

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 53.08, 539.1.06

**ОТЧЕТ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ОТЛАДКА  
АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ С МНОГОКАНАЛЬНЫМ  
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ ДЛЯ  
ПРОФИЛЕМЕРА ГОРЯЧЕГО ПРОКАТА»**

Студент

\_\_\_\_\_ Д. Е. Калашников

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. В. Хромов

Москва 2026

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Теоретическое введение</b>	<b>5</b>
1.1 Типы и характеристики ионизирующего излучения . . . . .	5
1.2 Источники фотонного излучения . . . . .	6
1.3 Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом . . .	7
1.4 Принципы работы приборов технологического контроля на ионизирующем излучении (на примере металлургической от- расли) . . . . .	10
<b>2 Анализ темновых токов фотодиодов</b>	<b>13</b>
2.1 Предмет и методика исследования . . . . .	13
2.2 Стабильность и основные характеристики . . . . .	13
2.3 Анализ частотных характеристик . . . . .	15
2.4 Выводы по результатам анализа . . . . .	16
<b>3 Анализ сигналов полной засветки</b>	<b>18</b>
3.1 Предмет и методика исследования . . . . .	18
3.2 Характеристики измерений в прямом пучке . . . . .	18
3.3 Анализ данных с металиическими пластинами . . . . .	20
3.4 Выводы по результатам анализа . . . . .	21
<b>4 Анализ процесса внешней калибровки «проездом»</b>	<b>23</b>
4.1 Модель и методология . . . . .	23
4.2 Результаты обработки данных . . . . .	25
<b>5 Заключение</b>	<b>30</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>31</b>

# ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой упор в промышленности идет на повышение эффективности расходования имеющихся ресурсов и удешевления процессов вкупе с сохранением (или улучшением) качества продукции. Одним из наиболее перспективных методов такого перехода является внедрение автоматизированных<sup>1</sup> систем управления технологическими процессами.

Типовая АСУ ТП состоит из 3 архитектурных уровней [1]:

- Функции получения и первичного преобразования информации о протекании технологических процессов и об оперативном состоянии оборудования.
- Функции регулирования, противоаварийной защиты и блокировок (в аппаратном плане этот уровень представлен ПЛК).
- Функции оперативного (диспетчерского) контроля и управления технологическими объектами.

Приборы, работающие на первом (еще называемом полевым) уровне, представляют собой датчики, детекторы, анализаторы и т.п. Физические принципы их работы разнообразны и включают в себя:

- акустические;
- механические;
- тепловые;
- электромагнитные;
- оптические;
- на основе ионизационного излучения и др.

Датчики, принцип работы которых основан на использовании ионизационного излучения, традиционно используются во многих отраслях промышленности: от пищевой до металлургической и нефтехимической. Гибкость данного метода заключается в возможности использовать разные ви-

---

<sup>1</sup>Понятие «автоматизированный», в отличие от понятия «автоматический», подчёркивает необходимость участия человека в отдельных операциях, как в целях сохранения контроля над процессом, так и в связи со сложностью или нецелесообразностью автоматизации отдельных операций.

ды излучения в разных условиях, ориентируясь на требуемые целевые характеристики. Обычно используются следующие виды излучений:

- $\beta$ -излучение;
- $\gamma$ -излучение;
- рентгеновское.

Среди преимуществ данного метода [2]:

- надежность;
- быстродействие;
- универсальность.

Большая часть применяемого оборудования на этом принципе является зарубежной, а отечественные аналоги либо не обеспечивают необходимый функционал, либо вовсе отсутствуют на рынке. Критическим является тот факт, что все приборы, использующие в своей основе ИИ, обладают ограниченным сроком службы, после которого требуется либо замена, либо сервис генерирующих излучение элементов. Создание отечественных приборов технологического контроля, использующих ионизирующее излучение, является стратегически важной задачей для обеспечения экономического суверенитета страны. **Целью настоящей работы** является разработка алгоритмов восстановления данных для работы с экспериментальным стендом проофилемера горячего проката для Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь».

Поскольку проект по разработке алгоритмов для заданного прибора является многоуровневым и требует проведения экспериментальных сеансов перед обработкой данных, были поставлены следующие подготовительные **задачи**:

- проверка общей стабильности линейки фотодетекторов путем анализа темновых шумов фотодиодов;
- проверка стабильности рентгеновских излучателей, а также линейки фотодетекторов в состоянии полной засветки;
- Проверка возможности процесса калибровки «проездом» и сравнение этого метода со «статичной» калибровкой.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

## 1.1 ТИПЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ионизирующим считается любое излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию в нем ионов. Это происходит, поскольку излучение способно выбивать электроны из атомов вещества. По этой причине к ИИ не относятся виды излучения, энергия которых недостаточна для ионизации (например, видимый свет или лазерное излучение). [3]

По своей природе ИИ является потоком определенных частиц, в зависимости от масс и зарядов которых можно выделить несколько типов излучения:

- тяжелые заряженные частицы, к ним относятся  $\alpha$ -частицы, протоны и др.;
- легкие заряженные частицы: электроны и позитроны;
- фотонное излучение: рентгеновское излучение и  $\gamma$ -излучение;
- нейтроны различных энергий.

### Основные характеристики ИИ:

#### 1) Энергия излучения

В зависимости от энергии частиц излучение бывает *моноэнергетическим* (в случае, если все частицы обладают одинаковой кинетической энергией) и *немоноэнергетическим*. От энергии излучения зависят процессы, происходящие по мере распространения излучения. Для немонаэнергетического ИИ энергия численно характеризуется следующей величиной.

#### 2) Спектр частиц

Это зависимость числа частиц излучения, вылетающих в телесный угол  $d\Omega = \sin\theta d\phi d\theta$  и имеющих энергию в диапазоне  $(E; E + dE)$ , от

телесного угла  $d\Omega$  и энергии  $E$ :

$$\frac{d^2 N}{d\Omega dE}$$

3) Угловое распределение частиц

Является интегралом спектра частиц по всем энергиям:

$$\rho(\theta, \phi) = \frac{dN}{d\Omega} = \int \frac{d^2 N}{d\Omega dE} dE$$

4) Энергетический спектр частиц

Наоборот, является интегралом спектра частиц по всем направлениям (по полному допустимому телесному углу в имеющейся геометрии):

$$\rho(E) = \frac{dN}{dE} = \int \frac{d^2 N}{d\Omega dE} d\Omega$$

5) Интенсивность излучения

Задаёт количество частиц ИИ, переходящих ориентированную площадку в пространстве за интервал времени  $dt$ , отнесенное к величине этого интервала:

$$I = \frac{dN}{dt}$$

Интенсивность сохраняет энергетическое и угловое распределение потока частиц в данный момент времени, однако является мгновенной величиной, а потому чаще применяется в теоретических выводах и расчетах, чем интегральное количество зарегистрированных частиц.

В рамках настоящей работы в дальнейшем мы будем рассматривать исключительно фотонное ИИ (то есть  $\gamma$ - и рентгеновское излучение).

## 1.2 ИСТОЧНИКИ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К фотонному излучению относится [3]:

- $\gamma$ -излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер, при ядерных превращениях или аннигиляции частиц;

- тормозное излучение при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц (имеет непрерывный энергетический спектр);
- характеристическое излучение при изменении энергетических состояний электронных оболочек атомов (имеет дискретный спектр);
- рентгеновское излучение (тормозное и характеристическое).

Рассмотрим подробнее рентгеновское излучение. Оно генерируется в основном при помощи специальных излучателей («рентгеновских трубок»). Концептуальная схема рентгеновской трубки представлена на рисунке 1 [4].

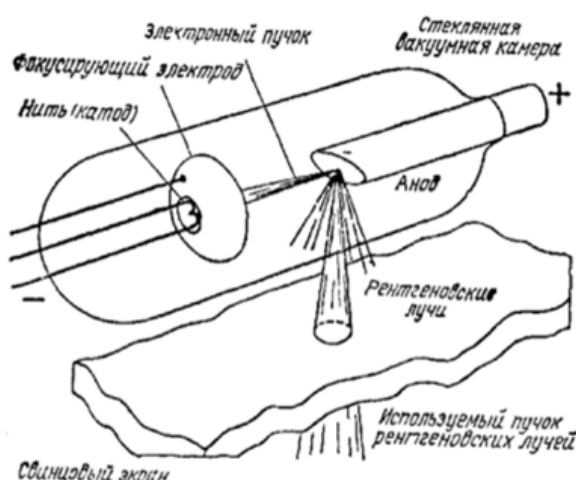


Рисунок 1 — схема работы рентгеновского излучателя

Спектр и интенсивность рентгеновского излучения, получаемого с такой трубки, зависит от разности потенциалов между катодом и анодом. Типичные значения напряжения составляют порядка 60–80 кВ, но для получения жесткого излучения могут использоваться источники напряжения  $> 200$  кВ. Интенсивность рентгеновского излучения от трубки может достигать  $10^{10} \frac{\text{квантов}}{\text{с}}$ , что на несколько порядков выше предела  $\gamma$ -излучения. Спектр имеет непрерывный характер и ни в каком приближении не может считаться монохроматическим:

### 1.3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Взаимодействие ИИ с веществом зависит от типа излучения, а также его энергии. Поскольку ИИ является потоком определенных частиц,

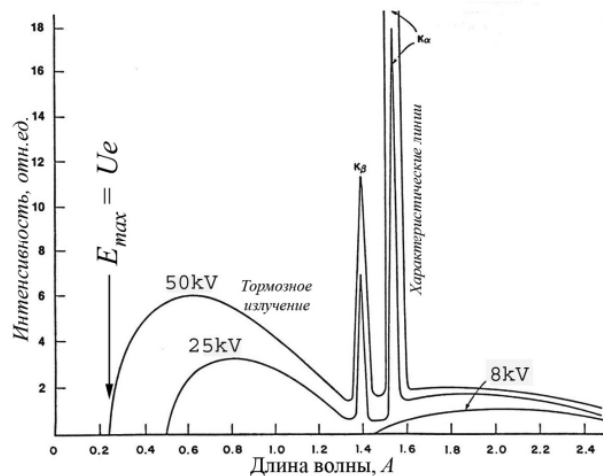


Рисунок 2 — типовой спектр рентгеновского излучения

то результирующая картина может складываться из отдельных актов взаимодействия переносчиков с атомами вещества. Вместе с тем, при относительно низких энергиях полезным может быть и подход, связанный с рассмотрением взаимодействия как непрерывного процесса.

Рассматривая рентгеновское излучение энергией менее 1.022 МэВ, мы можем выделить два основных вида взаимодействия (не считая побочные эффекты в виде отражения, преломления, интерференции, флюоресценции и т.п.) [5]:

#### 1) Поглощение

Предполагая, что доля излучения, поглощенного в тонком слое  $\delta x$  вещества, пропорциональна толщине этого слоя, можно получить следующий закон поглощения рентгеновских лучей:

$$\frac{dI}{I_0} = -\mu dx,$$

Здесь  $\mu(Z, E)$  — линейный коэффициент ослабления, зависящий от элементного состава среды  $Z$  и энергии излучения  $E$ . Тогда интенсивность ослабленного луча задается выражением:

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

#### 2) Рассеяние

Эксперименты по измерению интенсивности рентгеновских лучей вокруг просвечиваемого слоя показывают, что кроме основного луча из



просвечиваемого слоя также наблюдаются лучи, не совпадающие с ним по направлению. Такие лучи называют *рассеянными*. В зависимости от энергии возможно два канала рассеяния: когерентное (томсоновское) и некогерентное (комптоновское). При низких энергиях излучения преобладает именно когерентный канал.

Из теории Томсона известно, что для единичного акта взаимодействия электрона и кванта излучения верна формула:

$$\sigma_e^{(1)} = \frac{I_r^{(1)}}{I_0} = \frac{8\pi e^4}{3m^2 c^2} \text{ (в СГС)}$$

Отсюда можем получить линейный коэффициент рассеяния (по аналогии с линейным коэффициентом поглощения):

$$\sigma = Zn \frac{8\pi e^4}{3m^2 c^2},$$

где  $Z$  - порядковый номер химического элемента вещества,  $n$  - концентрация атомов в веществе,  $e, m$  - заряд и масса электрона соответственно.

Выражение для интенсивности рассеянных рентгеновских лучей:

$$I_r(x) = I_0(1 - e^{-\sigma x}) \quad (1.2)$$

Заметим, что коэффициент рассеяния входит в коэффициент ослабления по определению последнего.

Все указанные величины были введены для монохроматического излучения. Однако исходно рентгеновское излучение является немонахроматическим, поэтому для получения полных эффектов взаимодействия требуется проинтегрировать формулы (1.1) и (1.2) с энергетическим спектром исходного излучения:

$$I(x) = \int \frac{dI_0}{dE} e^{-\mu(E)x} dE \quad (1.1^*)$$

$$I_r(x) = \int \frac{dI_0}{dE} (1 - e^{-\sigma(E)x}) dE \quad (1.2^*)$$

## 1.4 ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПРИБОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ИОНИЗИРУЮЩЕМ ИЗЛУЧЕНИИ (НА ПРИМЕРЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ)

В технологическом процессе получения листового проката металла важную роль играет контроль его параметров в процессе производства. Это имеет как экономические последствия (несоответствие проката паспортным данным приводит к потере 80% его стоимости), так и технологические (АСУ ТП использует данные о прокате для подстройки скорости вращения валов, например). Прибором, который используется в большинстве таких прокатных станов, является профилемер проката (горячего или холодного – в зависимости от того, на каком узле он расположен). Схема работы профилемера представлена на рисунке ниже.

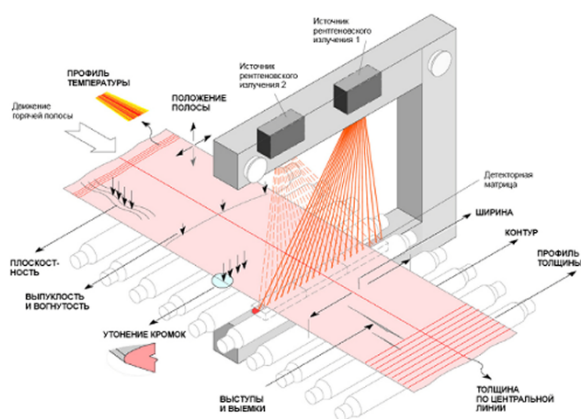


Рисунок 3 — схема работы профилемера горячего проката

Структурно профилемер состоит из двух частей:

- источники рентгеновского излучения, находящиеся на верхней части его опорной рамы;
- линейка детекторов ионизирующего излучения, находящаяся под прокатным станом (на нижней части рамы).

Структура работы полного алгоритма восстановления параметров проката в таком приборе является слишком сложной и не является частью данной работы (4). Тем не менее, рассмотрим отдельную часть рабо-

ты алгоритма – его начальную часть, по грубому восстановлению толщины проката по центру.

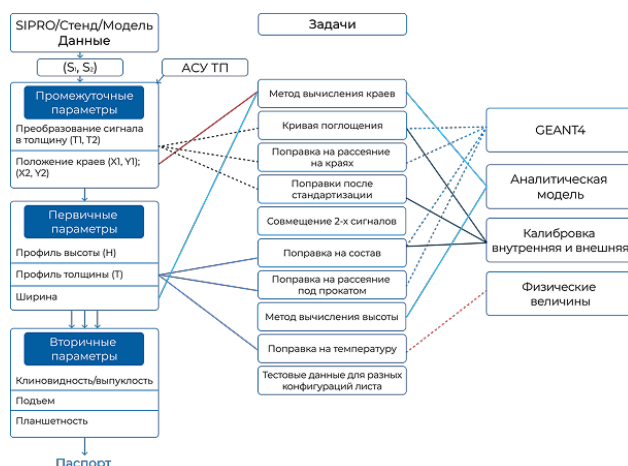


Рисунок 4 — схема работ над алгоритмом работы профилемера

Основной величиной, используемой при работе алгоритма, является т.н. трансмиссия – отношение, определяющее степень поглощения излучения веществом между генерирующими источниками и линейкой:

$$\tau = \frac{S - S_{inf}}{S_{zero} - S_{inf}}, \quad (1.3^*)$$

где  $S$  – сигнал с линейки в данный момент времени,  $S_{zero}$  – максимальный сигнал с линейки, то есть в состоянии, когда между источником и детекторами имеются лишь конструкционные элементы прибора,  $S_{inf}$  – минимальный сигнал с линейки, то есть в отсутствие излучения.

Далее рассчитанное значение трансмиссии сравнивается с точками калибровочной кривой – рассчитанными ранее по эталонным образцам трансмиссиями – для восстановления толщины проката. Вид такой калибровочной кривой приведен на 5.

Таким образом, для получения грубой оценки толщины проката, алгоритму требуется три калибровочных величины:

- сигнал  $INF$  – минимальный сигнал, соответствующий темновым токам;
- сигнал  $ZERO$  – максимальный сигнал, без калибровочных образцов;
- набор сигналов  $REF$  – референсные сигналы для расчета трансмиссий для получения калибровочной кривой.

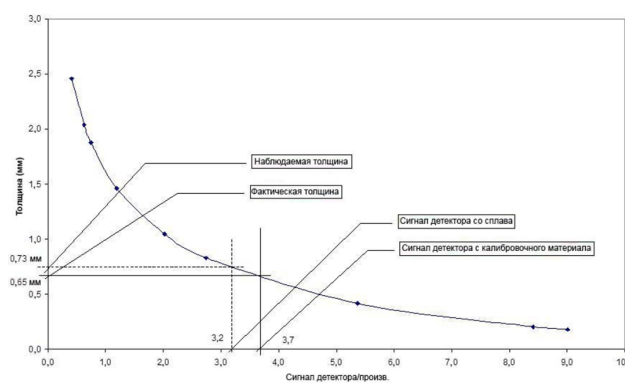


Рисунок 5 — пример калибровочной кривой из документации профилемера ThermoFisher Scientific

В дальнейшем в работе пойдет речь об анализе трех данных типов сигналов.

## 2 АНАЛИЗ ТЕМНОВЫХ ТОКОВ ФОТОДИОДОВ

### 2.1 ПРЕДМЕТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве предмета исследования используются измерения темного тока (сигналов с линейки в отсутствие рентгеновского излучения от источников) с экспозициями в диапазоне (4; 10; 20; 50; 200; 1000) мс, 8 различными настройками усиления и разрядностью АЦП 16/20 бит при температуре (6; 10; 15; 20) °С. Всего проанализировано 448 фреймов данных по 448 каналов, то есть более 200000 временных разверток сигналов.

### 2.2 СТАБИЛЬНОСТЬ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### Операционные диапазоны

При анализе поведения линейки во всех режимах выявлено, что на высоких усилениях наблюдается нестабильное поведение: отдельные каналы возвращают исключительно нулевые значения или демонстрируют сильную нестабильность. Визуальный анализ позволил определить оптимальные диапазоны чувствительности (величина, обратная к усилению, выраженная в условных единицах) для каждой экспозиции:

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

Эти значения не зависят от разрядности АЦП.

#### Средние значения сигналов

Для каждого эксперимента рассчитаны среднее арифметическое от всех средних значений каналов (синяя линия на графиках), а также стандартное отклонение (представлено как полоса  $\pm 2\sigma$ ). Результаты сведены в таблицу (для 16 бит, 6 °С):

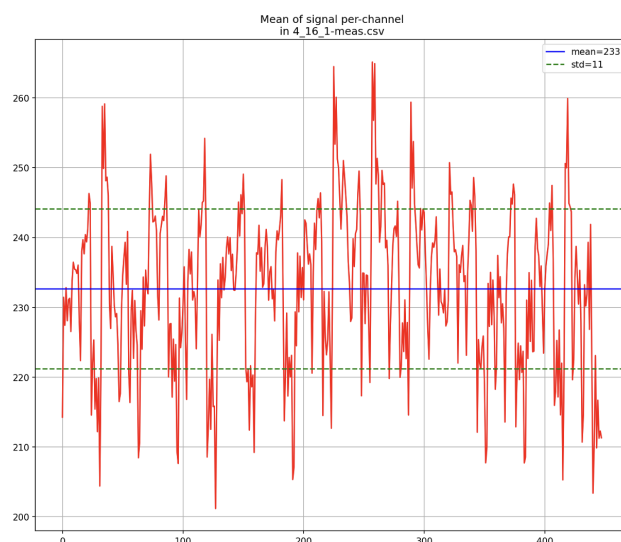


Рисунок 6 — зависимость средних значений сигналов от номера канала в эксперименте с 4 мс, 16 бит, чувствительностью 1

	4 мс	10 мс	50 мс	200 мс	1000 мс
1	$244 \pm 10$	$380 \pm 30$	$260 \pm 12$	$223 \pm 19$	$170 \pm 70$
2	$237 \pm 6$	$253 \pm 7$	$187 \pm 12$	$232 \pm 10$	$200 \pm 40$
3	$238 \pm 4$	$268 \pm 8$	$258 \pm 6$	$232 \pm 7$	$210 \pm 30$
4	$235 \pm 4$	$207 \pm 8$	$252 \pm 5$	$232 \pm 6$	$220 \pm 20$
5	$235 \pm 4$	$231 \pm 4$	$235 \pm 3$	$233 \pm 4$	$221 \pm 16$
6	$234 \pm 4$	$226 \pm 3$	$235 \pm 4$	$233 \pm 4$	$221 \pm 14$
7	$234 \pm 4$	$224 \pm 3$	$225 \pm 3$	$233 \pm 3$	$222 \pm 12$

Выявленные тренды:

- 1) Среднее значение темнового тока убывает с уменьшением чувствительности (где 7 — наименьшая чувствительность).
- 2) Среднее значение оказывается меньше на больших экспозициях.
- 3) Отклонение значений средних в каналах от общего среднего уменьшается по мере уменьшения чувствительности.
- 4) Наиболее стабильны значения средних для экспозиции 4 мс.

## Стандартные отклонения сигналов

Стандартное отклонение в каждом канале рассчитывалось по всем 1000 значениям сигнала. Затем, аналогично средним, рассчитаны среднее стандартное отклонение и его стандартное отклонение (для 16 бит, 6 °C):

	4 мс	10 мс	50 мс	200 мс	1000 мс
1	$74 \pm 14$	$13 \pm 2$	$110 \pm 20$	$12 \pm 2$	$31 \pm 9$
2	$33 \pm 6$	$32 \pm 6$	$19 \pm 4$	$6.7 \pm 1.4$	$16 \pm 4$
3	$24 \pm 5$	$12 \pm 2$	$28 \pm 5$	$4.7 \pm 1.2$	$11 \pm 2$
4	$18 \pm 3$	$7.8 \pm 1.5$	$23 \pm 4$	$3.7 \pm 1.1$	$8 \pm 2$
5	$15 \pm 3$	$20 \pm 4$	$22 \pm 4$	$3.1 \pm 0.9$	$6.7 \pm 1.7$
6	$12 \pm 2$	$15 \pm 3$	$17 \pm 3$	$2.7 \pm 0.8$	$5.6 \pm 1.4$
7	$11 \pm 2$	$8.8 \pm 1.7$	$13 \pm 3$	$2.4 \pm 0.7$	$4.8 \pm 1.2$

Наиболее стабильный режим работы — экспозиция 4 мс, где наблюдается постепенное уменьшение как среднего стандартного отклонения, так и его дисперсии с уменьшением чувствительности.

## 2.3 АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

### Автокорреляционный анализ

Проведен анализ автокорреляционной функции (АКФ) как по времени, так и по номеру канала. Основные выводы:

#### По времени:

- На низких экспозициях (4 мс) наблюдаются четкие колебательные моды.
- На 10 мс наблюдаются квазилинейные тренды (предположительно, части синусоид низких частот).
- На экспозициях 50 мс преобладают колебательные тренды, линейные тренды не выявлены.

#### По каналам линейки:

- Обнаружена сильная периодичность значений темнового тока в линейке.
- Период составляет 8–16 в зависимости от режима работы.
- С повышением чувствительности при низких экспозициях каждый второй пик вырождается, период стремится к 32.

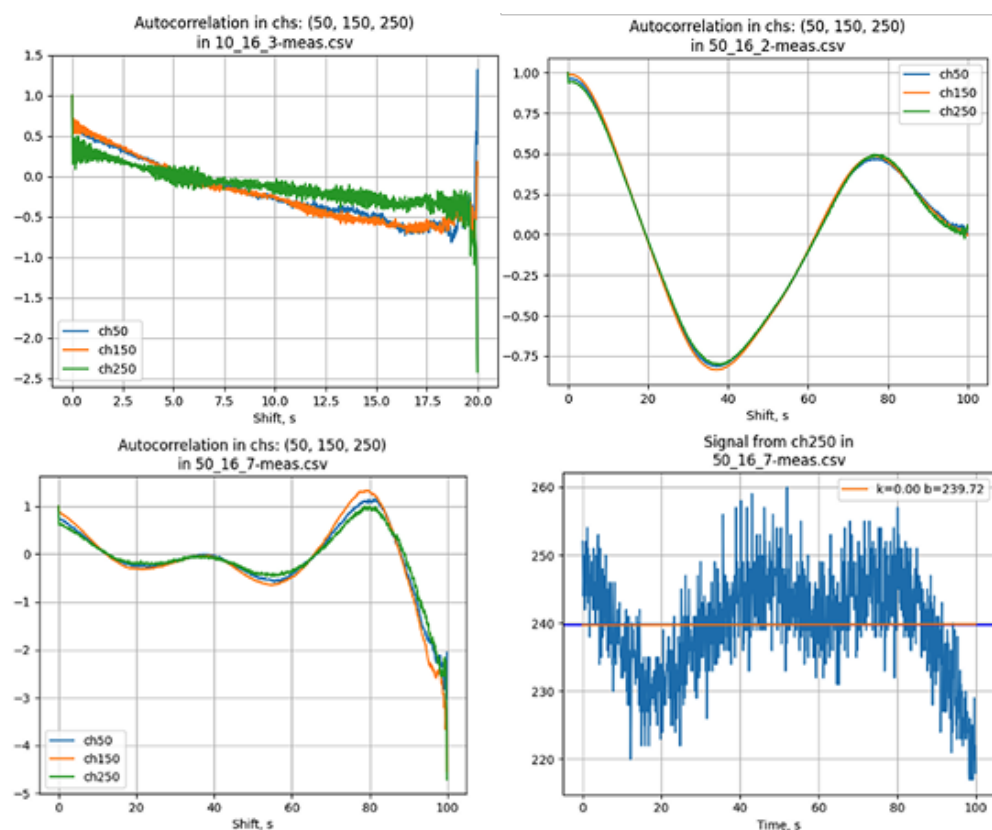


Рисунок 7 — Графики автокорреляционных функций по моменту времени

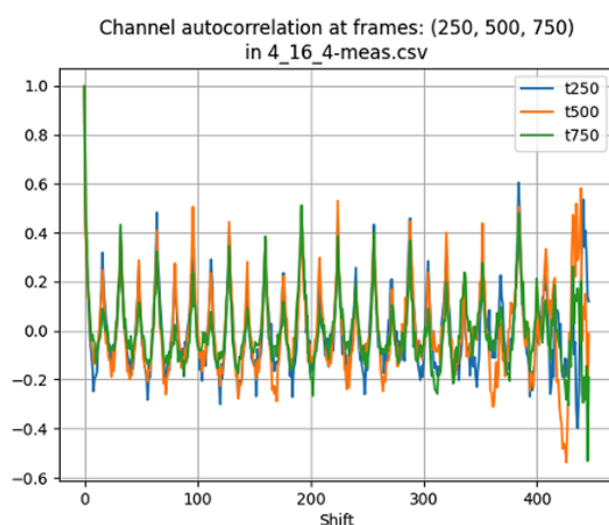


Рисунок 8 — График автокорреляционной функции по номеру канала

## 2.4 ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА

На основе проведенного анализа рекомендуется:

- 1) Использовать линейку с экспозициями не более 50 мс и чувствительностями 4–7.
- 2) Учитывать периодическую структуру свойств фотоприемников (пе-



риод 8–32) при разработке алгоритмов коррекции.

- 3) Для минимизации стандартного отклонения использовать режим 4 мс, где колебательная зависимость наиболее отчетливо видна и может быть скомпенсирована.
- 4) Осторожно относиться к температурным вариациям: при комнатной температуре наблюдается более сильный разброс значений.

# **3 АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ПОЛНОЙ ЗАСВЕТКИ**

## **3.1 ПРЕДМЕТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

В качестве предмета исследования используются сигналы с линейки при постоянных параметрах 16 бит, чувствительности 7 и температуре 6 °С, а также в двух режимах:

- измерения с прямым пучком в низком положении и различной экспозицией;
- измерения со стальными и алюминиевыми пластинами на рабочей высоте и различной экспозицией.

## **3.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРЯМОМ ПУЧКЕ**

### **Морфология сигналов**

При сравнении форм профилей, отнормированных на максимум, выявлено, что в интервале 80–390 каналов профили практически не отличаются между собой для абсолютно разных режимов измерений. Это указывает на универсальный профиль облучения и однородность свойств детекторов в центральной области линейки.

### **Периодичность свойств детекторов**

При анализе автокорреляционной функции по номеру канала обнаружены колебания с периодом около 8 каналов на плато рентгена. Этот период согласуется с наблюдениями в темновом токе при 50 мс экспозиции.

### **Анализ временных трендов**

В измерениях были выявлены следующие тренды

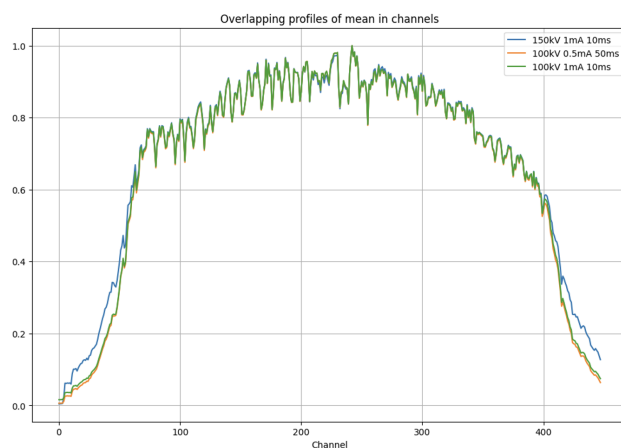


Рисунок 9 — наложенные формы профилей среднего от номера канала для разных режимов измерений

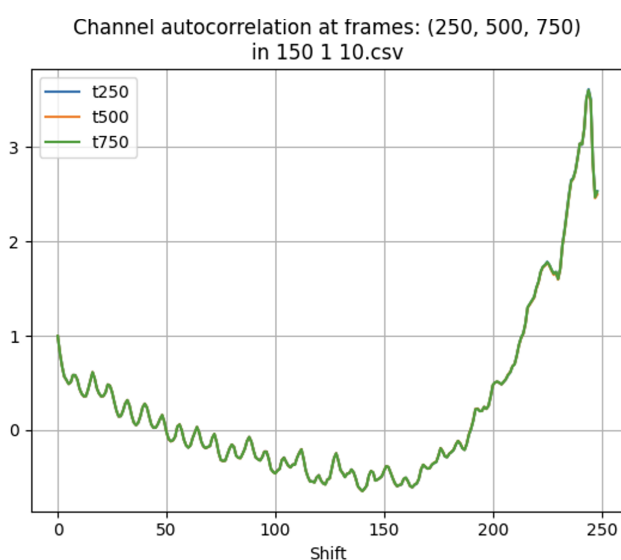


Рисунок 10 — АКФ по номеру канала (на плато рентгена) для сигнала в фреймах 250, 500, 750 в эксперименте с 10 мс, 150 кВ, 1 мА

- В некоторых измерениях наблюдаются линейные тренды как на краях, так и на плато. С повышением экспозиции эти тренды не всегда пропадают, что отличает их от квазилинейных трендов в темновом токе.
- Колебания с частотой 1 Гц ярко выражены и проявляются во всех режимах.
- Большинство временных изменений некоррелированы (как и в случае с темновым током).

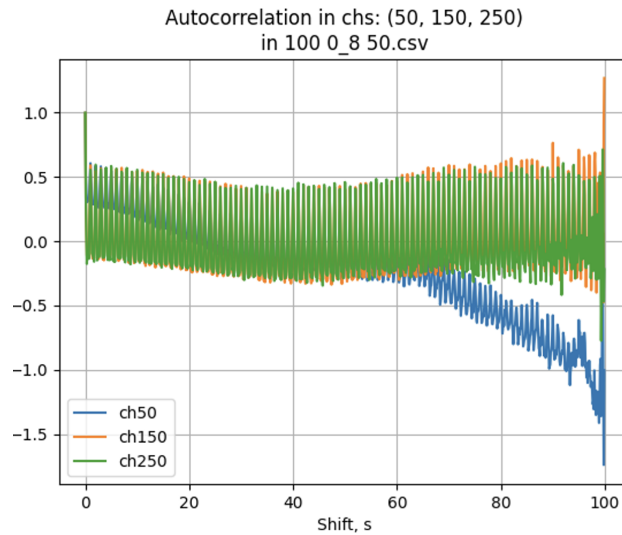


Рисунок 11 — АКФ по времени для сигнала в каналах 50, 150 и 250 в эксперименте с 50 мс, 100 кВ, 0.8 мА

## Спектральный состав

Фурье-анализ выявляет следующие колебательные моды:

- Частоты 1, 2, 3, 4 Гц проявляются независимо от значений тока и напряжения.
- Низкочастотные колебания ( $< 0.01$  Гц) соответствуют найденным в анализе темнового тока.
- Амплитуда этих колебаний соизмерима со стандартным отклонением в каналах.

## 3.3 АНАЛИЗ ДАННЫХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛАСТИНАМИ

На профиле среднего сигнала отчетливо видны геометрические области, где находился металл. Ослабление сигнала составляет порядка 16 раз относительно прямого пучка в соседних каналах. Добавление двух пластин приводит к уменьшению сигнала примерно в 2.5 раза, демонстрируя принципиальную возможность определения толщины металла с определенной дискретностью.

Фурье-спектры на этих данных также показывают наличие целочисленных частот 1–7 Гц.

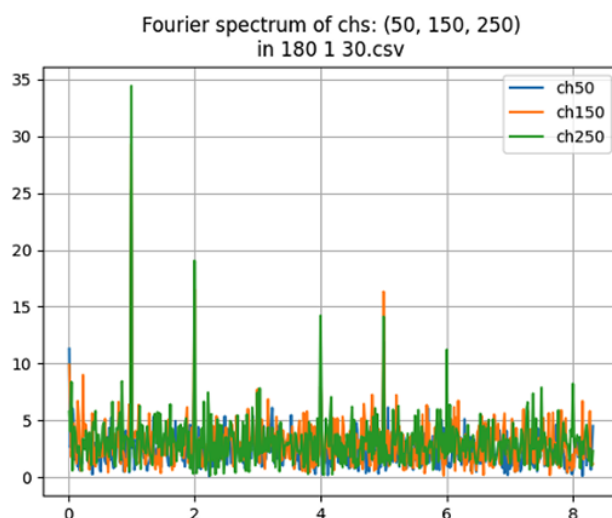


Рисунок 12 — Фурье-спектры сигналов в каналах 50, 150, 250 в эксперименте с 10 мс, 100 кВ, 0.5 мА

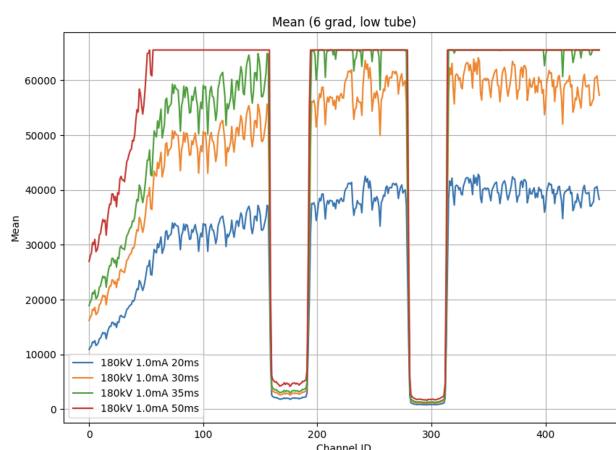


Рисунок 13 — зависимость среднего значения сигнала в канале от номера канала при разных режимах измерений

В целом, сравнительный анализ областей позволил определить оптимальный режим работы как экспозицию 30–35 мс при чувствительности 7.

### 3.4 ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА

- Выбранный изначально рентгеновский излучатель имеет собственные колебательные моды в целочисленных частотах 1–7 Гц, амплитуда которых соизмерима со стандартным отклонением в каналах. В том числе по этой причине было принято решение заменить его более стабильной продукцией производителя СОМЕТ.
- Линейные тренды, как и в случае с темновыми шумами, наблюдаются

в некоторых каналах при некоторых измерениях, четкая корреляция с параметрами эксперимента не установлена.

- На рабочей высоте излучателя оптимален режим с экспозицией 30–35 мс и чувствительностью 7.
- Принципиально возможно восстановить толщину вещества между излучателем и линейкой на текущем стенде.

# 4 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВНЕШНЕЙ КАЛИБРОВКИ «ПРОЕЗДОМ»

## 4.1 МОДЕЛЬ И МЕТОДОЛОГИЯ

Как было отмечено в 1.4, для восстановления параметров проката требуется набор референсных сигналов в случае использования эталонов. Процесс получения этих сигналов называется внешней калибровкой (далее для упрощения – калибровка).

Основным инструментом калибровки является «тележка» – металлический столик, используемый для переноса эталона вдоль линейки:

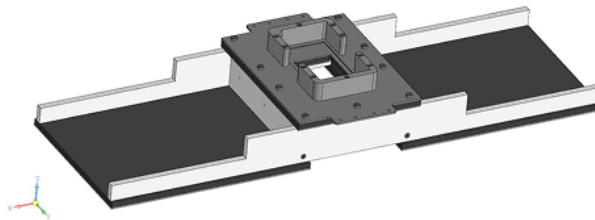


Рисунок 14 — 3D-модель тележки-столика (калибратора)

Разработанный алгоритм калибровки основан на двух ключевых предположениях:

- Скорость движения «тележки» постоянна во времени.
- Линейка однородна по длине (все детекторы имеют одинаковые размеры и равномерное расстояние друг между другом).

На основе этих предположений сформулирована теоретическая модель отклика одного детектора:

Здесь:

- *width* — временной интервал нахождения тележки над каналом;
- *innerwidth* — временной интервал нахождения окна тележки над каналом
- *center* и *innercenter* – центры временных интервалов (совпадают в идеальном случае)
- *window* — интервал для интегрирования и получения сигнала

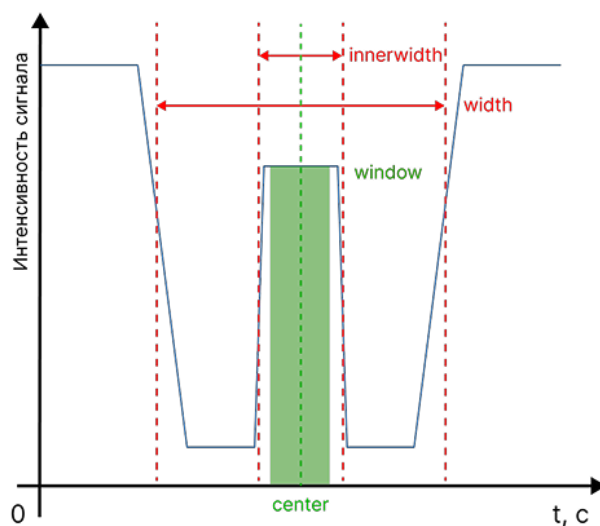


Рисунок 15 — модельный отклик детектора при проезде

## Предварительная очистка данных

При первичном просмотре данных были выявлены сильные выбросы. Разработан алгоритм очистки, который схематично приведен на 16:

- 1) Разделение данных на окна по 5 точек.
- 2) Обнаружение изолированных скачков, превышающих пороговое значение.
- 3) Выравнивание выброса до среднего значения в окне.

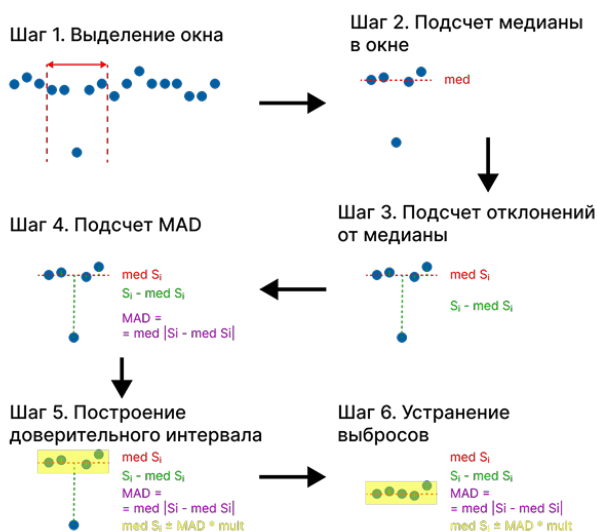


Рисунок 16 — алгоритм очистки данных от выбросов

В случае использования медианных методов время обработки достигает нескольких минут на один эксперимент.



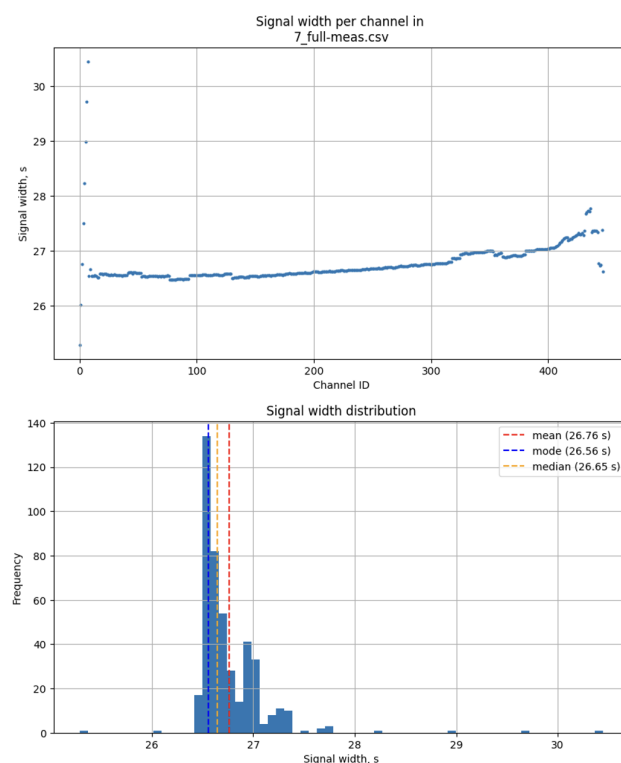


Рисунок 17 — графики зависимости среднего времени нахождения тележки над каналом и распределения фреймов по данному времени в измерениях с толщиной эталона 7 мм

## 4.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

### Ширины временных интервалов

Анализ распределений ширин показал верность гипотезы об относительном постоянстве времени прохождения тележки. Основные выбросы сконцентрированы в геометрических областях низких сигналов (края линейки).

Внешний интервал:

Толщина эталона, мм	Среднее выборочное, с	Медиана, с	Мода, с
0	26.74	26.65	26.48
1	26.83	26.77	26.48
7	26.76	26.65	26.56
16	26.73	26.65	26.48

Ширина внешнего интервала:  $(26.65 \pm 0.04)$  с

Внутренний интервал:

Ширина внутреннего интервала:  $(8.43 \pm 0.05)$  с

Толщина эталона, мм	Среднее выборочное, с	Медиана, с	Мода, с
0	8.36	8.38	8.40
1	8.44	8.44	8.43
7	8.46	8.46	8.41
16	8.44	8.47	8.50

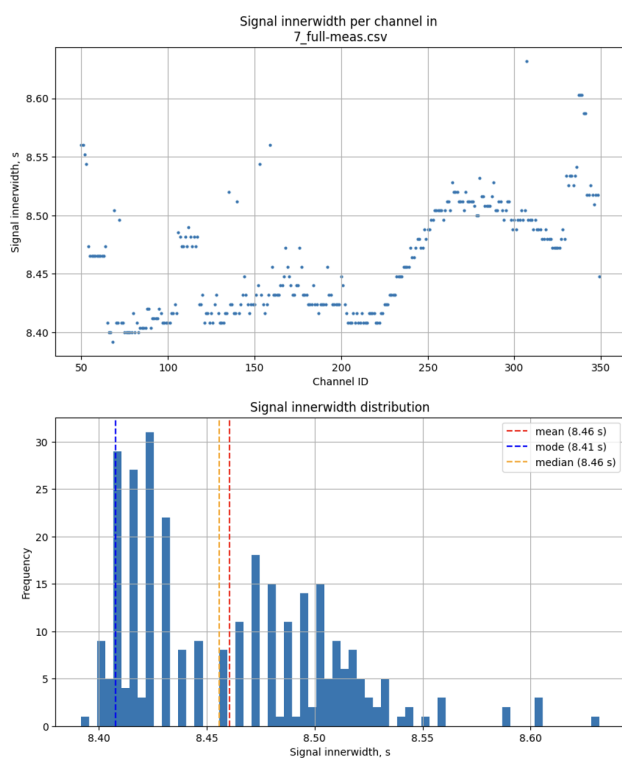


Рисунок 18 — графики зависимости среднего времени нахождения окна тележки над каналом и распределения фреймов по данному времени в измерениях с толщиной эталона 7 мм

Определение центра внутреннего окна оказывается менее надежно на крайних каналах, однако в центральной части сравнимо по точности с анализом внешнего интервала.

## Положение центров интервалов

Зависимость положения центра от номера канала демонстрирует линейное поведение, что соответствует равномерному движению тележки. Были определены коэффициенты линейной аппроксимации.

Внешний интервал:

Толщина, мм	Угловой коэффициент, с	Свободный член, с
0	0.744	11.866
1	0.747	11.984
7	0.745	11.987
16	0.744	11.869
Средние:	0.745	11.927

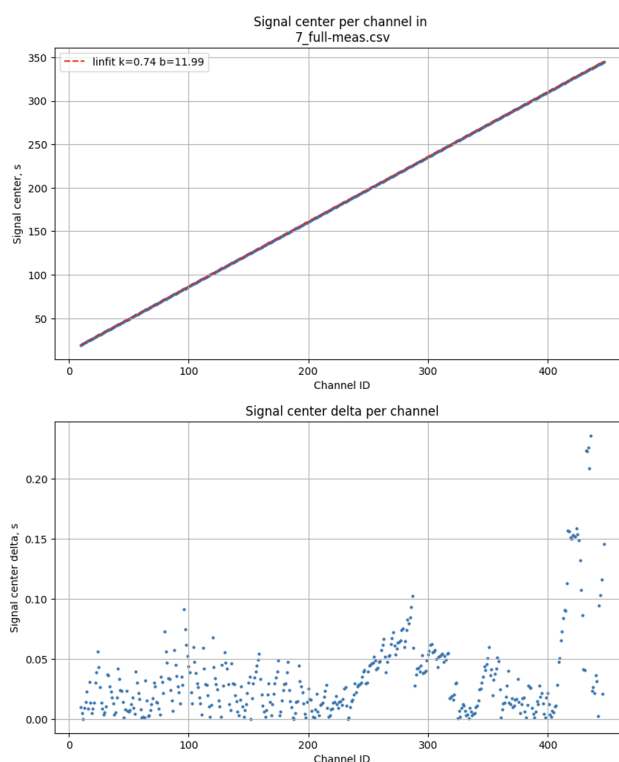


Рисунок 19 — графики зависимости положения центра внешнего временного интервала от номера канала и погрешности линейной аппроксимации в измерениях с толщиной эталона 7 мм

Отклонения восстановленных положений центра от фитирующей прямой составляют 0.1 с, что эквивалентно точности определения перемещения тележки в 0.7 мм.

## Сравнение методов

Оба метода (по внутреннему и внешнему окну) дают сопоставимые результаты. Различие между методами составляет не более 0.24% от максимального значения среднего в эксперименте. Метод по внешнему окну более надежен (менее чувствителен к ослаблению излучения на краях), метод по внутреннему окну более точен (захватывается меньше лишних точек).

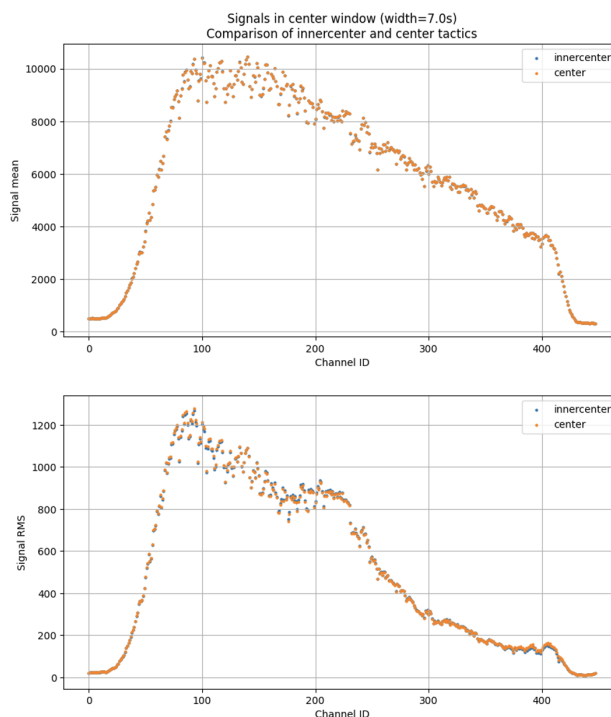


Рисунок 20 — графики зависимости среднего сигнала и его RMS в окне интегрирования от номера канала и отклонения средних по двум методам в измерениях с толщиной эталона 7 мм

## Зависимость от ширины окна интегрирования

Анализ показывает, что уменьшение ширины окна интегрирования приводит к снижению RMS сигнала и повышению надежности. Наиболее оптимальны ширины 6–7 с; использование 8 с приводит к резкому росту

RMS. В связи с этим может сделать вывод, что для повышения надежности калибровки необходимо выдерживать небольшие отступы (0.5–1 с) от краев внутреннего временного окна.

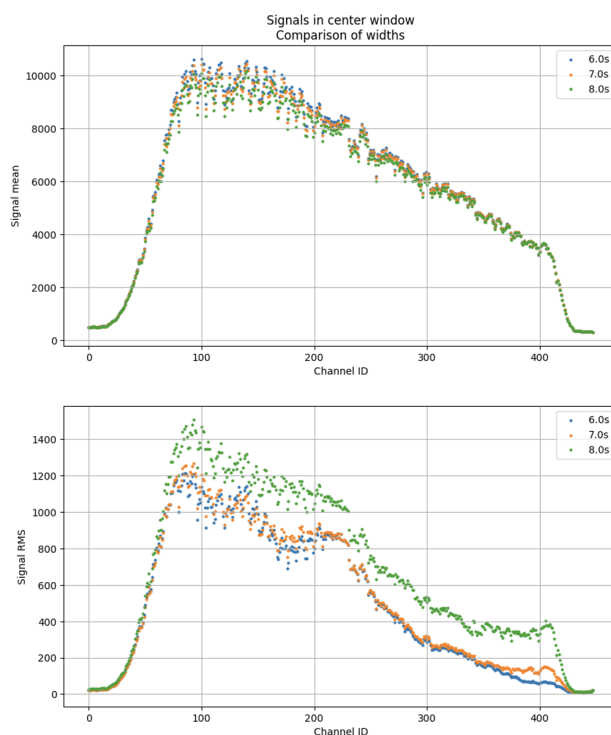


Рисунок 21 — графики зависимости среднего сигнала и его RMS в окне интегрирования от номера канала в зависимости от ширины окна интегрирования в измерениях с толщиной эталона 7 мм

## 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей НИР производилась обработка экспериментальных данных, полученных со стенда профилемера горячего проката, разрабатываемого по заказу ПАО «Северсталь».

Был проведен анализ темновых токов фотодиодов в составе линейки детекторов излучения, при помощи которых был первично определен наиболее стабильный режим работы линейки (с точки зрения усиления, битности АЦП и усиления).

Был проведен анализ сигналов линейки при облучении рентгеновским излучением. Определены существенные тренды, показаны существенные особенности рентгеновского излучателя СБК, а также выявлены специфические закономерности поведения линейки (периодичность по каналам (период 7–8), множественные временные колебания).

Была разработана и валидирована методика калибровки при непрерывном движении образца, обеспечивающая точность определения центра окна интегрирования на уровне 0.7 мм.

Дальнейшие шаги по реализации работы предполагают финализацию схемы проведения внешней калибровки и получение калибровочных кривых для тестирования работы алгоритма восстановления параметров. К этому этапу работ следует приступать только после окончательного размещения рентгеновских излучателей на стенде и утверждения схемы работы прибора с заказчиком.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Федоров Ю.* Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. Том 1. — ЛитРес, 2022. — ISBN 9785457651814.
2. *Мёрман Д., Шмид Й., Спагнул С.* Быстрое и точное определение уровня металла в кристаллизаторах машин непрерывного литья // Черные металлы. — 2012. — № 3. — С. 53—61.
3. *Черняев А. П.* Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. — Физматлит, 2004.
4. *Никитенков Н. Н.* Технология конструкционных материалов. Анализ поверхности методами атомной физики. — Общество с ограниченной ответственностью Издательство ЮРАЙТ, 2020.
5. *Павлинский Г.* Основы физики рентгеновского излучения. — Litres, 2022.