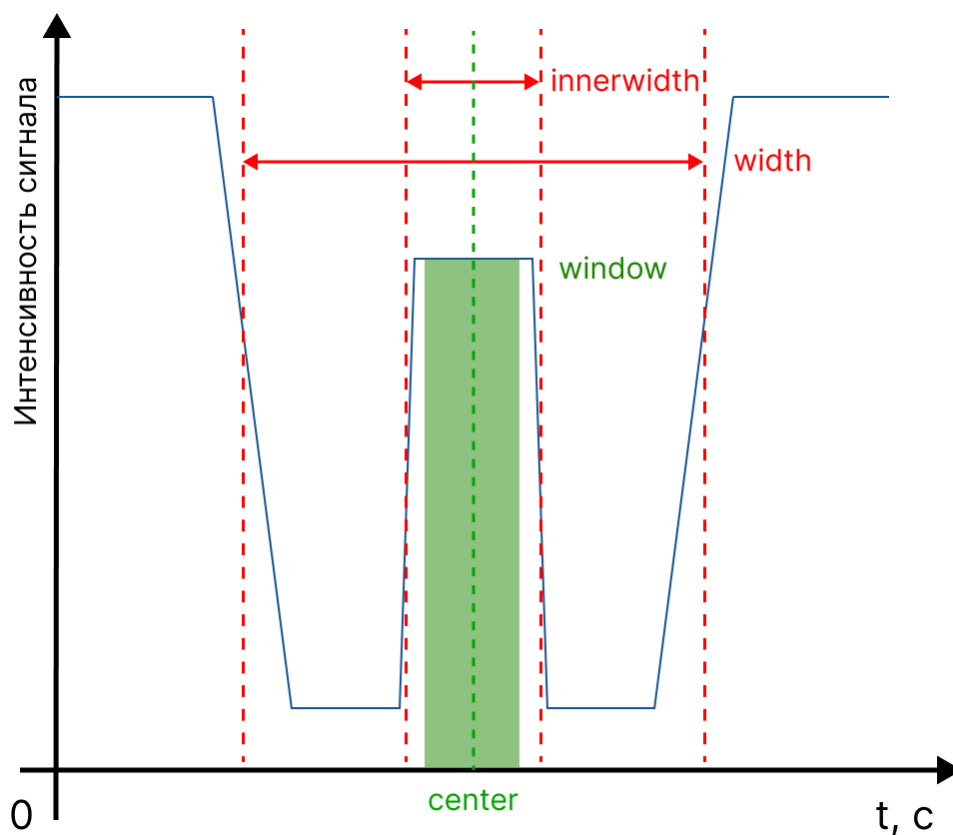


Рисунок 30 – Модельная форма отклика детектора при прохождении калибратора

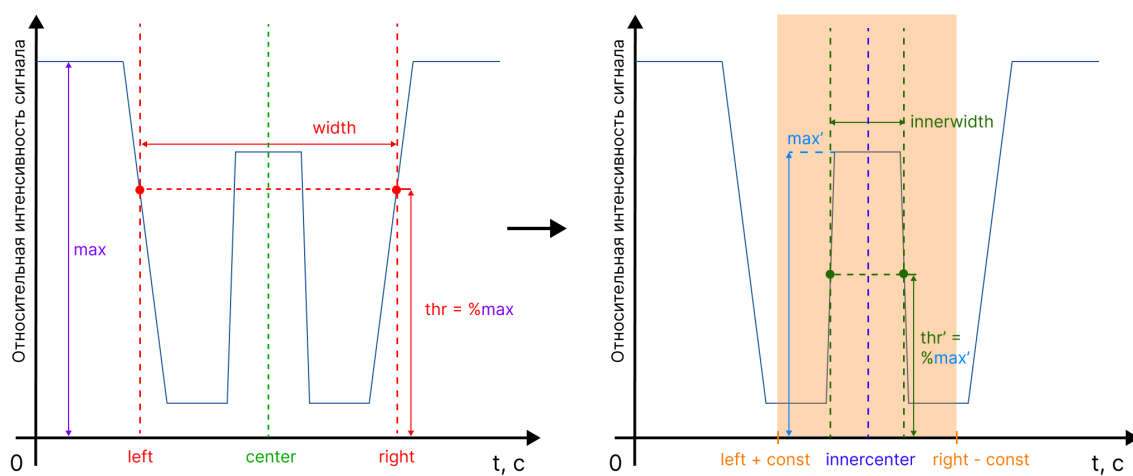


Рисунок 31 – Алгоритм поиска временных интервалов нахождения тележки на временной развертке сигнала

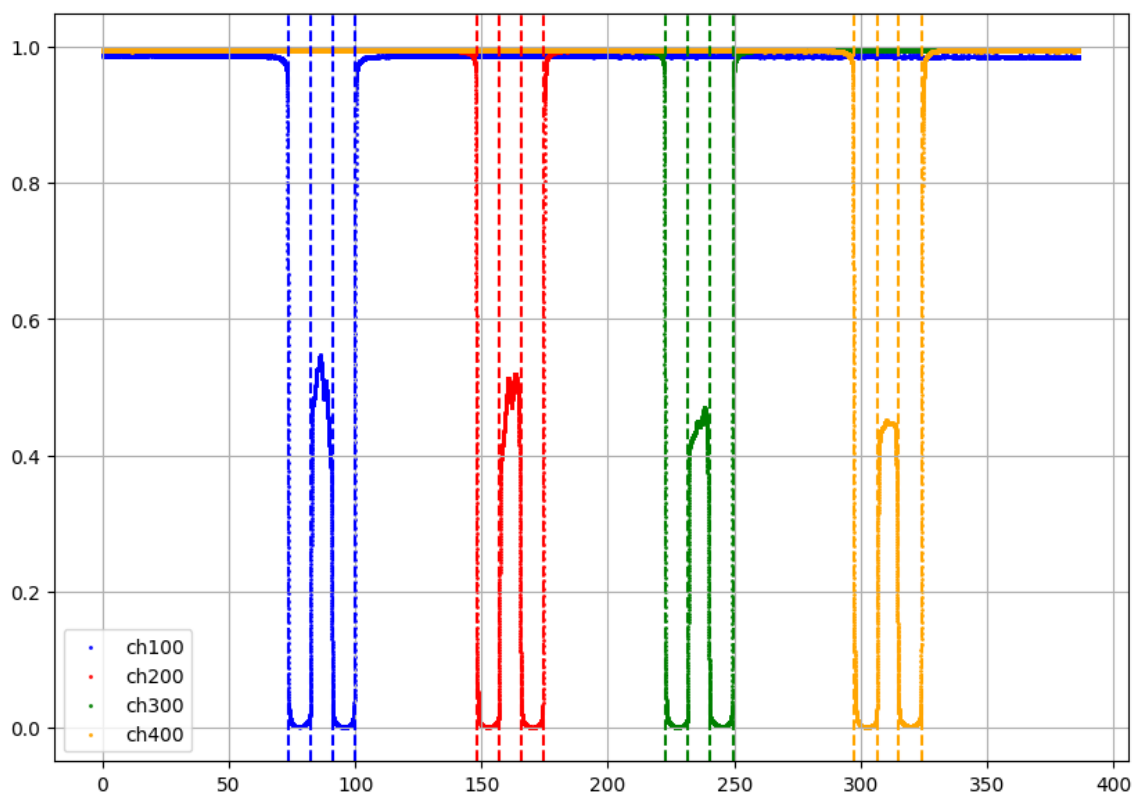


Рисунок 32 – Временная развертка сигналов в выбранных каналах для эталона 1 мм

Результаты определения ширин временных окон приведены в таблице 4. Постоянство ширин подтверждает применимость модели равномерного движения тележки. При этом для толстых эталонов, особенно 16 мм, определение внутреннего окна становится менее надежным из-за уменьшения амплитуды сигнала.

Таблица 4 – Параметры временных окон внешней калибровки «проездом»

Параметр	Значение	Интерпретация
Ширина внешнего окна	(26.65 ± 0.04) с	Время нахождения тележки над каналом
Ширина внутреннего окна	(8.43 ± 0.05) с	Время нахождения окна тележки над каналом
Угловой коэффициент центра	0.745 с/канал	Скорость прохождения каналов во времени
Свободный член центра	11.927 с	Начальное смещение линейной аппроксимации
Точность центра	около 0.1 с	Эквивалентно примерно 0.7 мм перемещения

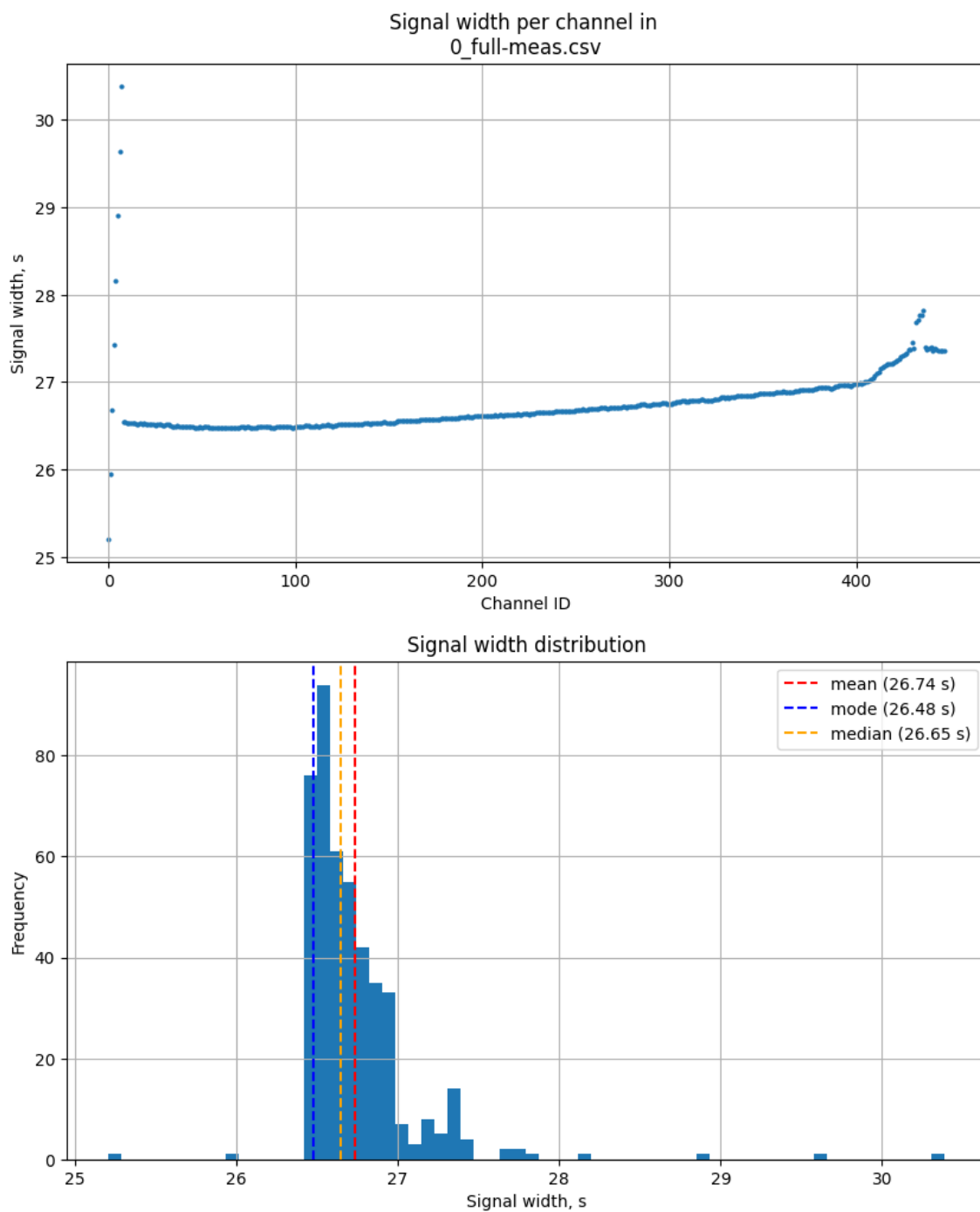


Рисунок 33 – Ширина внешнего окна тележки и распределение фреймов для эталона 0 мм

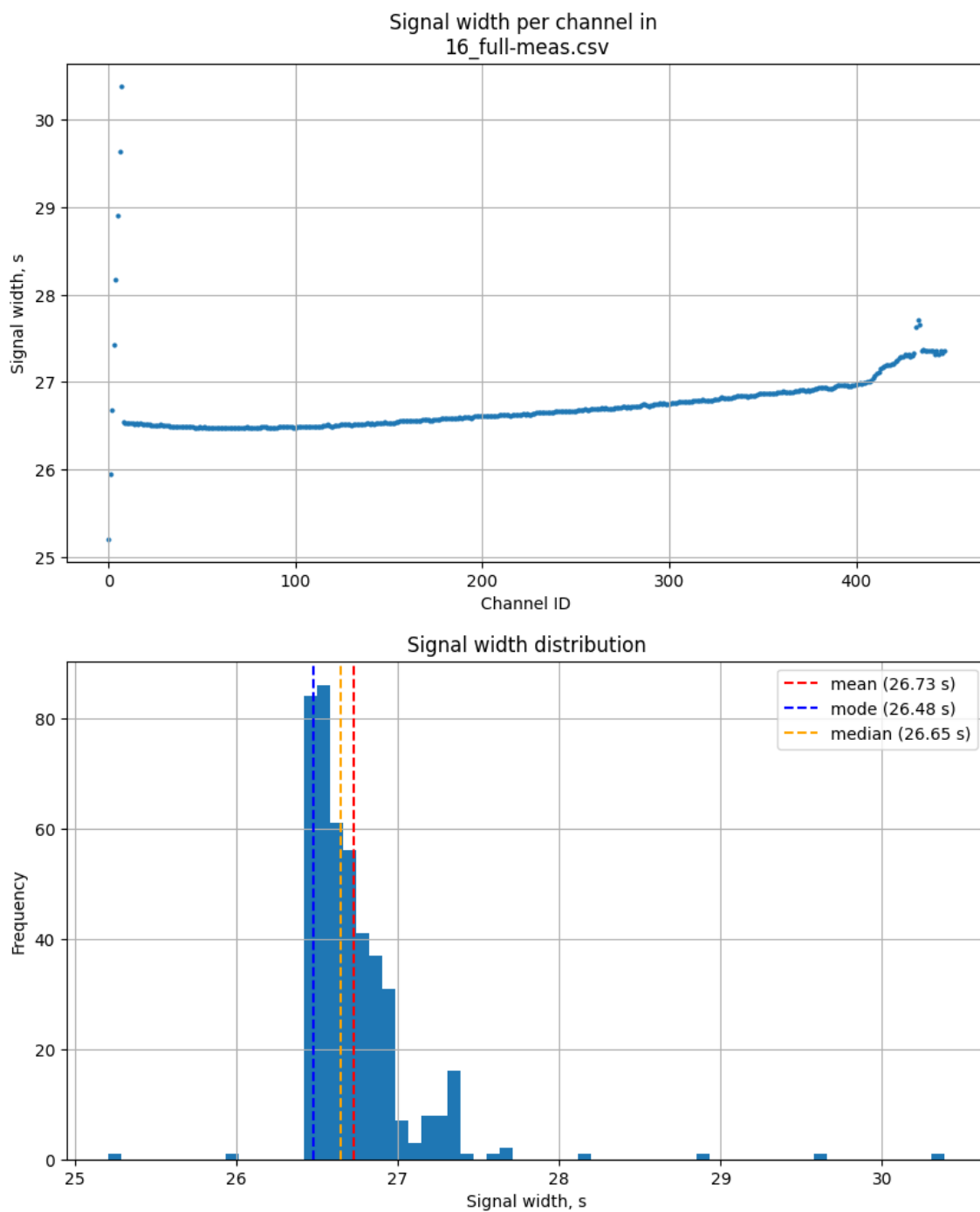


Рисунок 34 – Ширина внешнего окна тележки и распределение фреймов для эталона 16 мм

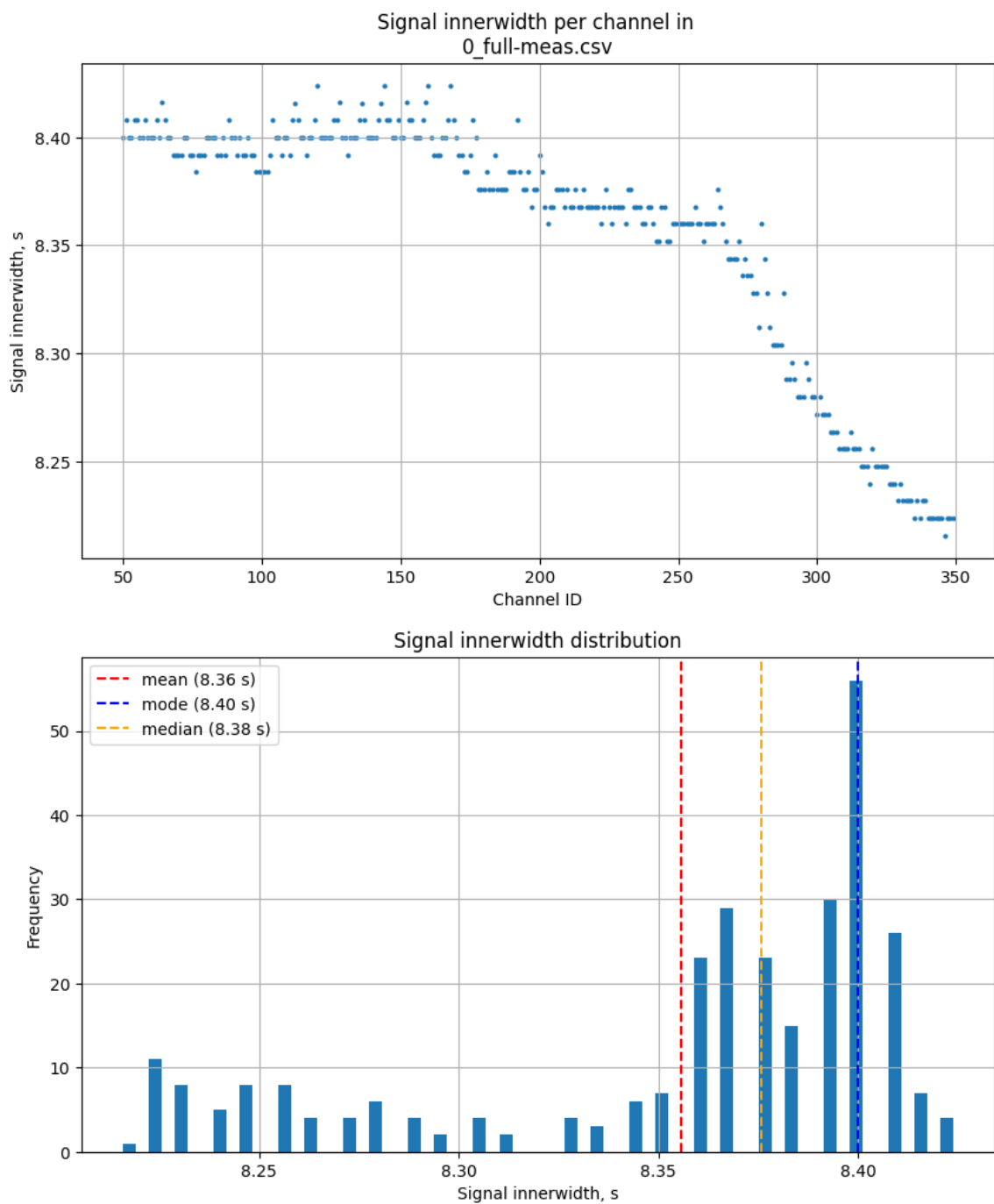


Рисунок 35 – Ширина внутреннего окна тележки и распределение фреймов для эталона 0 мм

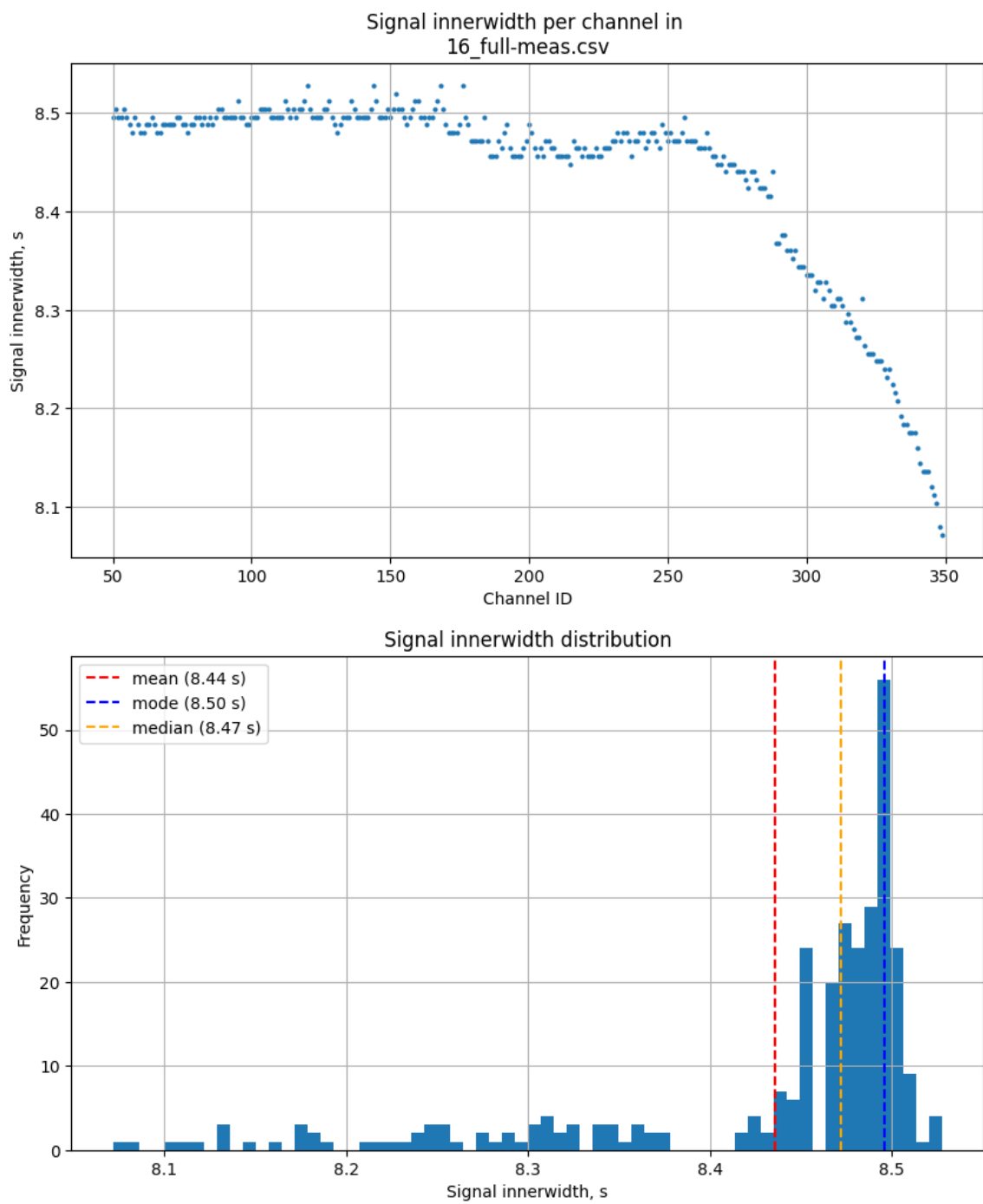


Рисунок 36 – Ширина внутреннего окна тележки и распределение фреймов для эталона 16 мм

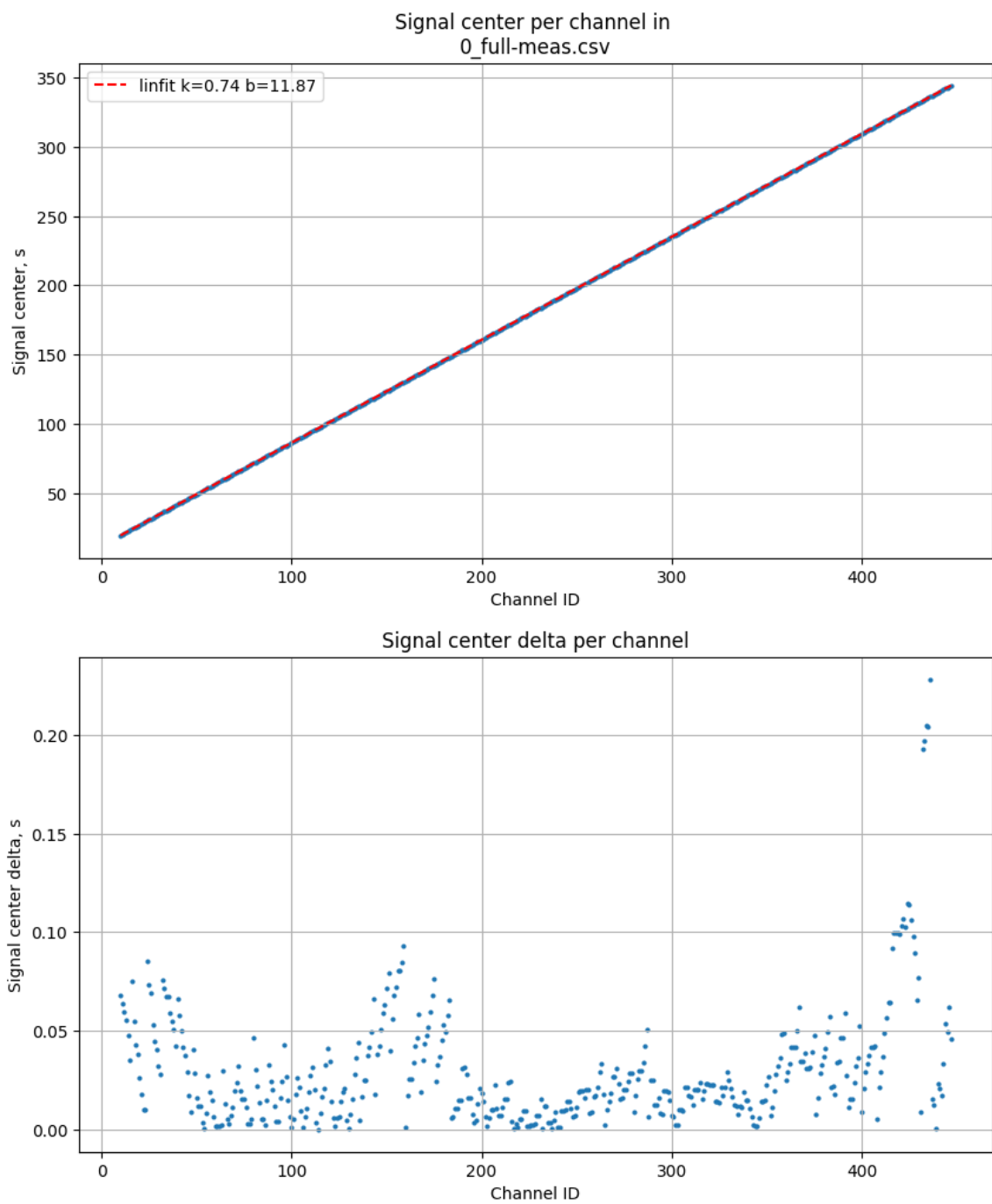


Рисунок 37 – Линейная аппроксимация центра внешнего временного интервала для эталона 0 мм

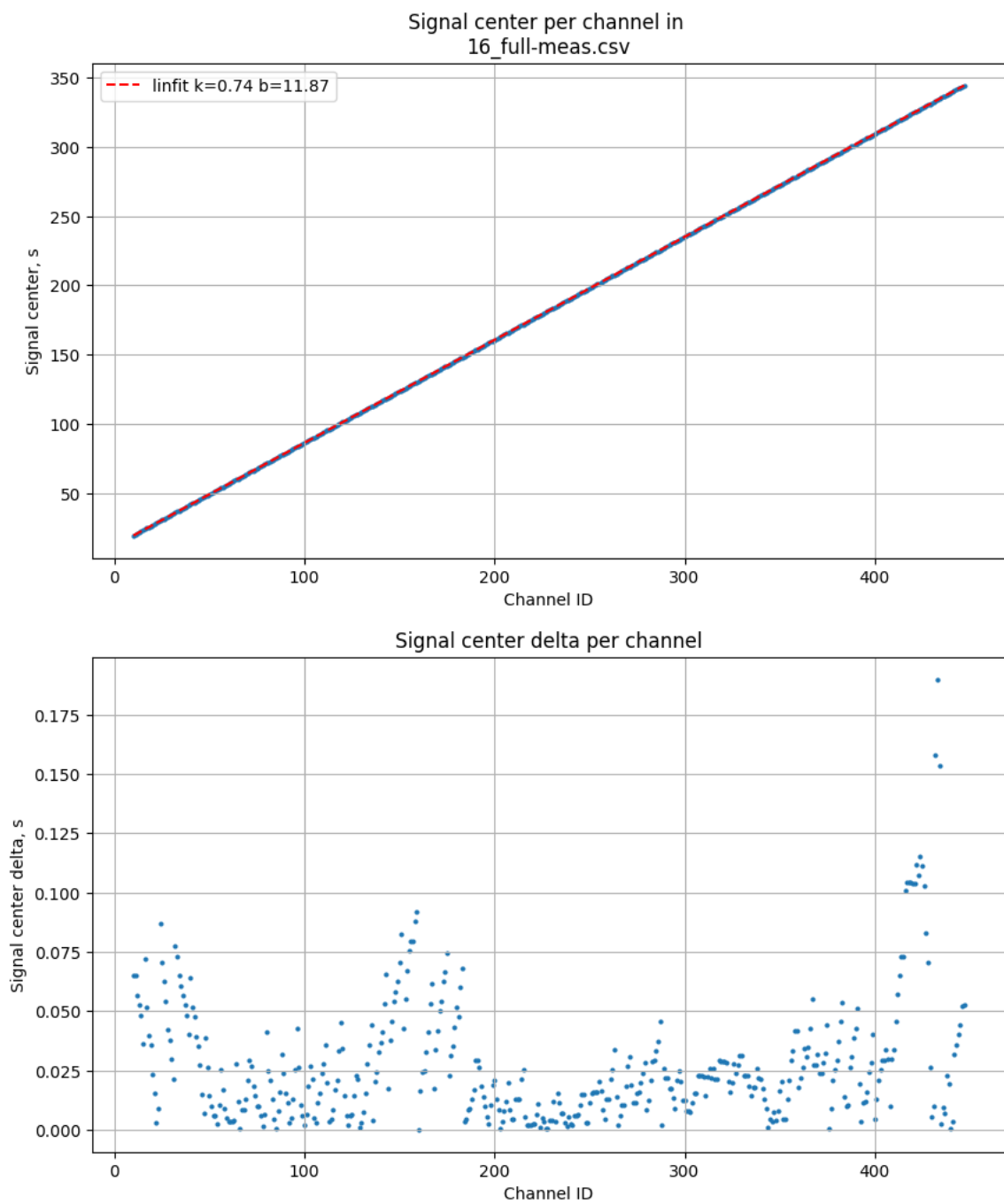


Рисунок 38 – Линейная аппроксимация центра внешнего временного интервала для эталона 16 мм

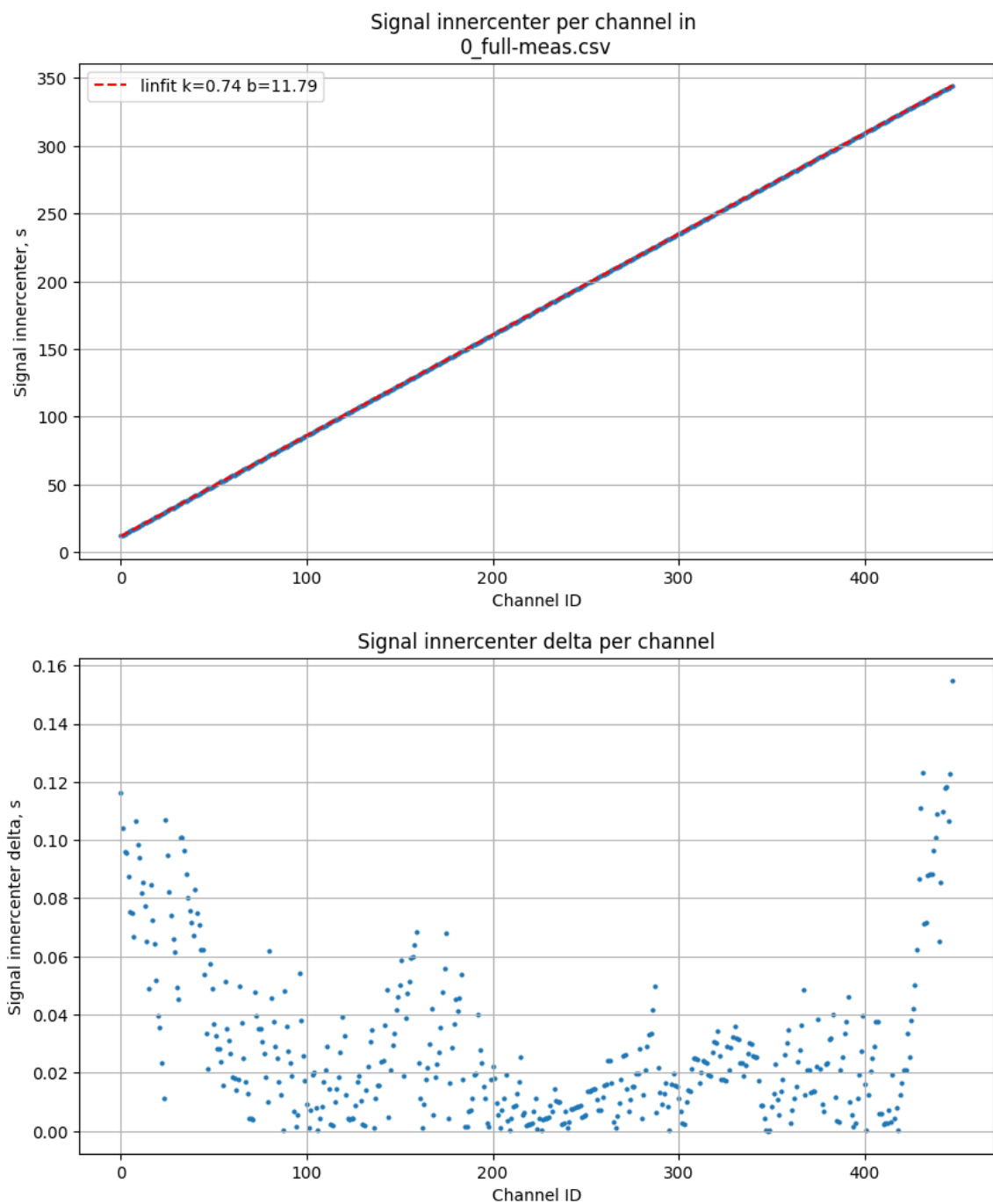


Рисунок 39 – Линейная аппроксимация центра внутреннего временного интервала для эталона 0 мм

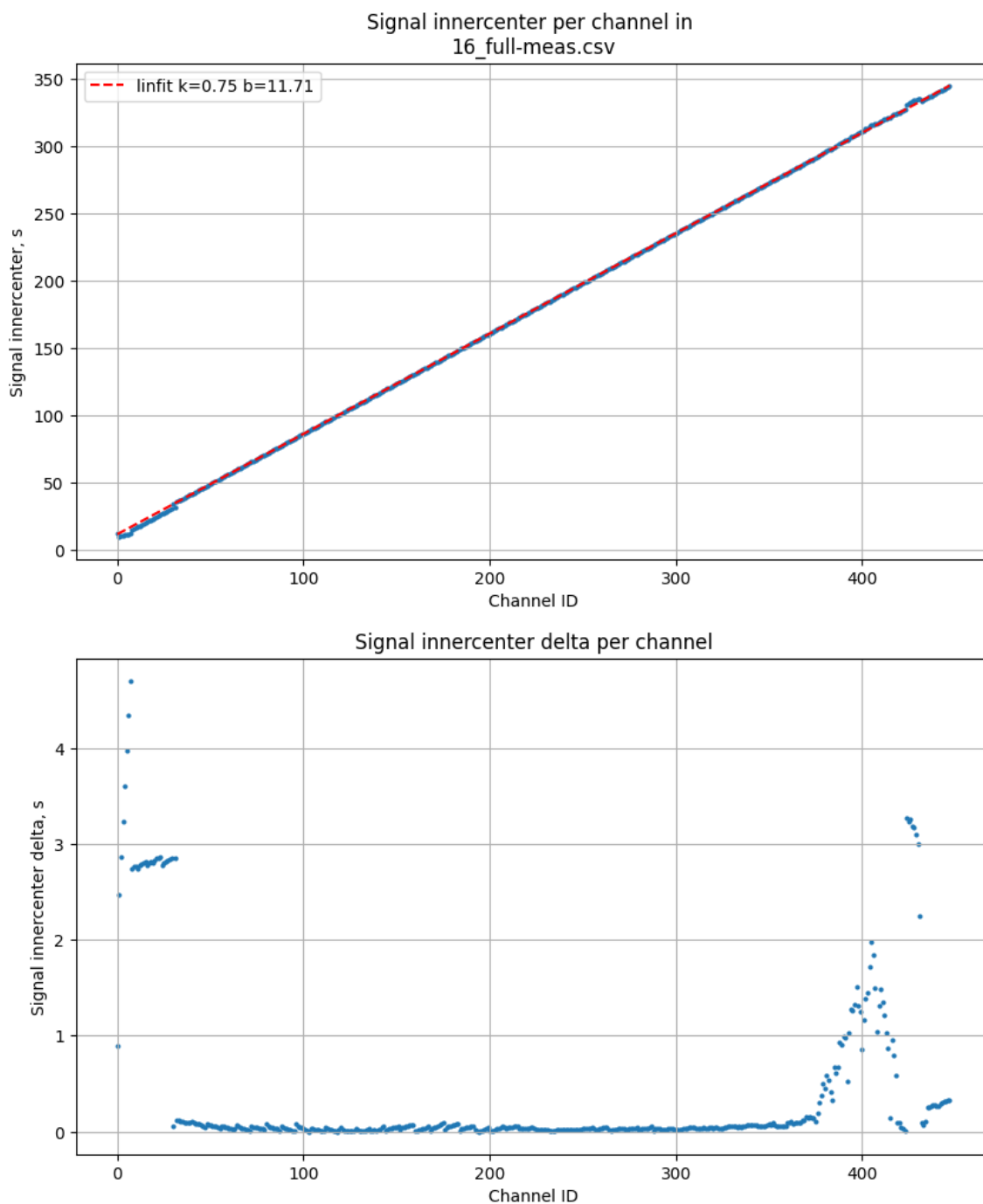


Рисунок 40 – Линейная аппроксимация центра внутреннего временного интервала для эталона 16 мм

Сравнение методов определения центра по внешнему и внутреннему окну показало, что оба подхода дают близкие результаты. Метод по внешнему окну более устойчив на краях линейки, где ослабление меньше влияет на границы тележки. Метод по внутреннему окну точнее в центральной области, поскольку захватывает меньше лишних точек. Отличие средних сигналов, полученных двумя методами, при малых толщинах составляло порядка 0.24% от максимального значения среднего в эксперименте.

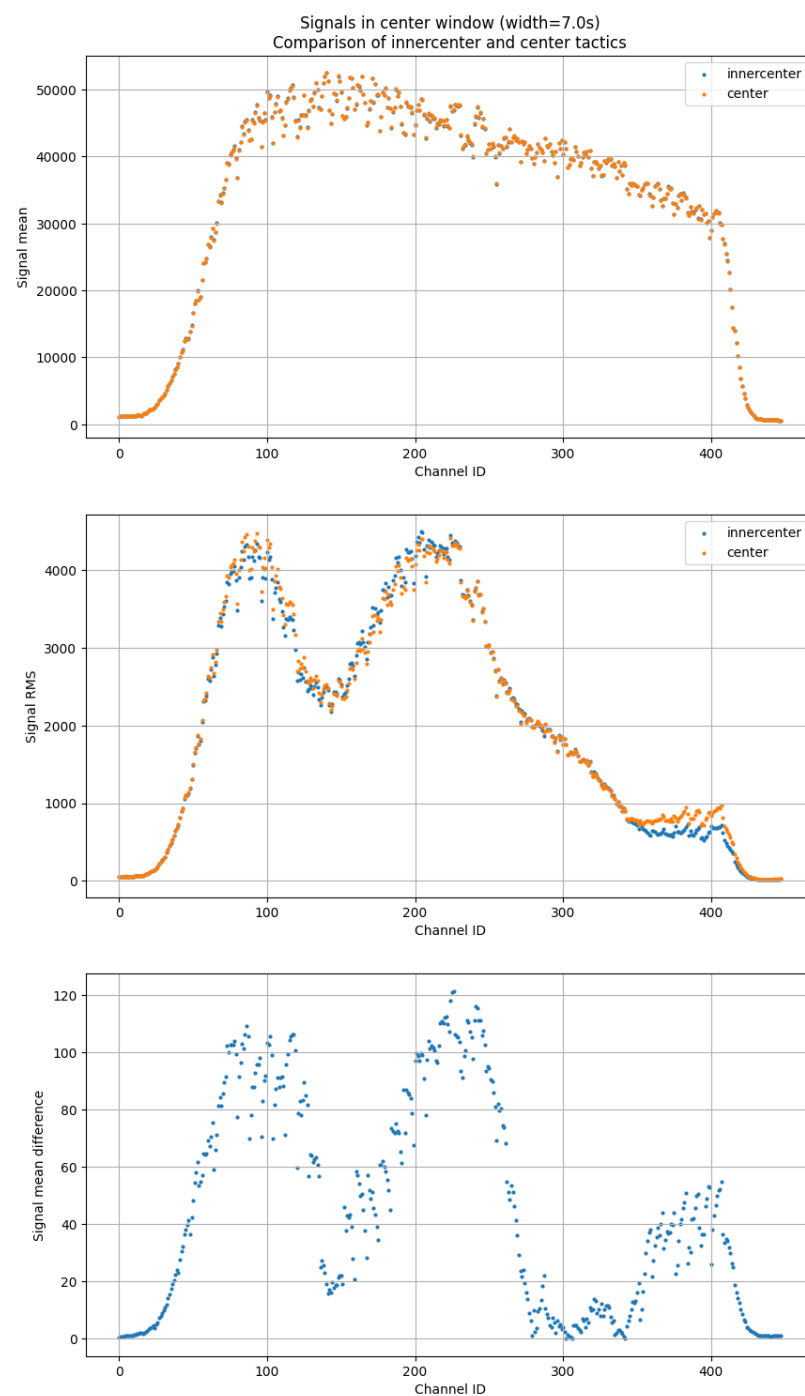


Рисунок 41 – Сравнение методов расчета среднего сигнала в окне интегрирования для эталона 0 мм

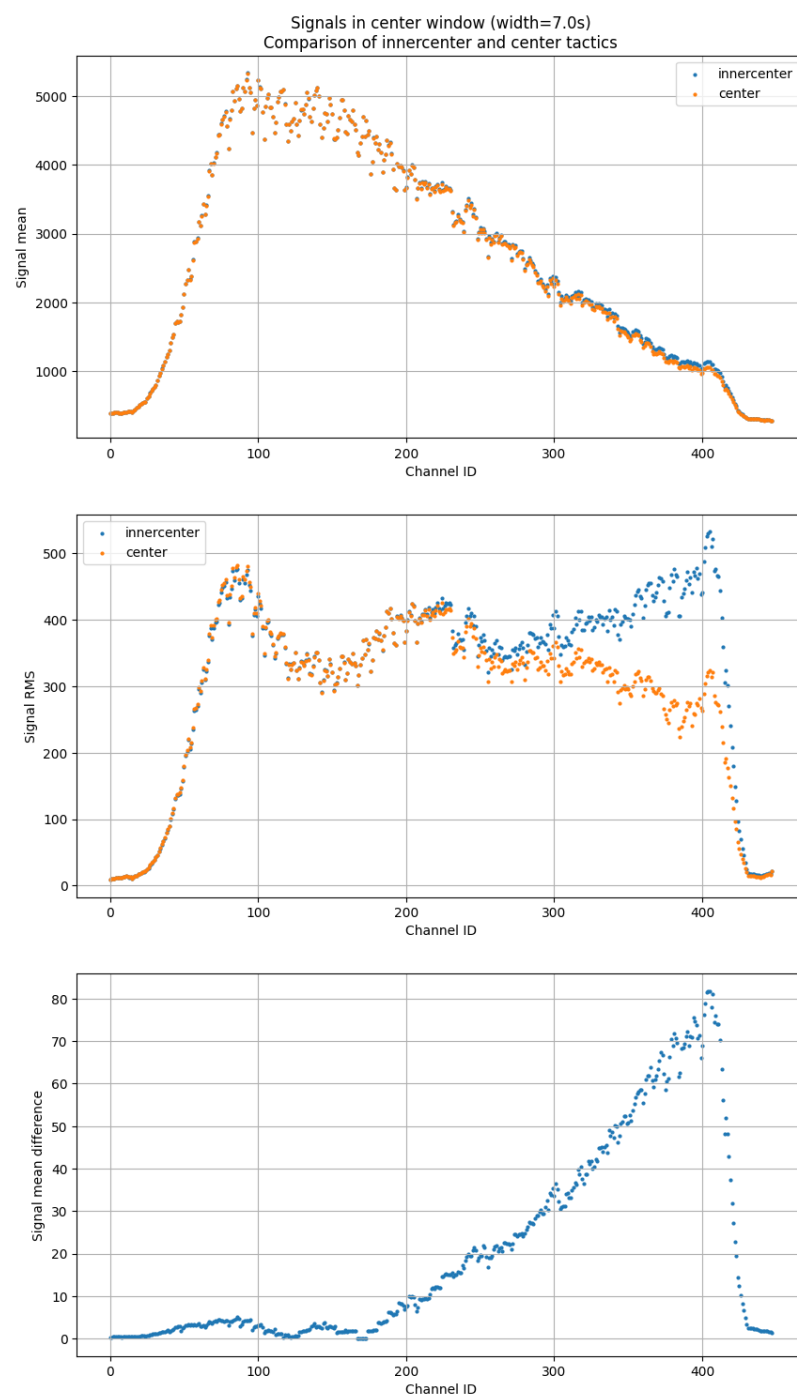


Рисунок 42 – Сравнение методов расчета среднего сигнала в окне интегрирования для эталона 16 мм

Дополнительно исследовалась ширина окна интегрирования. Уменьшение ширины приводит к снижению RMS и повышает надежность значения EXT. Практически оптимальными оказались окна 6–7 с, тогда как ширина 8 с приводила к росту RMS, особенно для больших толщин. Следовательно, при расчете внешнего калибровочного сигнала необходимо выдерживать небольшие отступы от краев внутреннего окна.

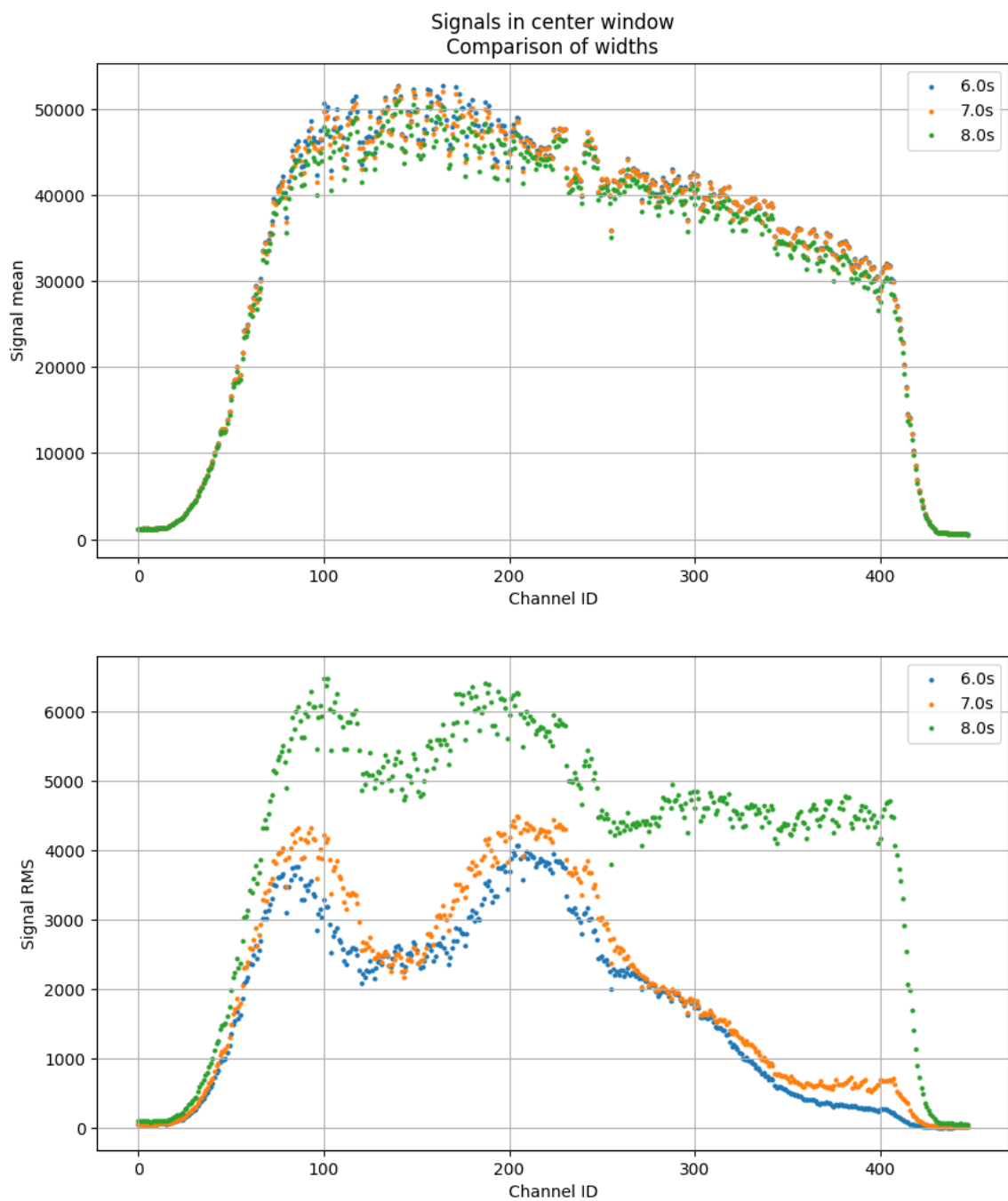


Рисунок 43 – Влияние ширины окна интегрирования на средний сигнал и RMS для эталона 0 мм

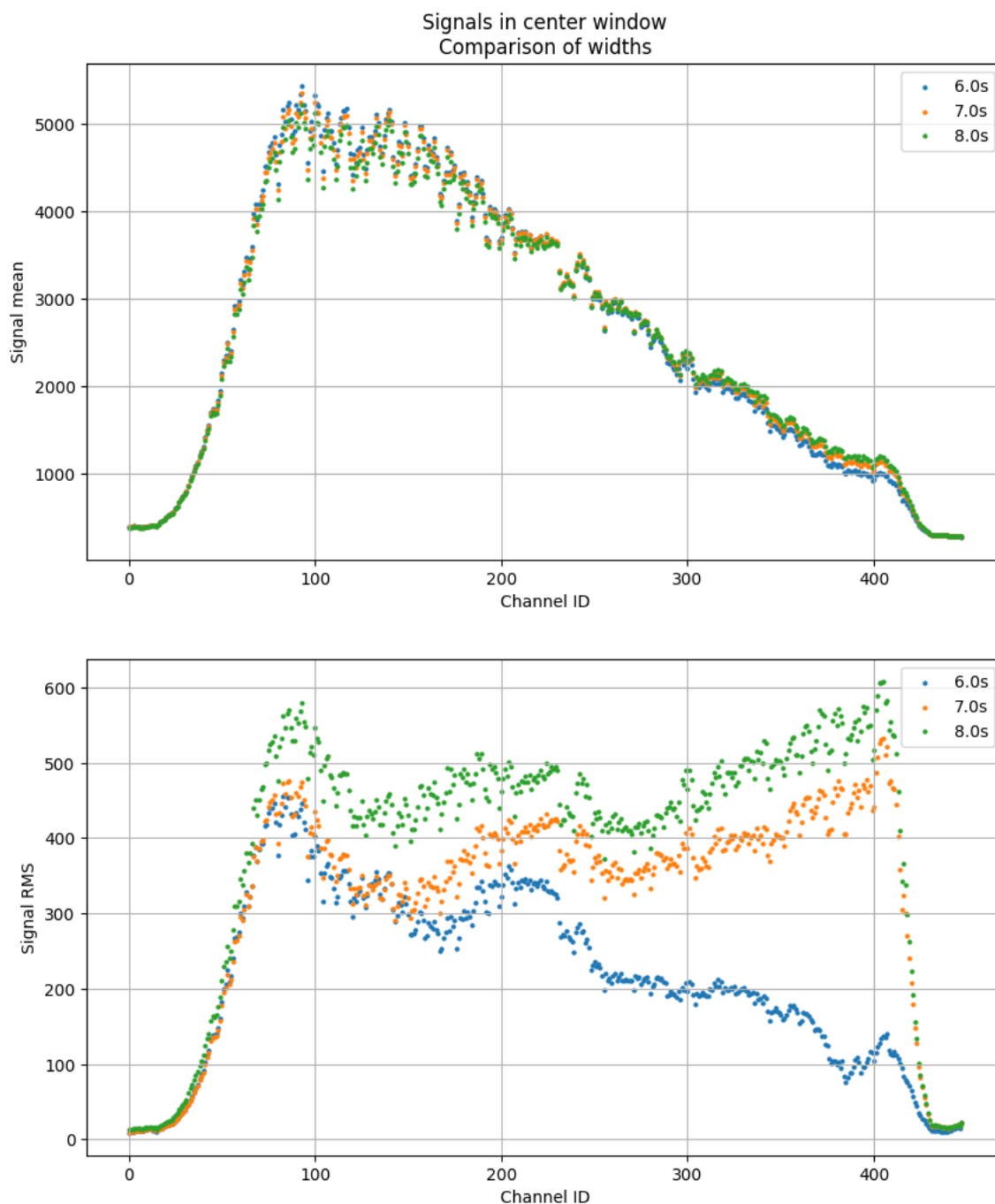


Рисунок 44 – Влияние ширины окна интегрирования на средний сигнал и RMS для эталона 16 мм

Для анализа трансмиссий использовались поправки к профилю. Во-первых, применялась геометрическая поправка на азимутальный угол в соответствии с выражением (1.14). Во-вторых, рассматривалась фильтрация ZERO-сигнала тонкими алюминиевыми фильтрами, подавляющими мягкую компоненту рентгеновского спектра. Такая фильтрация улучшает физическую сопоставимость опорного сигнала и сигналов, прошедших через калибровочные образцы.

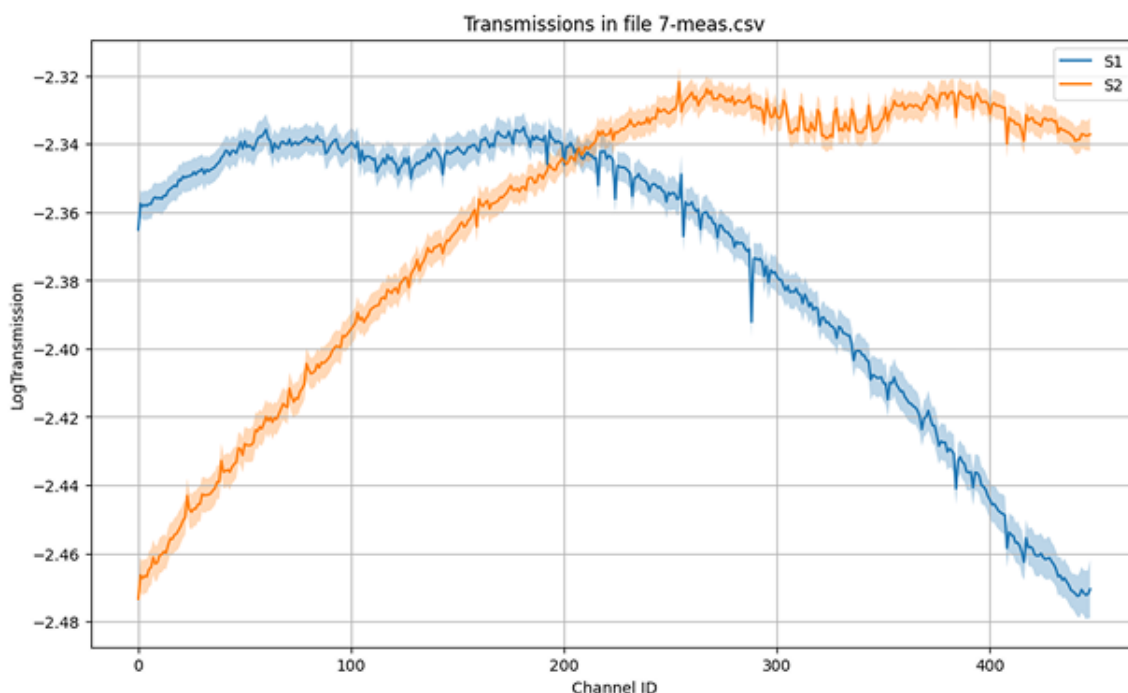


Рисунок 45 – Профиль трансмиссии при внешней калибровке на образце 7 мм (до применения поправки на геометрию)

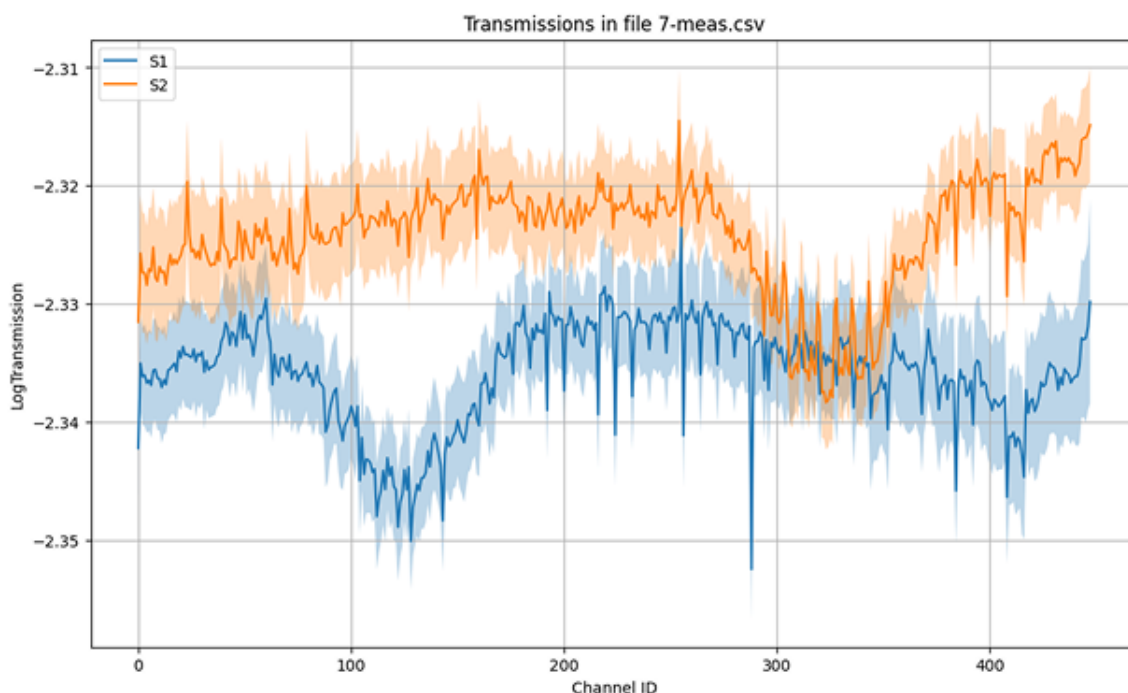


Рисунок 46 – Профиль трансмиссии при внешней калибровке на образце 7 мм (после применения поправки на геометрию)

Внутренние калибровки проводились на образцах 1, 2, 7, 16 и 26 мм. Их анализ показал, что форма профилей трансмиссии в целом сохраняется, однако качество внутренних калибровок ограничивается механикой магази-

на стандартов. Для толстых образцов точность заметно ухудшается, а различие форм профилей указывает на неодинаковое выдвигание образцов или их неоднородность. Внешние калибровки после доработки стенда дали более устойчивые и предсказуемые профили, поэтому они рассматриваются как основной источник данных для осуществления калибровок.

Разделение калибровочных процедур на быстрые внутренние проверки и внешнюю калибровку по эталонным образцам соответствует общей логике эксплуатации промышленных измерительных систем. Внутренняя калибровка позволяет оперативно контролировать стабильность каналов, а внешняя калибровка обеспечивает привязку измерительного сигнала к реальной геометрии прохождения излучения через объект контроля [8, 9, 10, 11, 12, 21, 22, 23].

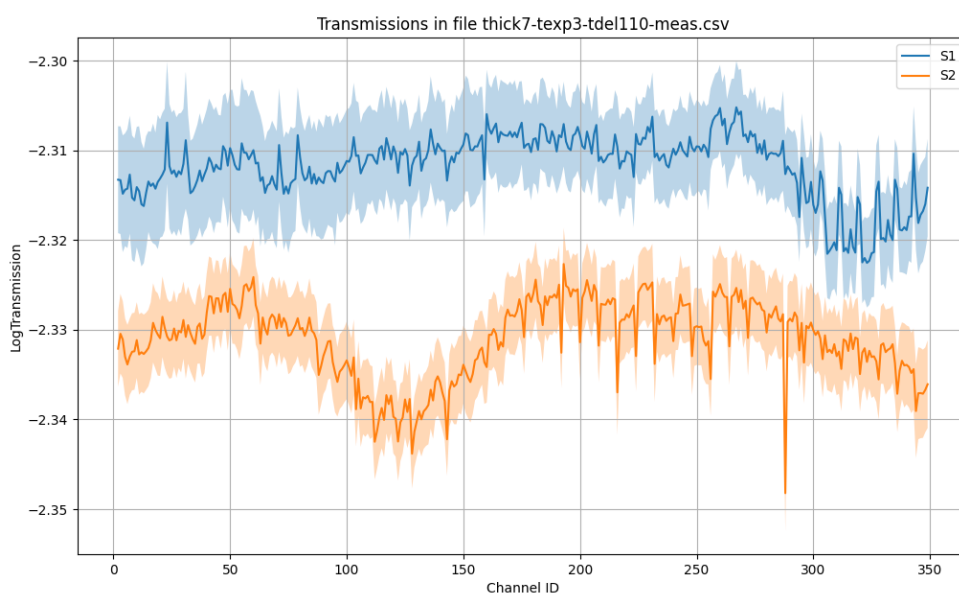


Рисунок 47 – Профиль трансмиссии при внутренней калибровке на стандарте 7 мм

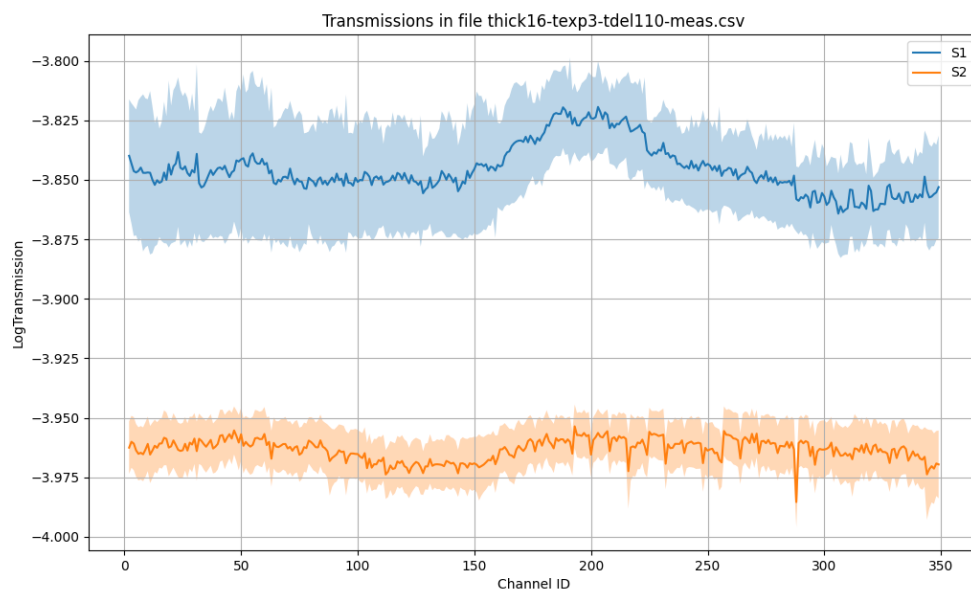


Рисунок 48 – Профиль трансмиссии при внутренней калибровке на стандарте 16 мм

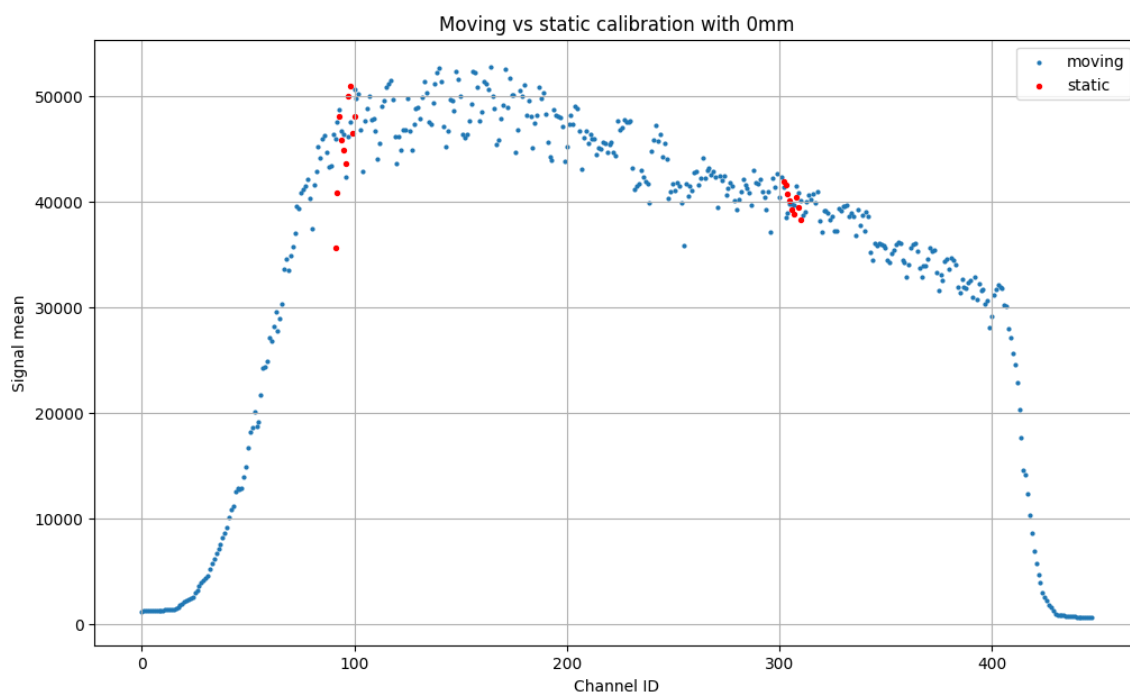


Рисунок 49 – Сравнение внешней калибровки «проездом» и статичной калибровки для 0 мм

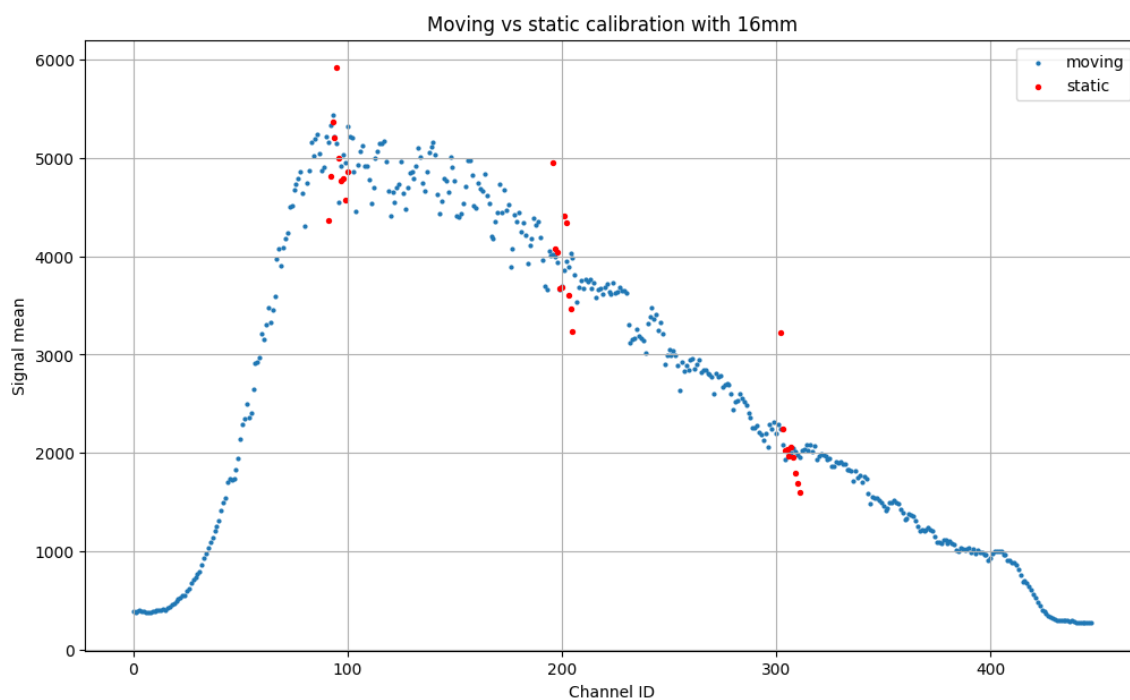


Рисунок 50 – Сравнение внешней калибровки «проездом» и статичной калибровки для 16 мм

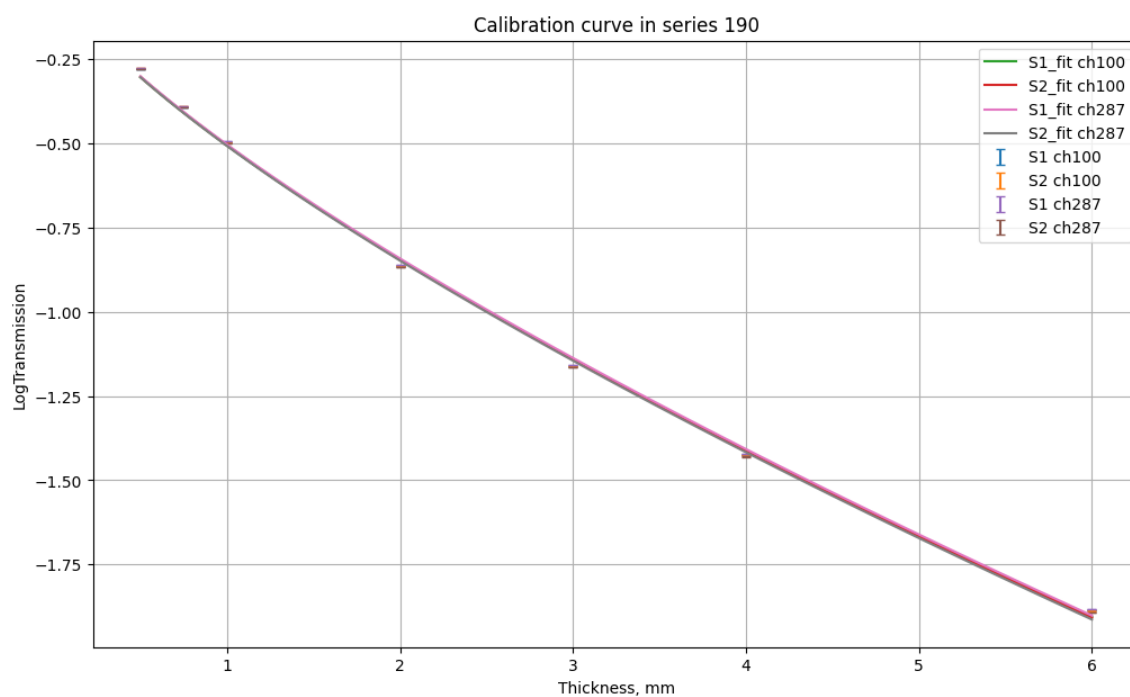


Рисунок 51 – Форма калибровочных кривых по данным внешней калибровки

3.4 Проведение предварительных измерений профиля толщины и верификация результатов

После отладки стенда и разработки методики калибровки были проведены предварительные измерения на образцах. Внутренняя и внешняя калибровки выполнялись для эталонов толщиной 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4 и 6 мм. По полученным данным строились калибровочные кривые, после чего алгоритм применялся к образцам толщиной 3, 4 и 6 мм.

Восстановление профиля включало несколько этапов: расчет сигналов INF и ZERO, вычисление трансмиссий, учет геометрической поправки, построение калибровочных зависимостей по каналам, определение краев образца и расчет толщины с учетом поправок на сплав и рассеянное излучение. Верификация выполнялась сравнением восстановленных профилей с протоколами измерений образцов.

По результатам предварительных измерений текущая версия алгоритма позволяет определять края образцов толщиной до 6 мм с точностью восстановления ширины около 1 мм ($\sim 0.1\%$). Для более толстых образцов требуется учитывать форму края, например, в виде эллипса, поскольку простая модель резкого края становится недостаточной. Профиль толщины восстанавливается с учетом всех доступных поправок, а текущая точность составляет порядка 1–2% в зависимости от толщины образца.

Полученная точность находится в диапазоне, сопоставимом с требованиями к промышленным системам контроля толщины листового проката. Для дальнейшего повышения достоверности результата необходимо расширить набор проверочных образцов, провести оценку неопределенности восстановления толщины и проверить устойчивость калибровочной зависимости при изменении режима работы источников [8, 10, 11, 12, 25, 26, 27, 28, 29, 30].

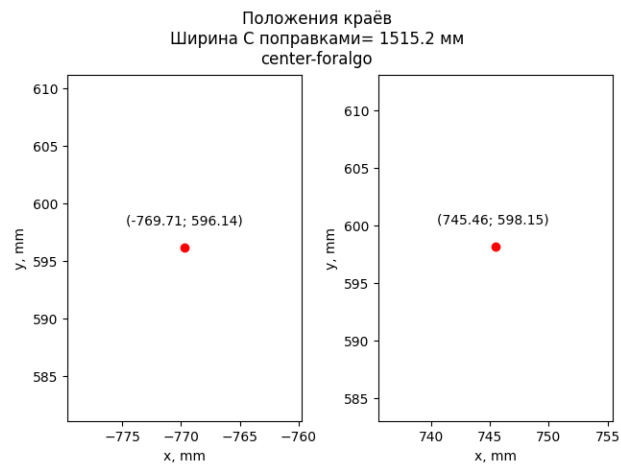


Рисунок 52 – Расчет краев образца толщиной 3 мм с номинальной шириной 1515 мм

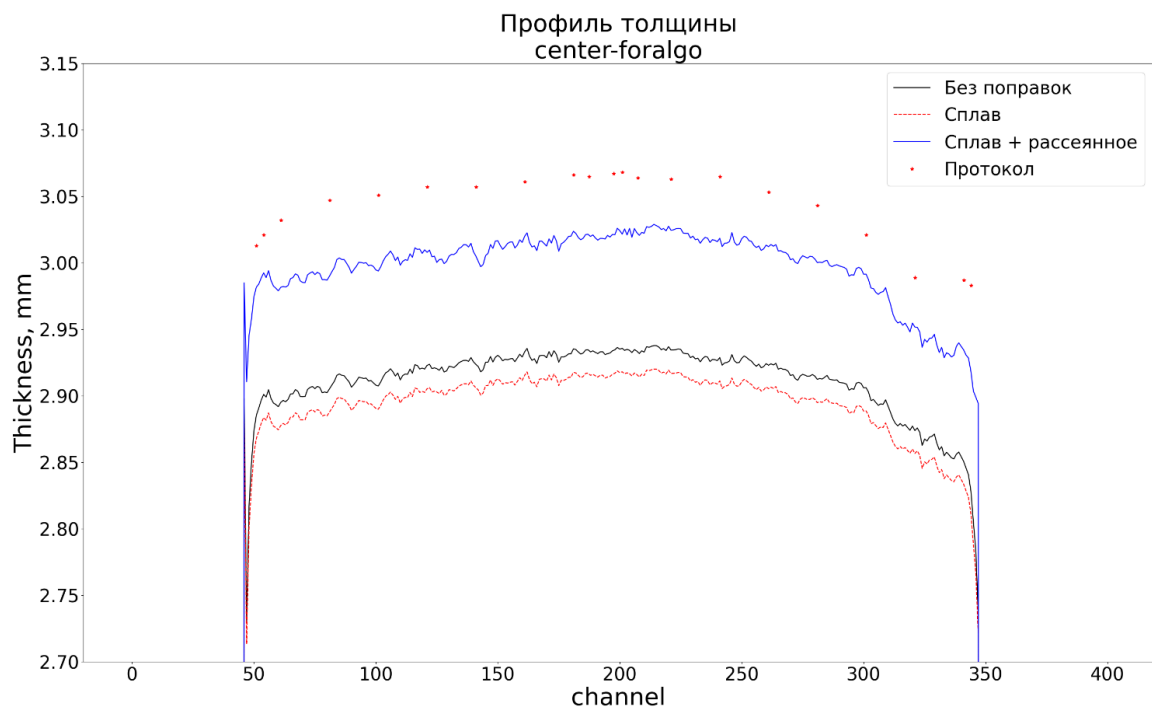


Рисунок 53 – Восстановленный профиль толщины образца 3 мм с учетом поправок

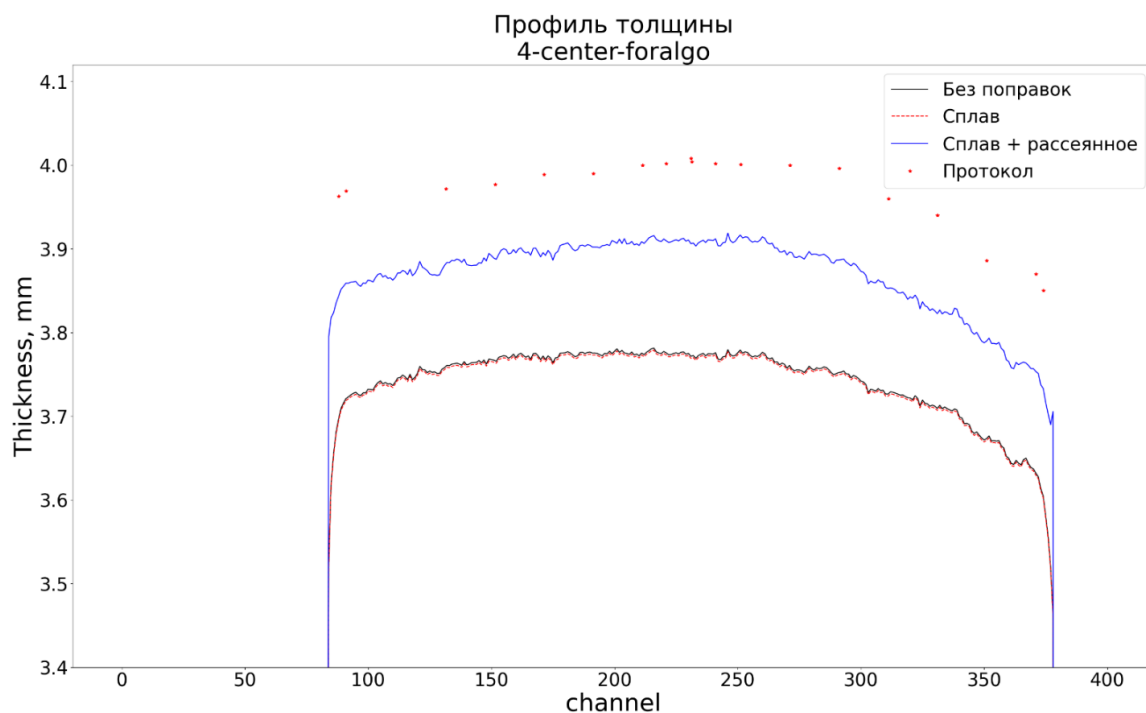


Рисунок 54 – Восстановленный профиль толщины образца 4 мм с учетом поправок

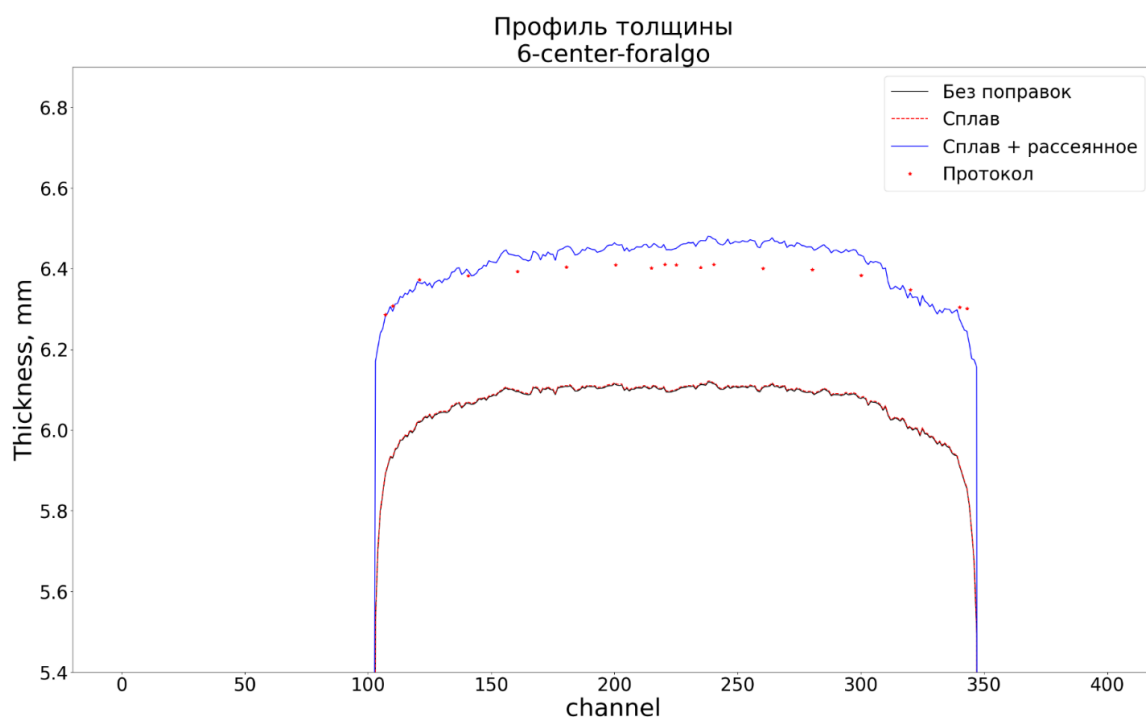


Рисунок 55 – Восстановленный профиль толщины образца 6 мм с учетом поправок

Основными факторами, ограничивающими точность, являются отсутствие полной поправки на рассеяние в калибровочных данных и недостаточная точность текущих функций, описывающих рассеянное излучение для

данной геометрии стенда и ширины рентгеновского пучка. Тем не менее предварительные результаты демонстрируют принципиальную работоспособность оборудования и методики обработки.

Полученные данные также подтверждают необходимость интерактивного программного инструмента. На каждом этапе анализа требуется быстро сравнивать профили средних значений сигнала и RMS, временные развертки, трансмиссии, калибровочные кривые и промежуточные таблицы. Именно эта потребность стала основной мотивацией разработки программного комплекса, описанного в следующей главе.

4 Программный комплекс для анализа экспериментальных данных калибровки

4.1 Сравнительный анализ и обоснование выбора архитектуры программного комплекса

Программный комплекс должен решать две группы задач. Первая группа связана с физико-математической обработкой данных: чтение экспериментальных файлов, расчет средних значений и RMS, очистка выбросов, восстановление временных окон, расчет трансмиссий, построение калибровочных кривых и формирование дампов результатов. Вторая группа связана с инженерной эксплуатацией: интерактивный просмотр сигналов, сравнение измерений, быстрый выбор режимов, визуальная диагностика аномальных каналов и подготовка результатов для дальнейшего анализа.

Ключевые требования к архитектуре программного комплекса состояли в следующем:

- возможность обработки одиночных файлов, внутренних калибровок 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 геометрических поправок и построения калибровочных зависимостей;
- возможность интерактивного сравнения нескольких проектов;
- экспорт промежуточных и итоговых таблиц для дальнейшей обработки.

Исходя из указанных требований при проектировании рассматривались несколько архитектурных вариантов. Их сравнение приведено в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение вариантов архитектуры программного комплекса

Вариант	Преимущества	Недостатки	Вывод
Набор скриптов Python	Минимальные затраты на разработку, удобно для быстрых расчетов	Слабая воспроизводимость, сложность для пользователя, нет единого интерфейса	Подходит только для прототипирования
Backend-библиотека GUI	Разделение расчетов и интерфейса, повторное использование кода, интерактивный анализ	Требуется проектирование API между слоями	Выбран как основной вариант
C++/Qt	Высокая производительность и развитый GUI	Необходимо переписывать разработанные ранее под Python алгоритмы	Избыточен для текущей стадии
Electron или web-интерфейс	Современный интерфейс, гибкая визуализация	Большой размер, необходимость обмена данными с Python-процессом	Не выбран
Локальный сервер	Удобен для удаленного доступа и совместной работы	Усложняет развертывание и безопасность	Возможен на следующих этапах

Наиболее рациональной оказалась архитектура, состоящая из объектно-ориентированной backend-библиотеки на Python и отдельного графического интерфейса. Такой подход позволяет использовать расчетные алгоритмы независимо от способа запуска: из GUI, из вспомогательного скрипта или из пакетного обработчика. Backend остается пригодным для автоматических расчетов и воспроизводимых дампов результатов, а frontend предоставляет пользователю удобный способ выбора данных, построения графиков и просмотра промежуточных таблиц.

Разделение программного комплекса на расчетное ядро и графический интерфейс соответствует распространенной практике разработки научного программного обеспечения. Такой подход упрощает тестирование вычислительных алгоритмов, повторное использование backend-библиотеки и по-

следующее расширение графического приложения без изменения физико-математической части программы [37, 38, 39, 40].

В текущей реализации исходный код разделен на две верхнеуровневых части: **backend** и **frontend**. Backend – расчетный модуль – содержит различные классы для чтения файлов, обработки сигналов, расчета трансмиссий и построения калибровочных зависимостей в зависимости от типа производимого процесса. Frontend – графический интерфейс – реализует приложение **Calibration Event Viewer** на PySide6, которое создает пользовательскую оболочку вокруг этих классов. В качестве библиотек обработки используются **pandas**, **numpy**, **scipy** и **matplotlib**; графический интерфейс построен на Qt через PySide6, а распространение приложения предполагается выполнять через PyInstaller. Выбор стека согласуется с распространенными инструментами научных вычислений и настольной визуализации данных на Python: SciPy, NumPy и pandas обеспечивают обработку массивов и таблиц, Qt for Python формирует GUI-слой, а PyInstaller используется для подготовки исполняемой сборки [33, 35, 36, 40, 41, 42].

4.2 Расчетная библиотека: структура и функционал

Расчетная часть программного комплекса построена вокруг базового обработчика экспериментальных файлов. Основным класс **BaseParser** из модуля **base_parser.py** отвечает за хранение параметров эксперимента, открытие одиночного файла или директории, чтение CSV-данных и расчет статистик по каналам независимо от специфики производимого процесса. Параметры сгруппированы во вложенной структуре **ParserParameters**: геометрия стенда, параметры источников S1 и S2, настройки детектора, параметры синхронизации и параметры конкретного эксперимента. Часть параметров может извлекаться из имени файла по регулярной маске, а недостающие значения задаются через словарь значений по умолчанию.

Обобщенная структура расчетной библиотеки показана на рисунке 56. Схема отражает разделение backend на базовый слой чтения данных, набор расширяющих миксинов, калибровочный слой и специализированные обработчики для разных сценариев калибровки.

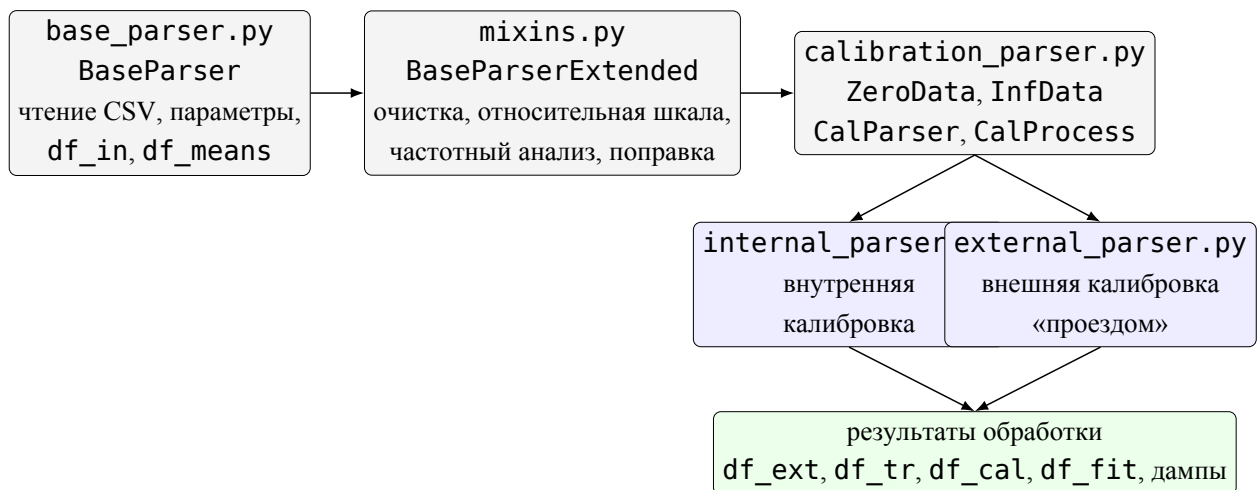


Рисунок 56 – Модульная структура расчетной библиотеки обработки калибровочных данных

При чтении данных **BaseParser** автоматически пробует разделители «;» и «,» и формирует таблицу **df_in**. Для файлов с признаком **-inv** предусмотрена перестановка каналов **S1** и **S2**, что позволяет обрабатывать измерения, записанные в инверсной конфигурации. После вызова **calc_means()** формируется таблица **df_means** со столбцами **ch**, **mean1**, **RMS1**, **mean2**, **RMS2**. Эти данные используются как базовый слой для всех последующих расчетов.

Расширение базового обработчика выполнено с помощью набора миксинов в модуле **mixins.py**. Класс **BaseParserExtended** объединяет следующие возможности:

- **CleanableMixin** — очистка выбросов во временных рядах;
- **FreqAnalysisMixin** — анализ автокорреляций и спектров Фурье для поиска периодических компонент сигнала;
- **RelativeConvertibleMixin** — перевод сигналов в относительный масштаб от 0 до 1;
- **CosineFixableMixin** — пересчет номера канала в координату, расчет углов к источникам и геометрическая поправка трансмиссии на азимутальный угол.

Калибровочный слой реализован в модуле **calibration_parser.py**. Классы **ZeroData** и **InfData** хранят опорные состояния **ZERO** и **INF**. **ZERO** может быть сформирован по стати-

ческим измерениям, в том числе с объединением двух файлов по пороговым каналам `thr1` и `thr2`. INF загружается из отдельного файла полного ослабления. Абстрактный класс `CalParser` наследует расширенный базовый обработчик и добавляет расчет вектора трансмиссии:

$$\tau = \frac{s_{ext} - s_{inf}}{s_{zero} - s_{inf}}, \quad (4.1)$$

а также расчет логарифма трансмиссии и распространение неопределенностей по RMS экспериментального, ZERO- и INF-сигналов (по формулам переноса погрешностей):

$$\sigma[\tau]^2 = \left(\frac{\sigma_{ext}}{s_{zero} - s_{inf}}\right)^2 + \left(\frac{(s_{ext} - s_{zero})\sigma_{inf}}{(s_{zero} - s_{inf})^2}\right)^2 + \left(\frac{(s_{ext} - s_{inf})\sigma_{zero}}{(s_{zero} - s_{inf})^2}\right)^2 \quad (4.2)$$

$$\sigma[\ln \tau]^2 = \frac{\sigma[\tau]^2}{\tau^2} \quad (4.3)$$

Если включена геометрическая поправка, после расчета трансмиссии вызывается коррекция через `fix_cosine()`.

Внутренняя калибровка описана в модуле `internal_parser.py`. Класс `InternalCalParser` использует средние значения статического измерения как сигнал EXT, а `InternalCalProcess` объединяет набор таких обработчиков по толщинам эталонов. Для измерений, записанных отдельно для левой и правой части, метод `merge()` формирует общий профиль: крайние области берутся из соответствующих файлов, а центральный диапазон между `thr1` и `thr2` усредняется. Это соответствует практической задаче сшивки внутренних калибровок, полученных при разных положениях тележки внешней калибровки.

Внешняя калибровка «проездом» реализована в модуле `external_parser.py`. Класс `ExternalCalParser` предназначен для файлов, в которых эталон перемещается вдоль линейки. Алгоритм обработки включает несколько этапов: поиск внешних и внутренних границ временного окна по порогам, расчет ширин и центров окон, линейную аппроксимацию центра окна по номеру канала, учет эмпирических функций тени калибратора и расчет EXT как среднего сигнала в окне интегрирования. Для ZERO внешней калибровки предусмотрен отдельный класс

`ExternalZeroData`, который может формировать опорный профиль из скользящего измерения. Класс `ExternalCalProcess` собирает внешние измерения разных толщин в единый калибровочный процесс.

Общий класс `CalProcess` хранит словарь обработчиков по толщине эталона, формирует таблицу калибровочных точек `df_cal` и таблицу параметров аппроксимации `df_fit`. В основной реализации метод `calibrate()` строит зависимость логарифма трансмиссии от толщины в виде степенной функции. Также предусмотрены `spline_calibrate()` для кубической сплайн-интерполяции и `parabolic_calibrate()` для трехточечной параболической аппроксимации с возможностью учета геометрической поправки по толщине. Для визуального контроля backend предоставляет методы построения временных сигналов, профилей по каналам, ZERO, INF, EXT, трансмиссий и калибровочных кривых.

Кубическая сплайн-интерполяция является удобным методом построения гладких калибровочных зависимостей по дискретным экспериментальным точкам. В отличие от глобальных полиномиальных аппроксимаций, сплайны позволяют снизить риск неустойчивого поведения между узлами интерполяции, сохраняя гладкость функции и ее производных [31, 32, 33, 34].

Все основные классы имеют методы `dump()`, которые сохраняют результаты в структурированные каталоги. В дампы входят CSV-таблицы средних значений, трансмиссий, ZERO/INF и калибровочных кривых, а также PNG-графики профилей и трансмиссий. Таким образом, backend реализует полный воспроизводимый расчетный конвейер: от исходного CSV-файла до таблиц и графиков, пригодных для проверки и передачи в последующие алгоритмы восстановления профиля.

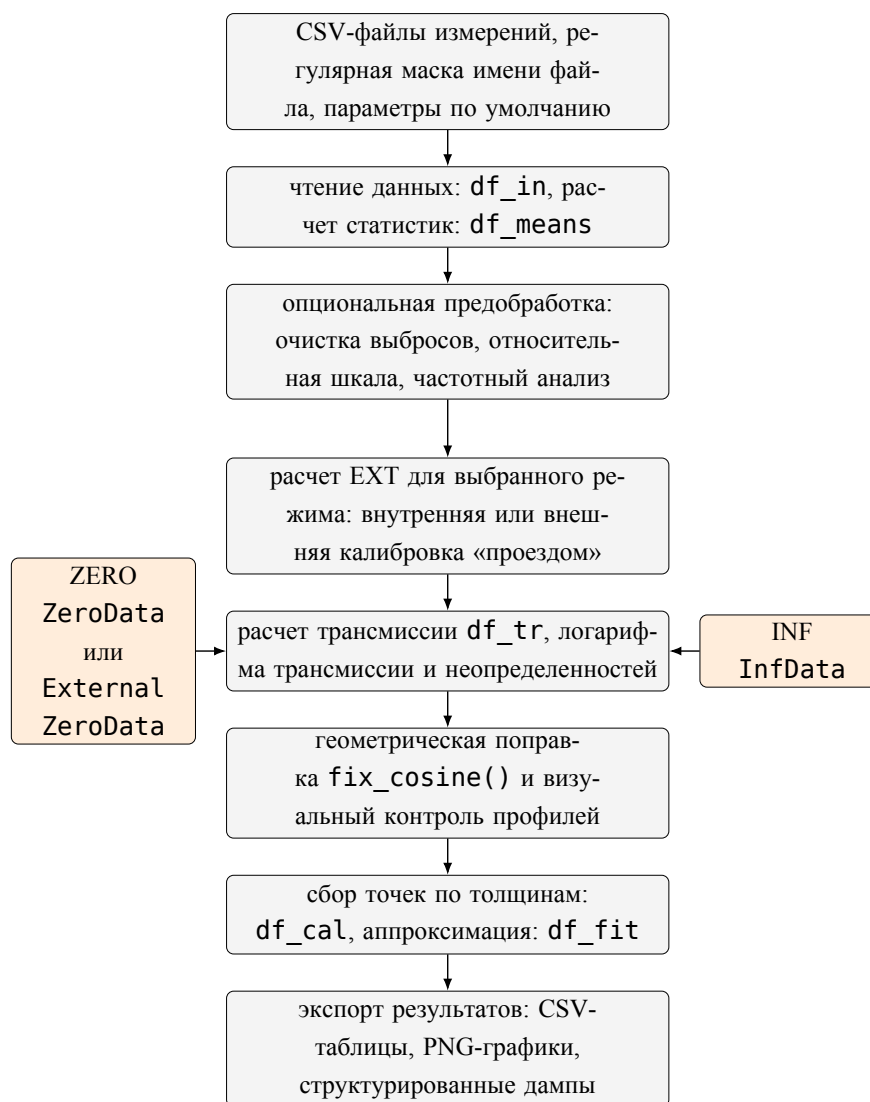


Рисунок 57 – Последовательность обработки данных в расчетной библиотеке

Последовательность обработки данных в расчетной библиотеке приведена на рисунке 57. На схеме показаны основные промежуточные таблицы и переход от исходных измерений к калибровочным зависимостям и экспортируемым результатам.

4.3 Графический интерфейс: структура и функционал

Графический интерфейс расположен в каталоге `frontend` и реализован как настольное приложение на PySide6. Точка входа находится в модуле `app.py`: создается `QApplication`, применяется визуальная тема, показывается splash-экран и открывается главное окно `MainWindow`. Модуль `theme.py` задает единый QSS-стиль и автоматически переключает светлую или темную тему в зависимости от системных настроек.

Главное окно `MainWindow` из модуля `windows/main_window.py` содержит список открытых проектов, вкладки проектов, область логов и основные команды управления. Пользователь может открыть новый проект, закрыть текущий проект или вынести выбранный проект в отдельное окно. Состояние списка проектов хранится в классе `ProjectManager`, а каждый открытый набор данных описывается объектом `CalibrationProject`. В этом объекте фиксируются имя проекта, тип `BASE`, `INT` или `EXT`, путь, маска имени файла, параметры по умолчанию, выбранный тип `ZERO`, ссылки на `ZERO/INF` и расчетный объект `backend`.

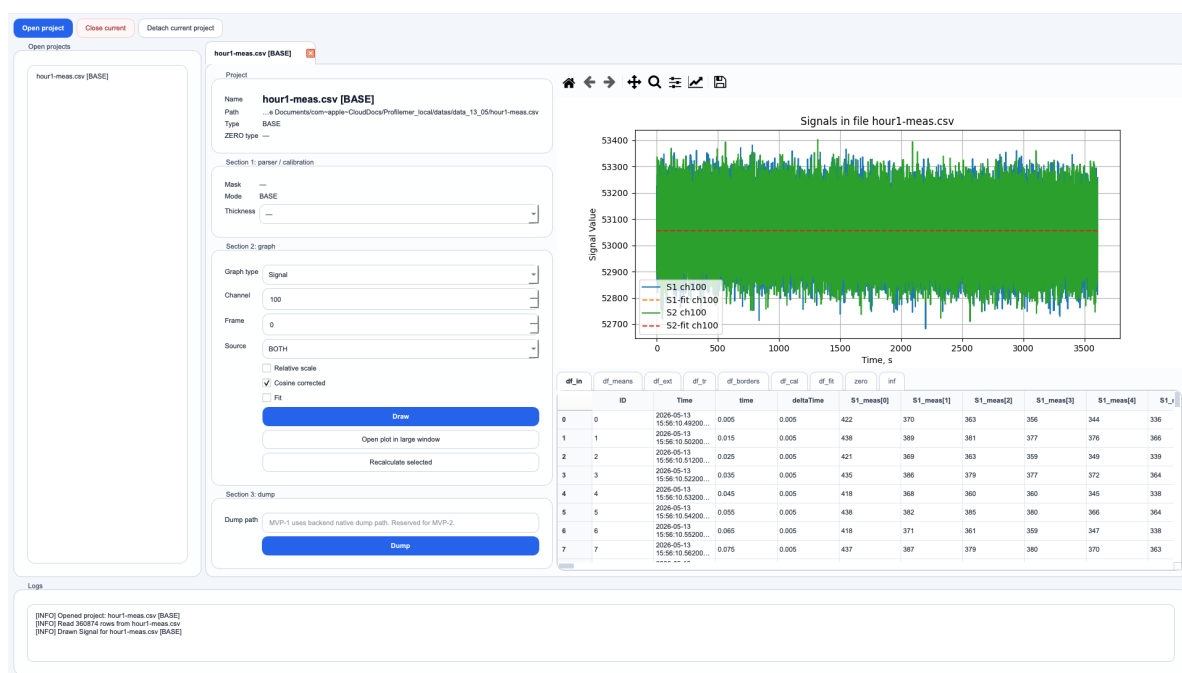


Рисунок 58 – Главное окно приложения с областью открытых проектов, вкладками и панелью логов

Создание проекта выполняется через диалог `OpenProjectDialog`. В нем пользователь выбирает режим открытия данных:

- **BASE** — одиночный файл без калибровочного процесса, открываемый через `BaseParserExtended`;
- **INT** — директория внутренней калибровки, открываемая через `InternalCalProcess`;
- **EXT** — директория внешней калибровки «проездом», открываемая через `ExternalCalProcess`.

Диалог также позволяет указать регулярную маску файлов, JSON-

блок параметров по умолчанию, INF-файл, способ построения ZERO, один или два ZERO-файла, пороговые каналы thr1/thr2 и флаг использования внешней области сигнала для скользящего ZERO. Преобразование введенных параметров в backend-объекты выполняется модулем `core/parser_factory.py`: он создает ZERO/INF, запускает нужный процесс и возвращает готовый `CalibrationProject`.

Project type: EXT

File / folder: /Users/dekalashnikov/Library/Mobile Documents/com~apple~CloudDocs/Profilemer_local/data/data_10_06/ Choose...

Data mask: (?P<thickness>[d+]-meas[-inv]*)\.csv

ZERO / INF references

ZERO type: from_sliding

ZERO mask: (?P<thickness>[d+]-meas[-inv]*)\.csv

ZERO file / sliding file: /Users/dekalashnikov/Library/Mobile Documents/com~apple~CloudDocs/Profilemer_local/data/data_10_06/zero/0-meas.csv Choose...

ZERO file 2 optional: Choose...

INF file: /Users/dekalashnikov/Library/Mobile Documents/com~apple~CloudDocs/Profilemer_local/data/data_10_06/inf/200-meas.csv Choose...

Static merge thresholds: thr1: 100 thr2: 350

Sliding ZERO: ☐ Use outside signal for ExternalZeroData.open_from_sliding

default_pars

```
{
  "det.chrange": [
    0,
    448
  ],
  "s1.chrange": [
    0,
    448
  ],
  "s2.chrange": [
    0,
    448
  ],
  "geom.x1": -600,
  "geom.x2": 600
}
```

Add project Cancel

Рисунок 59 – Диалог открытия проекта с выбором режима BASE/INT/EXT и параметрами ZERO/INF

Основная рабочая область проекта реализована в виджете `ProjectTab`. Левая часть вкладки содержит сведения о проекте, выбранную маску, тип проекта, список толщин для калибровочных процессов и параметры построения графика. Пользователь выбирает тип графика, канал, номер фрейма, источник S1/S2/BOTH, относительную шкалу, режим отображения аппроксимации и включение геометрической поправки для трансмиссий. Доступны команды `Draw`, `Open plot in large window`, `Recalculate selected` и `Dump`.



Рисунок 60 – Вкладка проекта с панелью параметров построения графика и встроенным Matplotlib-холстом

Связь между элементами GUI и расчетными методами backend вынесена в PlotAdapter. Для одиночного файла доступны графики Signal, Signal profile, Means и команда Dump only. Для калибровочных проектов дополнительно доступны ZERO, INF, EXT profile, Transmission и Calibration curve. Адаптер выбирает нужный обработчик по толщине, вызывает соответствующий метод backend и возвращает объект matplotlib.figure.Figure. Благодаря этому графический слой не содержит формул обработки и остается тонкой оболочкой над расчетным API.

Правая часть ProjectTab содержит встроенный Matplotlib-холст с панелью навигации и набор табличных вкладок. На графике можно масштабировать область просмотра, перемещаться по данным и сохранять изображение стандартными средствами Matplotlib. Для детального анализа предусмотрено открытие текущего графика в полноэкранном диалоге FullscreenPlotDialog. Табличная часть построена через PandasTableModel и отображает текущие DataFrame: df_in, df_means, df_ext, df_tr, df_borders, df_cal, df_fit, а также таблицы zero и inf. Это позволяет проверять не только итоговый график, но и промежуточные численные данные, на которых основан расчет.

df_in	df_means	df_ext	df_tr	df_borders	df_cal	df_fit	zero	inf		
	ch	right1	left1	inner_right1	inner_left1	right2	left2	inner_right2	inner_left2	center1
0	0	51.6676	0.005	47.9081	10.9435	66.5254	0.005	62.766	3.7545	25.8363
1	1	52.1775	0.005	48.418	11.4634	67.0453	0.005	63.2859	28.8909	26.09125000
2	2	52.6974	0.005	48.938	11.9733	67.5653	0.005	63.8058	29.3908	26.35120000
3	3	53.2373	0.005	49.4779	12.4833	68.0852	0.005	64.3258	29.9507	26.62115
4	4	53.7572	0.005	49.9978	12.9932	68.6051	0.005	64.8457	30.4506	26.8811
5	5	54.2872	0.005	50.5278	13.503	69.1251	0.005	65.3656	30.9506	27.1461
6	6	54.8071	0.005	51.0477	14.003	69.645	0.005	65.8855	31.2905	27.40605
7	7	55.327	0.005	51.5676	14.5029	70.1749	0.005	66.4154	31.7905	27.666

Рисунок 61 – Табличные вкладки проекта с промежуточными DataFrame и результатами расчета

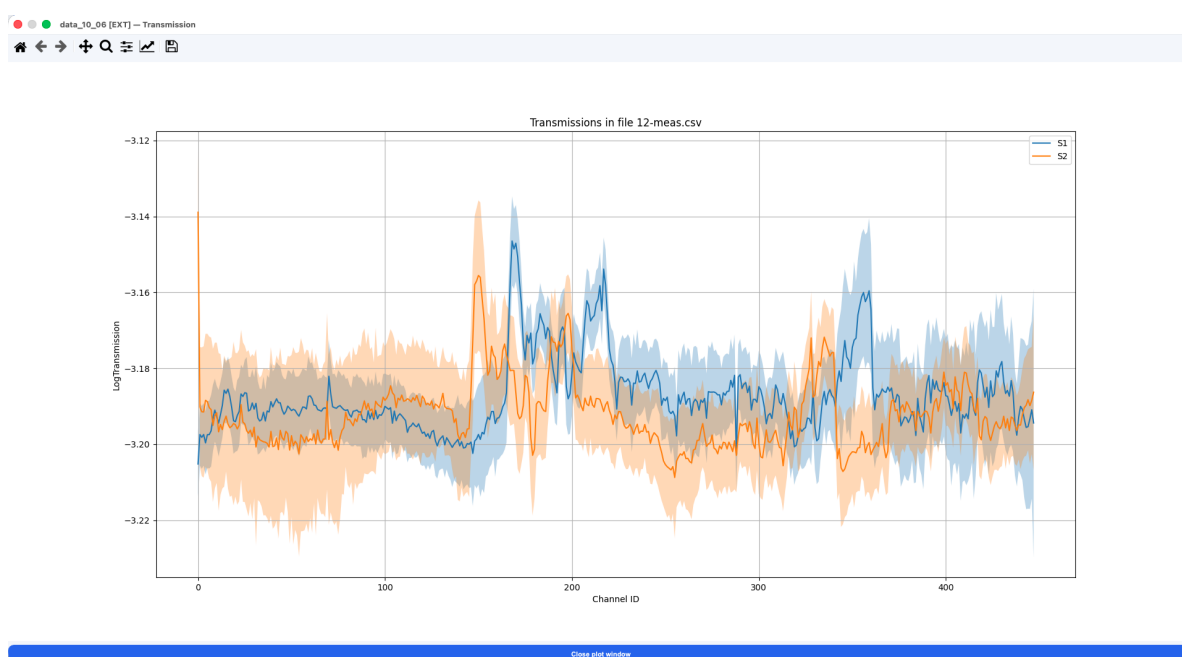


Рисунок 62 – Полноэкранное окно просмотра графика FullscreenPlotDialog

Кнопка **Recalculate selected** запускает повторный расчет только для выбранного типа данных: чтение сигнала, расчет средних значений, расчет EХТ, трансмиссии или калибровочной кривой. Кнопка **Dump** вызывает нативный метод `dump()` у backend-объекта проекта. Логи обработчиков выводятся в нижнюю область главного окна, что упрощает диагностику ошибок открытия файлов, неверных масок и проблем расчетов.

Таким образом, текущая версия программного комплекса уже соответствует выбранной архитектуре backend-библиотека + GUI. Backend отвечает за воспроизводимые вычисления и экспорт результатов, а frontend обеспечивает управляемый интерактивный сценарий работы: открыть проект, вы-

брать толщину и тип графика, проверить промежуточные таблицы, пересчитать нужный этап и сформировать дампы результатов. Такое разделение уменьшает связность кода и позволяет развивать расчетные алгоритмы и интерфейс независимо друг от друга.

4.4 Перспективы доработки программного комплекса

Разработанная версия программного комплекса решает основные задачи чтения, визуализации и калибровочной обработки экспериментальных данных, однако дальнейшее применение на расширенном наборе измерений требует развития как расчетной части, так и пользовательского интерфейса. Перспективы доработки можно разделить на несколько направлений.

Первое направление связано с развитием расчетных алгоритмов backend. Необходимо продолжить уточнение моделей геометрической поправки и учета рассеянного излучения, поскольку именно эти эффекты ограничивают точность восстановления профиля толщины при переходе от простых эталонных образцов к более сложным измерительным конфигурациям. Также требуется расширить процедуры контроля качества данных: автоматическое выявление нестабильных каналов, проверку корректности ZERO/INF-состояний, диагностику резких скачков сигнала, оценку применимости выбранных временных окон и формирование предупреждений при выходе параметров за допустимые пределы. Это позволит использовать программный комплекс также как средство первичной валидации измерительного сеанса.

Второе направление относится к развитию графического интерфейса. В текущей версии уже реализованы открытие проектов, построение основных графиков, просмотр промежуточных таблиц и запуск отдельных этапов пересчета. Следующим шагом является улучшение удобства работы: сохранение последних открытых проектов, шаблонов параметров и состояния интерфейса, фильтрация и поиск по табличным данным, индикация прогресса длительных расчетов и более подробные сообщения об ошибках. Для больших наборов файлов также полезно вынести тяжелые операции чтения и пересчета в фоновые задачи, чтобы интерфейс оставался отзывчивым во время пакетной обработки.

Отдельным перспективным направлением является интеграция калиб-

ровочного комплекса с последующими алгоритмами восстановления профиля. В текущей архитектуре backend уже формирует таблицы трансмиссий, калибровочные точки и параметры аппроксимации, поэтому следующим логичным этапом является добавление модуля, который будет использовать эти результаты для расчета профиля толщины неизвестных образцов или экспериментальных сечений. Такой модуль должен учитывать выбранную калибровочную зависимость, геометрическую поправку, неопределенности трансмиссии и состояние отдельных каналов. В дальнейшем это позволит перейти от анализа калибровочных измерений к единому циклу: открыть эксперимент, проверить качество данных, построить калибровку, восстановить профиль и сформировать отчет.

Наконец, для регулярного использования программного комплекса необходимо развивать инженерную инфраструктуру проекта. К числу важных задач относятся подготовка набора тестовых данных и автоматических проверок для ключевых расчетных функций, документирование форматов входных файлов и дампов, сборка исполняемой версии через PyInstaller, а также описание типовых сценариев работы пользователя. Реализация этих доработок повысит надежность комплекса, упростит его передачу и создаст основу для применения программы при последующих экспериментальных кампаниях на стенде профилемера.

Заключение

В ходе работы был подготовлен и исследован программно-методический комплекс для отладки и калибровки детектирующей системы экспериментального стенда профилемера горячего проката. Рассмотрены физические основы радиометрического метода неразрушающего контроля, особенности применения рентгеновского излучения для измерения толщины металлического проката и основные принципы построения калибровочных зависимостей.

Описана конструкция экспериментального стенда в НИЯУ МИФИ. Показано, что стенд включает две рентгеновские трубки COMET MXR 225 02 FB, высоковольтные генераторы Gulmay CP225 1/28, коллиматоры, обтюратор, магазин стандартов, калибратор-тележку, систему радиационной защиты, линейку из 448 сцинтилляционных детекторов и систему сбора данных. Особое внимание уделено детектирующей системе, поскольку стабильность ее характеристик напрямую определяет точность восстановления профиля толщины.

Выполнен анализ работоспособности линейки детекторов. По данным темновых измерений определены устойчивые режимы работы, рекомендованы экспозиции не более 50 мс и чувствительности 4–7, а также подтверждена необходимость охлаждения активной области. При анализе трансмиссий выявлены аномальные каналы и области, требующие контроля состояния детекторных сборок и геометрии нижнего плеча.

Исследована работа рентгеновских источников и режима внешней синхронизации. Для обтюлятора выбран рабочий режим с экспозицией 3 мс, позволяющий избежать захвата края пучка и роста RMS сигналов S1 и S2. Показано, что форма трансмиссий воспроизводится при изменении чувствительности и коллимации, однако конструктивные элементы нижнего плеча, включая титановую крышку, заметно влияют на профиль сигнала.

Разработана и проверена методика внешней калибровки «проездом». Определены характерные ширины окон на временной развертке сигнала. Показано, что зависимость центра окна от номера канала хорошо описывается линейной функцией, а точность определения положения тележки составляет порядка 0.7 мм. Сравнение внешней и внутренней калибровок показало, что

внешняя калибровка дает более устойчивый результат и является наиболее перспективной для последующего восстановления профиля толщины.

По предварительным измерениям на образцах толщиной 3, 4 и 6 мм 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%. Основными направлениями дальнейшего повышения точности являются учет рассеянного излучения в калибровочных данных и уточнение моделей рассеяния для текущей геометрии стенда.

Разработан программный комплекс для обработки и визуального анализа калибровочных данных. Для выбора архитектуры выполнен сравнительный анализ нескольких вариантов, по результатам которого основным решением выбрана схема расчетная библиотека + графический интерфейс на языке Python3. Расчетная библиотека реализует чтение экспериментальных файлов, хранение параметров, расчет статистических характеристик, формирование ZERO/INF-состояний, расчет трансмиссий, построение калибровочных зависимостей и экспорт дампов результатов. Графическое приложение обеспечивает интерактивное открытие проектов, выбор режимов обработки, построение графиков, просмотр промежуточных таблиц и запуск отдельных этапов пересчета.

Сформулированы перспективы дальнейшей доработки программного комплекса. К основным направлениям относятся развитие алгоритмов контроля качества данных, уточнение геометрических и физических поправок, повышение воспроизводимости расчетов за счет сохранения конфигураций проекта, интеграция с алгоритмом восстановления профиля толщины и подготовка инфраструктуры для регулярного применения программы.

Таким образом, цель работы достигнута: разработан программный комплекс, обеспечивающий отладку и калибровку детектирующей системы экспериментального стенда профилемера горячего проката, а также выполнена его апробация на данных экспериментальных измерений. Полученные результаты подтверждают работоспособность выбранной методики и создают основу для дальнейшего развития алгоритмов восстановления профиля горячего проката.

Список литературы

- [1] Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement. — 4th ed. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2010. — 830 p.
- [2] Attix F. H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. — New York : Wiley-VCH, 1986. — 607 p.
- [3] Bushberg J. T. The Essential Physics of Medical Imaging / J. T. Bushberg, J. A. Seibert, E. M. Leidholdt, J. M. Boone. — 3rd ed. — Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins, 2012. — 1030 p.
- [4] Turner J. E. Atoms, Radiation, and Radiation Protection. — 3rd ed. — Weinheim : Wiley-VCH, 2007. — 586 p.
- [5] Gilmore G. Practical Gamma-ray Spectrometry. — 2nd ed. — Chichester : John Wiley & Sons, 2008. — 408 p.
- [6] Hubbell J. H. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest [Электронный ресурс] / J. H. Hubbell, S. M. Seltzer ; National Institute of Standards and Technology. — URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html> (дата обращения: 19.06.2026).
- [7] Berger M. J. XCOM: Photon Cross Sections Database [Электронный ресурс] / M. J. Berger, J. H. Hubbell, S. M. Seltzer [et al.] ; National Institute of Standards and Technology. — URL: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database> (дата обращения: 19.06.2026).
- [8] Radiation Technology Applications in Industry [Электронный ресурс] / International Atomic Energy Agency. — Vienna : IAEA. — URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/diif/Pages/Radiation-Technologies.aspx> (дата обращения: 19.06.2026).
- [9] Industrial Process Gamma Tomography. — Vienna : IAEA, 2008. — 81 p.

- [10] Radiotracer and Sealed Source Applications in Industry. — Vienna : IAEA, 2004. — 139 p.
- [11] ASTM E2737-10. Standard Practice for Digital Detector Array Performance Evaluation and Long-Term Stability. — West Conshohocken : ASTM International, 2010.
- [12] ISO 3497:2000. Metallic coatings — Measurement of coating thickness — X-ray spectrometric methods. — Geneva : International Organization for Standardization, 2000.
- [13] SIPRO Simultaneous Profile Gauge : brochure [Электронный ресурс] / Thermo Fisher Scientific. — URL: https://documents.thermofisher.com/TFS-Assets/CAD/brochures/SIPRO_BR.pdf (дата обращения: 19.06.2026).
- [14] Online Measurement and Control Systems for Metals Industry [Электронный ресурс] / Thermo Fisher Scientific. — URL: <https://www.thermofisher.com/> (дата обращения: 19.06.2026).
- [15] X-ray Thickness Measurement Systems [Электронный ресурс] / IMS Messsysteme GmbH. — URL: <https://www.ims-gmbh.de/> (дата обращения: 19.06.2026).
- [16] Thickness and Profile Measurement for Metals Industry [Электронный ресурс] / ABB. — URL: <https://global.abb/> (дата обращения: 19.06.2026).
- [17] Measurex Quality Control Systems for Flat Sheet Processes [Электронный ресурс] / Honeywell International Inc. — URL: <https://www.honeywellprocess.com/> (дата обращения: 19.06.2026).
- [18] Wang G. Improvement of high accuracy X-ray thickness gauge for metal plate / G. Wang, Y. Cai, L. Jiang, F. Wang, G. Dai // Metallurgical and Mining Industry. — 2015. — No. 9. — P. 1096–1100.
- [19] MXR-225 X-ray Tube : technical documentation [Электронный ресурс] / COMET Group. — URL: <https://www.comet-xray.com/> (дата обращения: 19.06.2026).

- [20] CP225 High Voltage Generator : technical documentation [Электронный ресурс] / Gulmay Ltd. — URL: <https://www.gulmay.com/> (дата обращения: 19.06.2026).
- [21] Lecoq P. Inorganic Scintillators for Detector Systems : Physical Principles and Crystal Engineering / P. Lecoq, A. Annenkov, A. Gektin, M. Korzhik, C. Pedrini. — Berlin : Springer, 2006. — 250 p.
- [22] Rodnyi P. A. Physical Processes in Inorganic Scintillators. — Boca Raton : CRC Press, 1997. — 240 p.
- [23] Moszyński M. Characterization of CdWO_4 scintillator for gamma-ray spectrometry / M. Moszyński, M. Balcerzyk, W. Czarnacki [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. — 2005. — Vol. 553. — P. 578–591.
- [24] Melcher C. L. Scintillation crystals for PET // Journal of Nuclear Medicine. — 2000. — Vol. 41, No. 6. — P. 1051–1055.
- [25] Roberts W. L. Hot Rolling of Steel. — New York : Marcel Dekker, 1983. — 1024 p.
- [26] Ginzburg V. B. Flat-Rolled Steel Processes : Advanced Technologies. — Boca Raton : CRC Press, 2009. — 384 p.
- [27] Ginzburg V. B. Steel-Rolling Technology : Theory and Practice. — New York : Marcel Dekker, 1989. — 791 p.
- [28] Townsend N. A. Continuous Casting. — London : Butterworth-Heinemann, 1990. — 250 p.
- [29] ASM Handbook. Vol. 14A : Metalworking : Bulk Forming. — Materials Park : ASM International, 2005. — 888 p.
- [30] Steel Castings Handbook. — 6th ed. — Materials Park : Steel Founders' Society of America, 1995.
- [31] de Boor C. A Practical Guide to Splines. — Rev. ed. — New York : Springer, 2001. — 346 p.

- [32] Press W. H. Numerical Recipes : The Art of Scientific Computing / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. — 3rd ed. — Cambridge : Cambridge University Press, 2007. — 1235 p.
- [33] Virtanen P. SciPy 1.0 : fundamental algorithms for scientific computing in Python / P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant [et al.] // Nature Methods. — 2020. — Vol. 17. — P. 261–272.
- [34] `scipy.interpolate.CubicSpline` [Электронный ресурс] / SciPy Developers. — SciPy Documentation. — URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.CubicSpline.html> (дата обращения: 19.06.2026).
- [35] Harris C. R. Array programming with NumPy / C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt [et al.] // Nature. — 2020. — Vol. 585. — P. 357–362.
- [36] McKinney W. Data Structures for Statistical Computing in Python // Proceedings of the 9th Python in Science Conference. — Austin, 2010. — P. 56–61.
- [37] Martin R. C. Clean Architecture : A Craftsman’s Guide to Software Structure and Design. — Boston : Prentice Hall, 2017. — 432 p.
- [38] Fowler M. Patterns of Enterprise Application Architecture. — Boston : Addison-Wesley, 2002. — 560 p.
- [39] Gamma E. Design Patterns : Elements of Reusable Object-Oriented Software / E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlissides. — Boston : Addison-Wesley, 1994. — 395 p.
- [40] Qt for Python Documentation [Электронный ресурс] / Qt Company. — URL: <https://doc.qt.io/qtforpython/> (дата обращения: 19.06.2026).
- [41] PyQtGraph Documentation [Электронный ресурс] / PyQtGraph Developers. — URL: <https://pyqtgraph.readthedocs.io/> (дата обращения: 19.06.2026).

- [42] PyInstaller Manual [Электронный ресурс] / PyInstaller Development Team. — URL: <https://pyinstaller.org/> (дата обращения: 19.06.2026).