

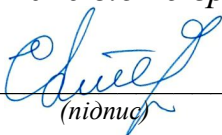
Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут «Фізико-технічний факультет»

Кафедра матеріалів реакторобудування та фізичних технологій

До захисту допущено
кафедрою матеріалів реакторобудування та фізичних технологій,
протокол № 5 / 2025-2026 від 15 грудня 2025 р.

завідувач кафедри


(підпис)

Сергій ЛИТОВЧЕНКО
(ім'я, прізвище)

«15» грудня 2025 р.

Кваліфікаційна робота

здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти

Дослідження радіаційного ушкодження силіконових сенсорів методом
аналізу порогового значення заряду активації чипів

Threshold parameter study as a function of radiation hardernes of silicon sensors.

Спеціальність (спеціалізація) 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(код та найменування спеціальності; спеціалізації спеціальності - за наявності)

Освітня програма ОПП «Прикладна фізика»
(назва освітньої програми)

Виконавець

(підпис)

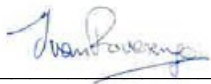


Федір Широкопетлев

(ім'я, прізвище)

Науковий керівник

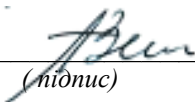
(підпис)



Іван Равасенга

(ім'я, прізвище)

(підпис)



Олександр Зиков

(ім'я, прізвище)

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Ця робота зосереджена на дослідженні одного з основних параметрів контролю працездатності детектору Внутрішньої трекової системи експерименту ALICE на БАК у CERN. У роботі розглядаються фізичні та технологічні принципи, що лежать в основі функціонування силіконових піксельних сенсорів. Розроблено спеціалізований аналітичний алгоритм для обробки даних контролю якості, який був використаний для вивчення еволюції порогових значень починаючи з окремих пікселів. Результати цього комплексного дослідження дуже важливі для своєчасного проведення корекції робочих характеристик детектору.

Результати роботи демонструють радіаційне ушкодження сенсорів як функцію інтенсивності пучків БАК, що призводить до зміни реєстраційної здатності детектору.

Ключові слова: ДЕТЕКТОР, СТЕЙВІ, ВТС, СИЛІКОНОВИЙ СЕНСОР, ПОРІГ АКТИВАЦІЇ, РАДІАЦІЙНЕ УШКОДЖЕННЯ ВТС, БАК, ALICE.

ABSTRACT

This work focuses on investigation of one of the key quality-control parameters of Inner Tracking System detector of the ALICE experiment at LHC at CERN. This work examines the physical and technological principles underlying the functioning of silicon pixel sensors. Specialized analytical algorithm for processing quality control data has been developed. It has been used to study the evolution of threshold values starting from individual pixels. Results of this comprehensive study are very important for correct parameters detector fine-tuning.

Obtained results indicate silicon sensor radiation damage as a function of LHC luminosity. Radiation damages modify ITS detection capabilities.

Keywords: DETECTOR, STAVE, ITS, SILICON SENSOR, THRESHOLD, RADIATION DAMAGE OF ITS, LHC, ALICE.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 Опис експерименту, детектора та основна термінологія.....	8
1.1 Огляд експериментальної установки ALICE	8
1.2 Мотивація для вдосконалення BTC перед Run3.....	9
1.3 Глобальне компонування нового BTC	10
1.4 Структура стейвів і механічний дизайн	11
1.5 Архітектура зчитування і модель потоку даних.....	13
1.6 Перехід від BTC 1 до BTC 2	13
РОЗДІЛ 2 Опис порогового параметра кремнієвого Детектора ALPIDE.....	19
2.1 Концепція порогового значення в сенсорах MAPS.....	19
2.2 Формалізм S-подібної кривої і виділення порогу	20
РОЗДІЛ 3 Визначення порогових параметрів. Зміна порогових параметрів в залежності від часу і радіаційного навантаження. Спостережувані ефекти.....	23
3.1 Формулювання задачі.....	23
3.2 Структура вхідних даних і загальні принципи збору даних	24
3.3 Алгоритм аналізу та робочий процес обробки даних	25
3.4 Реалізація алгоритму у фреймворку CERN ROOT.....	26
3.4.1 Доступ до даних.....	24
3.4.2 Основні функції.....	25
3.4.3 Основний цикл аналізу.....	26
3.4.4 Генерація вихідних даних.....	29
3.5 Приклади трендів та гіпотези	31
3.5.1 Графіки, отримані для запуску Pb+Pb.....	30
3.5.2 Загальна інтерпретація трендів Pb–Pb.	33
3.5.3 Поведінка порогового параметру під час p–p запусків за 2024 рік.....	35

3.5.4 Радіаційне навантаження.....	40
3.5.5 Шум середнього порогового значення.....	41
РОЗДІЛ 4 Вивчення кореляції між пороговим параметром і коливаннями напруги.....	48
4.1. Перевірка гіпотези та аналіз даних.....	46
4.1.1. Обґрунтування та формулювання гіпотези.....	46
4.1.2. Вибір циклів для аналізу.....	47
4.1.3. Дані контролю напруги і струму	48
4.1.4 Візуальне порівняння аномалій.....	49
4.2 Висновок до розділу	50
РОЗДІЛ 5 Аналіз порогових значень активації пікселів	54
5.1 Структура даних та алгоритм відновлення	51
5.2 Теоретичні очікування та знайдені відхилення	53
5.3 Спектри активації на рівні пікселів: спостереження	53
5.4 Накладення чипів на рівні стейву і виявлення відхилень	56
5.5 Просторова структура: коливання порогу чипів на одному стейві ..	57
5.6 Графіки стандартних відхилень: чутливість та інтерпретація.....	59
5.7 Аналіз шуму та кореляція шуму і порогу.....	61
5.8 Висновки до розділу.....	63
ВИСНОВКИ.....	69
ДЖЕРЕЛА	72
ДОДАТОК А ГРАФІКИ ШУМУ ЗА 2025 РІК.....	69

ВСТУП

Вивчення сильно взаємодіючої ядерної моделі при екстремальних температурах і щільності енергії є однією з центральних проблем сучасної фізики високих енергій. За таких умов квантова хромодинаміка передбачає утворення кварк-глюонної плазми (QGP) - розмежованого стану кварків і глюонів, в якому кольорові ступені свободи більше не обмежені адронами. Зіткнення ультрарелятивістських важких іонів на Великому адронному колайдері (БАК) на короткий час створюють такі умови, що дозволяють провести експериментальне дослідження QGP і його еволюції. Експеримент ALICE унікально оптимізований для цієї мети.

Найважливішим компонентом детектора ALICE є внутрішня трекова система, яка оточує область взаємодії та реконструює траєкторії частинок з високою точністю, що особливо важливо при низькому поперечному імпульсі. Під час другої тривалої технічної зупинки БАК ITS був повністю модернізований, щоб відповідати суворим вимогам 3-го і 4-го циклів набору експериментальних даних, які забезпечують безперервне зчитування даних при значно більш високій яскравості. Модернізований BTC2 складається з семи концентричних шарів монолітних активних піксельних сенсорів ALPIDE, заснованих на технології MAPS, яка об'єднує як сенсорну, так і зчитувальну електроніку на одній кремнієвій підкладці.

Продуктивність сенсорів ALPIDE залежить від стабільності декількох внутрішніх параметрів, в першу чергу від порогу активації на рівні пікселя. Цей поріг визначає мінімальний рівень заряду, необхідний для того, щоб піксель зафіксував влучання. При тривалій експлуатації порогові значення можуть змінюватися через вплив радіації, перепадів температури або внаслідок впливу середовища на електроніку чіпу. Тому моніторинг цих ефектів з високим ступенем деталізації має важливе значення для контролю та забезпечення стабільної роботи детектору.

У даній роботі представлено детальне дослідження поведінки порогового параметру BTC2 з використанням калібрувальних даних, що зберігаються в базі даних ALICE. Був розроблений спеціальний аналітичний алгоритм для вилучення значень активації на рівні пікселів, побудови порогових розподілів для кожного чіпу, аналізу параметрів шуму і визначення як часових, так і просторових закономірностей між шарами. Представлені в роботі методи працюють безпосередньо з попиксельними калібрувальними деревами, дозволяючи виявляти ледь помітні ефекти, невидимі в усереднених величинах.

В цілому, впровадження аналізу порогового значення на рівні пікселів значно розширює діагностичні можливості системи контролю якості ALICE. Представлена робота не тільки характеризує стабільність детектора, але й забезпечує основу для довгострокового моніторингу поведінки ALPIDE, оскільки детектор продовжує накопичувати радіаційне випромінювання в майбутніх запусках ВАК.

РОЗДІЛ 1

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ, ДЕТЕКТОРА ТА ОСНОВНА ТЕРМІНОЛОГІЯ

1.1 Огляд експериментальної установки ALICE

Детектор Внутрішня трекова система (ITS) є одним з п'ятнадцяти детекторів, що входять до складу експерименту ALICE у ЦЕРНі (див. рис.1.1).

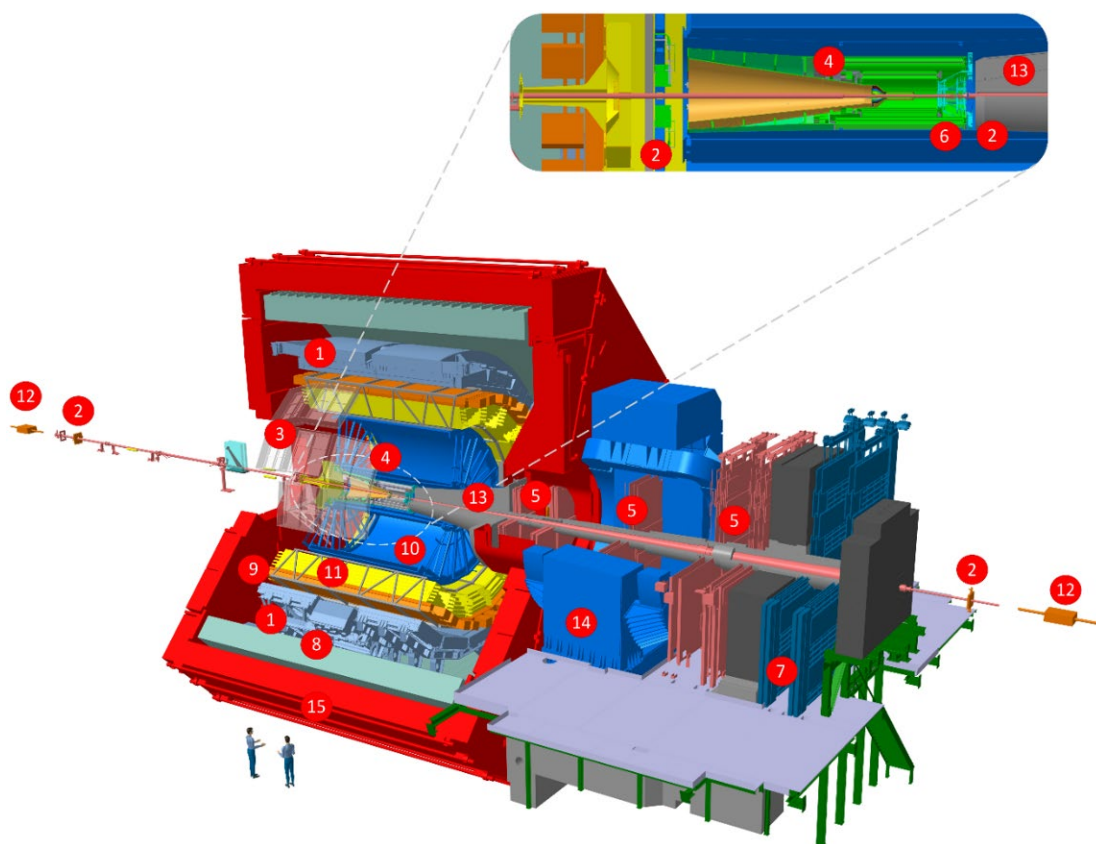


Рисунок 1.1 Схема будови ALICE, де 1- ElectroMagnetic Calorimeter (EMCal), 2 - Fast Interaction Trigger (FIT), 3 - High Momentum Particle Identification Detector (HMPID), 4 - BTC, 5 - Muon Tracking Chambers (MCH), 6 - Muon Forward Tracker (MFT), 7 - Muon Identifier (MID), 8 - Photon Spectrometer (PHOS), 9 - Time-of-Flight detector (TOF), 10 - Time Projection Chamber (TPC), 11 - Transition Radiation Detector (TRD), 12 - Zero-Degree Calorimeters (ZDC), 13 – Absorber, 14 - Dipole Magnet, 15 - L3 Magnet. [1]

Він розташований ближче всього до області взаємодії пучків, що робить його основною підсистемою, відповідальною за реконструкцію траєкторій частинок, що виходять з точки зіткнення. Повна ефективність відстеження ALICE залежить від взаємодії ITS з камерою часової проекції (TPC), системою визначення часу прольоту (TOF), детектором перехідного випромінювання (TRD), калориметричними системами і мюонними спектрометрами.

Центральна циліндрична частина детектору укладена в соленоїдне магнітне поле потужністю 0,5 Тл, що забезпечує вигин траєкторії і дозволяє точно реконструювати імпульс в діапазоні від 100 MeV / с до 100 GeV / с. Набір детекторів і спеціальний мюонний спектрометр доповнюють центральну систему, розширюючи можливості ALICE в області фовардної рапідності.

У радіальному напрямку від області взаємодії за BTC знаходиться Камерою проекції часу (TPC, КПЧ), що простягається від 0,85 м до 2,5 м в радіусі довжиною 5 м. З багатошаровими камерами часової проекції, використовуваними в ALICE 1, іонний зворотний потік в область дрейфу повинен був бути пригнічений активним затисканням, що, в свою чергу, обмежувало швидкість зчитування приблизно до 700 Гц для зіткнень Pb-Pb. Це обмеження знімається в оновленому TPC шляхом використання відлікових камер на основі плівки Gas Electron Multiplier (GEM), які зменшують зворотний потік іонів і призводять до просторового заряду в КПЧ до рівня, який можна виправити під час роботи детектора з частотою взаємодії Pb-Pb до 50 кГц.

1.2 Мотивація для вдосконалення BTC перед Run3

Попередній дизайн BTC складався з шести шарів, побудованих з використанням гібридних піксельних, дрейфових і мікстростріпових технологій. Однак у цієї схеми було кілька обмежень:

- недостатня швидкість зчитування (≈ 1 кГц у другому циклі),

- відносно висока кількість матеріалу (до 1,1% X_0 у внутрішніх шарах),
- помірна ефективність в умовах високої кратності Pb–Pb.

Модернізація ITS, реалізована під час тривалого відключення LHC 2 (2019-2021), замінила всю підсистему повністю монолітним детектором на основі MAPS (архітектура ALPIDE), збільшивши кількість шарів до семи і різко скоротивши бюджет матеріалів і енергоспоживання. Ці покращення були обумовлені фізичними цілями Run 3 і 4:

- більш точні вимірювання адронів при низькому поперечному імпульсі,
- покращене визначення координат вторинних вершин вторинних частинок,
- робота в режимі безперервного зчитування при надзвичайно високих швидкостях взаємодії (50 кГц для Pb–Pb і кілька МГц для p–p).

1.3 Глобальне компонування нового ВТС

Модернізований ВТС (ITS2) складається з (див. рис.1.2):

- Внутрішніх шарів (IB): шари 0-2,
- Середніх шарів (ML): 3-4 шари,
- Зовнішніх шарів (OL): шари 5-6.

Основні характеристики модернізованого ВТС:

- довжина: $\approx 1,5$ м
- зовнішній радіус: ≈ 40 см
- кількість чипів: 24120
- загальна кількість пікселів: 12.5×10^9
- площа активного датчику: ≈ 10 м²
- бюджет матеріал: IB $\approx 0.35\%$ X_0 ; ML/OL $< 1\%$ X_0

Різке скорочення матеріалу має вирішальне значення для поліпшення роздільної здатності для координат другорядних вершин і мінімізації багаторазового кулонівського розсіювання.

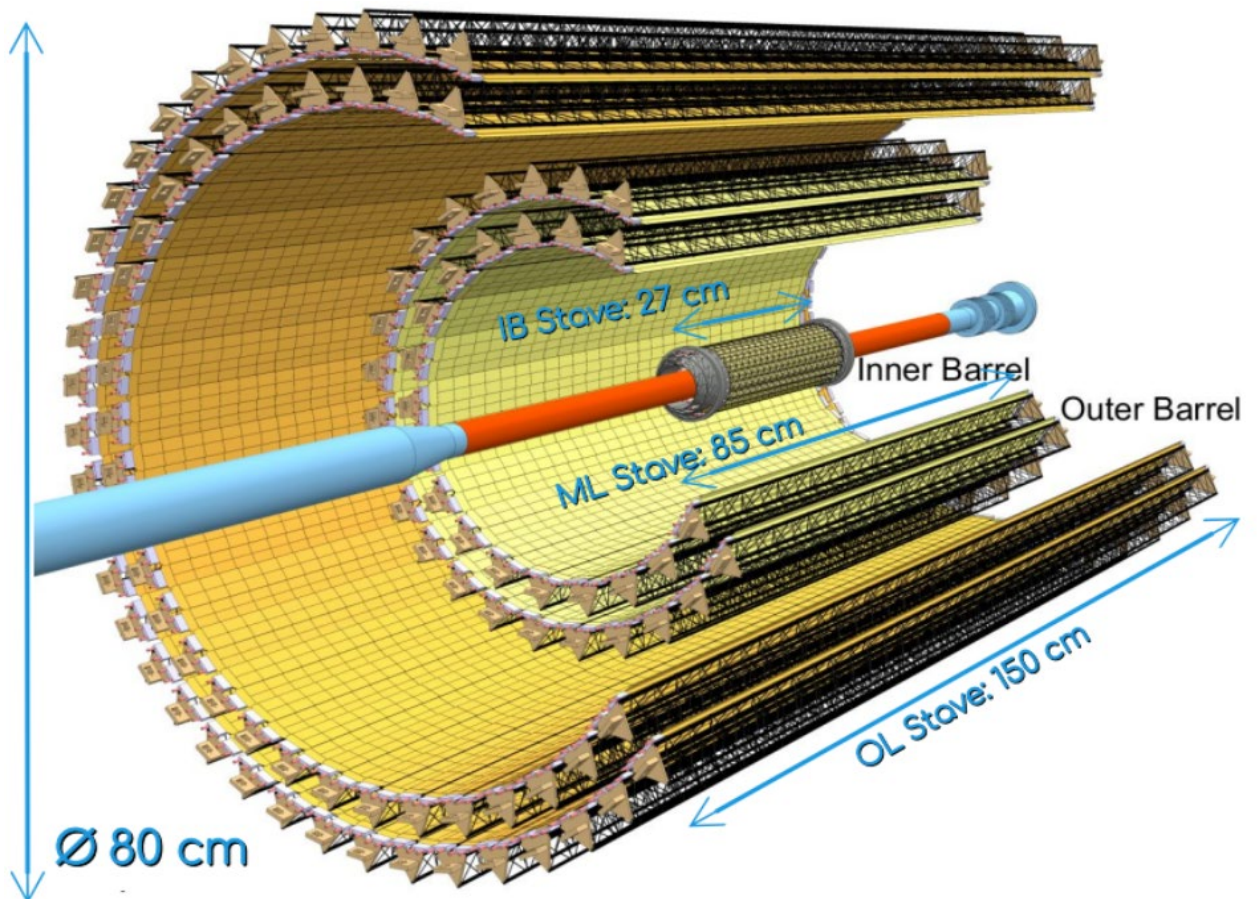


Рисунок 1.2 Схематичне зображення BTC [1]

1.4 Структура стейвів і механічний дизайн

У внутрішніх шарах використовуються чіпи ALPIDE доведені до 50 мкм, в той час як на інших шарах чіпи завтовшки 100 мкм., та з різними механічними та конструкційними особливостями, системами охолодження і механізмами інтеграції.

Кожен шар ITS зібраний з стейвів, легких композитних опорних конструкцій, несучих кілька сенсорів ALPIDE, силову схему, охолоджуючі елементи та шини передачі даних.

Архітектура стейвів IB і ML / OL істотно відрізняється: для стейвів з внутрішніх шарів використовується гранична мінімізація матеріалу, дуже тонкі поліїмидні охолоджуючі трубки, однорядна конфігурація чіпу, компактні легкі конструкції з вуглецевого волокна (див. рис.1.3).

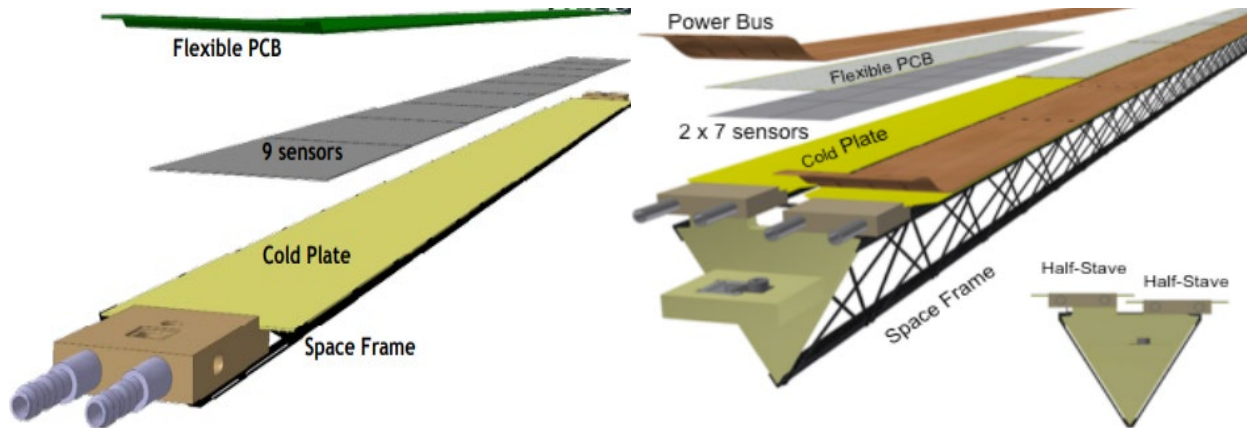


Рисунок 1.3 Структура стейву, ліве зображення - стейву для IB, праве зображення - для ML, OL [1]

Дворядна конфігурація стейвів з середніх та зовнішніх шарів забезпечує більш надійну підтримку за рахунок більшого радіуса, контур охолодження на водній основі низького тиску, розширені гнучкі схеми для передачі даних (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Інформація про стейви на різних шарах

Levels	Layers	number of staves	number of chips
IB	L0	12	9
IB	L1	16	9
IB	L2	20	9
ML	L3 Top/ Bottom	12	112
ML	L4 Top/ Bottom	15	112
OL	L5 Top/ Bottom	21	196
OL	L6 Top/ Bottom	24	196

1.5 Архітектура зчитування і модель потоку даних

Кожен шар будується з певної кількості стейвів (стрічок), які в свою чергу складаються з чіпів (рисунок 1.3). Будова стейвів відрізняється для ІВ та ОВ, оскільки під час створення ІВ була основна ціль, використати як можна менше матеріалу, для покращення зчитування даних на ОВ.

Для забезпечення якості даних під час збору та початкових процесів реконструкції, ALICE Collaboration використовує систему контролю якості (QC). Крім того, QC надає результати оцінки калібрування, а також спеціальні запуски, проведені підсистемами ALICE для вивчення їх апаратних компонентів.

BTC2 працює в режимі безперервного зчитування, що означає, що детектор відправляє дані без тригерів для кожної події. Замість цього часові інтервали необроблених подій передаються в онлайн-обчислювальну систему (O2), де відбувається кластеризація в реальному часі і реконструкція треку.

1.6 Перехід від BTC 1 до BTC 2

BTC — детектор, відповідальний за відтворення траєкторій заряджених частинок і визначення первинної вершини взаємодії, складалася з двох шарів кремнієвих піксельних детекторів (SPD), двох шарів кремнієвих дрейфових детекторів (SDD) і двох шарів кремнієвих стріпових детекторів (SSD) (див. рис.1.4). Загальна частота зчитування даних системи була обмежена приблизно 1 кГц. На етапі модернізації ці детекторні технології були повністю замінені сучасними монолітними активними піксельними датчиками ALPIDE (MAPS). Кількість шарів було збільшено з шести до семи, а їх розташування було дещо оптимізовано, щоб покращити просторову роздільну здатність відстеження.

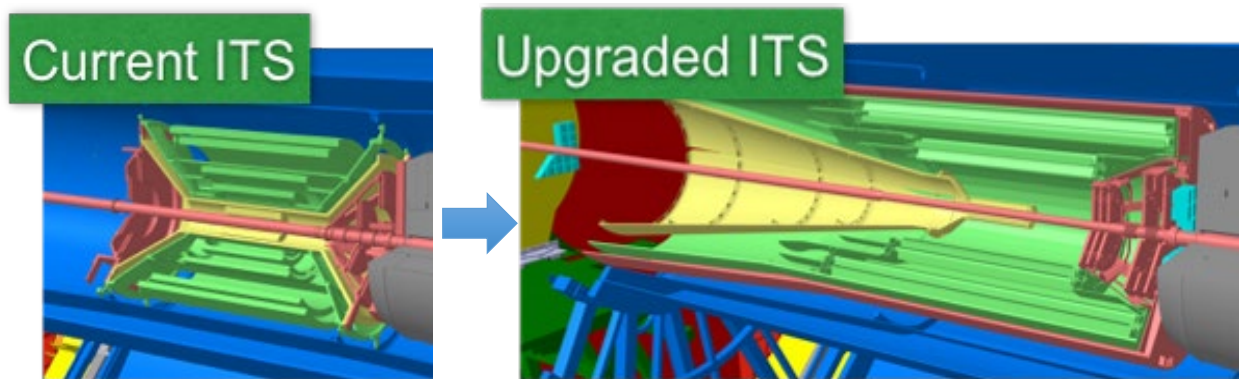


Рисунок 1.4 Схема змін під час переходу від BTC 1 до BTC 2

Це оновлення дозволило досягти декількох ключових поліпшень продуктивності:

- Просторова роздільна здатність: $\sim 5 \times 5 \text{ мкм}^2$ для всіх шарів, порівняно з BTC 1 – $12 \times 100 \text{ мкм}^2$ для внутрішньої частини, $20 \times 830 \text{ мкм}^2$ для зовнішньої частини.
- Максимальна частота зчитування: вища за 100 кГц для зіткнення іонів свинцю та вища за 1 МГц для зіткнення протонів, тоді як BTC1 був обмежений 1 кГц .
- Ймовірність поглинання утвореної частинки X/X_0 на один шар (перші три шари): 0.35% , що приблизно в три рази нижче відповідного значення BTC1, рівного 1.1% [1].

Основною одиницею сучасного BTC є ALPIDE [3,4,5], що означає ALice Pixel DEtector. Датчик має розмір $1,5 \times 3 \text{ см}$. Він розділений на 512 рядків і 1024 стовпців пікселів з кроком $29,24 \times 26,88 \text{ мкм}$, що дає можливість досягти роздільної здатності краще ніж 5 мкм . ALPIDE є монолітним датчиком активних пікселів (MAPS), який заснований на 180 нм CMOS технології TowerJazz [3]. Ця технологія використовує до 6 металевих шарів, які в поєднанні з малим розміром структури дозволяють реалізувати

цифрову схему CMOS високої щільності з низьким енергоспоживанням (див. рис.1.5, 1.6).

Середня щільність потужності, що споживається поверхнею сенсору, становить менше 40 МВт/см² (див. табл.1.2). Важливою технологічною особливістю ALPIDE є поєднання епітаксійного шару з високим опором (більше ніж 1 кОм·см) і глибокої p-well, яка захищає n-well PMOS-транзисторів від накопичення заряду. Це дозволяє реалізувати як NMOS, так і PMOS-пристрої всередині області активного пікселя. Товщина епітаксійного шару становить приблизно 25 мкм. Подача помірної напруги зворотного зміщення збільшує глибину розряду, зменшує вхідну ємність діода і тим самим підвищує ефективність збирання заряду [5].

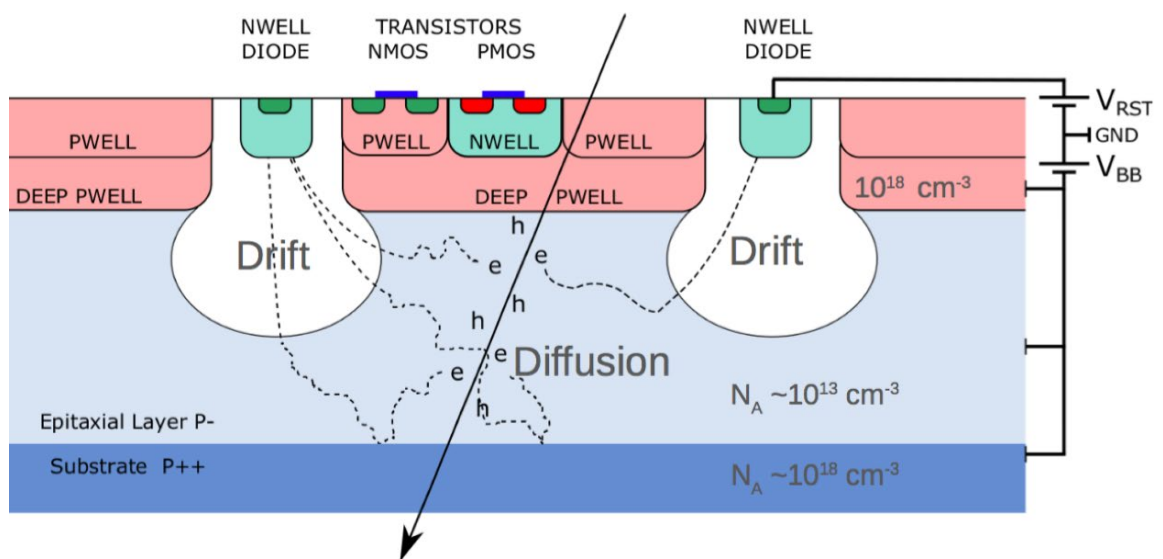


Рисунок 1.5 Поперечний переріз пікселя ALPIDE. Заряджена частинка, що проходить через чутливий епітаксійний шар з високим опором, генерує електронно-діркові пари. Ці носії дифундують через епітаксiальний шар, доки не досягнуть області дрейфу, де вони будуть зібрані [7]

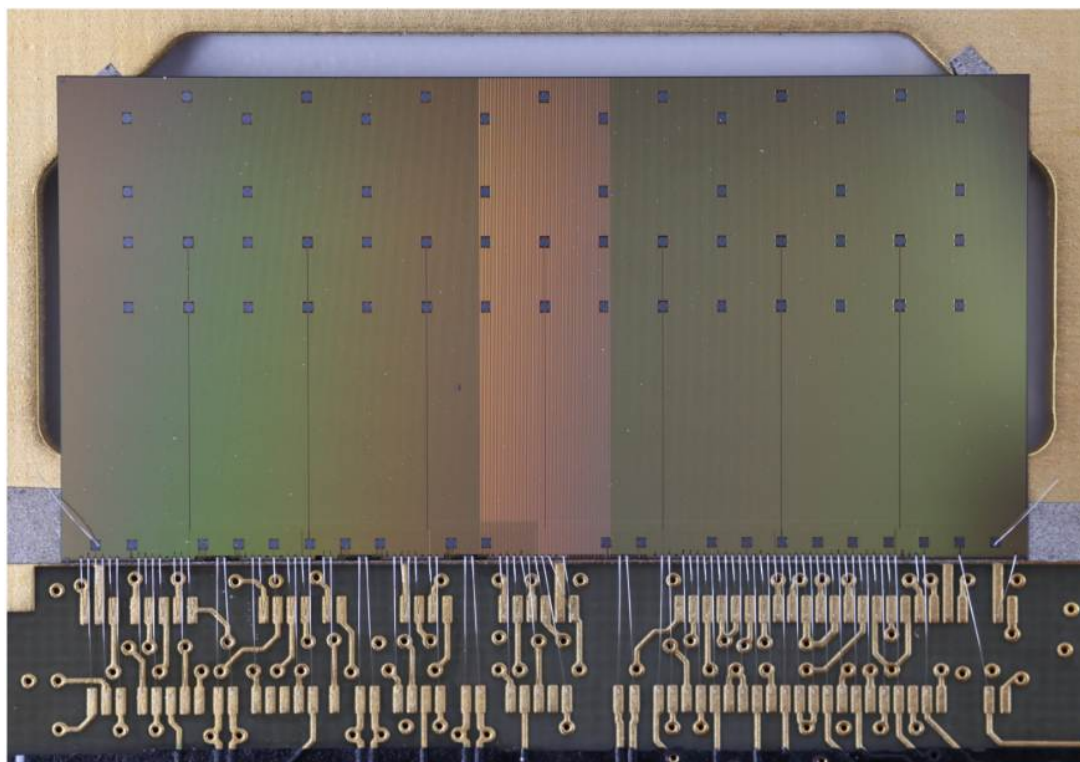


Рисунок 1.6 Фотографія чіпу ALPIDE під час тестів. [7]

Таблиця 1.2

Вимоги до чипів Inner та Outer Barrel BTC 2 і досягнуті характеристики ALPIDE. [7]

	Inner Barrel	Outer Barrel	ALPIDE відповідність
Товщина [мкм]	50	100	ОК
Просторова роздільна здатність [мкм]	5	10	~5
Розмір чіпу [мм]	15 × 30	15 × 30	ОК
Питома потужність [мВт/см ²]	<300	<100	<40
Роздільна здатність часу події [мкс]	<30	<30	~2

Ефективність детектування [%]	>99	>99	OK
Частота помилкових влучень [подія ⁻¹ ·пксель ⁻¹]	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁶	<10 ⁻¹⁰
NIEL радіаційна стійкість [1MeV _{eq} ·см ⁻²]	1.7 × 10 ¹³	3 × 10 ¹⁰	OK
TID радіаційна стійкість [крад]	2700	100	OK

В кожен ALPIDE піксель вбудована чутлива аналогова електроніка і цифровий інтерфейс, необхідні для посилення, розпізнавання та реєстрації попадань в буфер подій на пікселі. Кілька 8-розрядних ЦАП, розташованих на периферії мікросхеми, керують внутрішньою передачею даних і опорними напругами. Серед них V_{CASN} і I_{THR} відіграють домінуючу роль у визначенні ефективного порогу виявлення заряду [4].

В таблиці 1.2 наведено вимоги до дизайну зі звіту про технічний дизайн [7] та експериментально досягнуті характеристики сенсору. ALPIDE відповідає або перевершує всі закладені технічні характеристики IB та OB BTC2. По завершенню довгих періодів набору даних БАК (LHC RUN 3 і 4) розраховано, що очікувана сумарна доза іонізації (TID), накопичена внутрішньою частиною циліндру, складатиме приблизно 270 крад, в той час як втрати енергії на неіонізацію (NIEL), як очікується, досягнуть $1,3 \times 10^{12}$ 1MeV_{eq}·см⁻². Важливо відзначити, що лабораторні дослідження показують, що ALPIDE залишається працездатним навіть після рівнів опромінення, що перевищують ці вимоги майже на порядок.

Ключові елементи зчитування ALPIDE:

- внутріпиксельна дискримінація, двійковий висновок (влучення / відсутність влучення),

- асинхронний кодувальник пріоритету, дозволяє передавати адреси пікселів без синхронізації повної матриці,
- розріджений зчитування, передаються тільки активні пікселі,
- архітектура, без використання тригерів, оптимізована для високошвидкісної роботи при зіткненні важких іонів.

Характеристики продуктивності:

- пропускна здатність: до декількох Гбіт / с на стайв,
- мінімальний час між повторною активацією: ~ 2 мкс за часом події,
- ефективність реєстрації: $> 99\%$ при номінальних умовах,
- частота помилкових спрацювань: $< 10^{-10}$ на піксель за подію.

Ці параметри роблять ALPIDE одним з найшвидших і радіаційно-стійких датчиків MAPS, які в даний час використовуються в експериментах на колайдері.

РОЗДІЛ 2

ОПИС ПОРОГОВОГО ПАРАМЕТРА КРЕМНІЄВОГО ДЕТЕКТОРА ALPIDE.

Продуктивність ВТС критично залежить від точності, з якою її монолітні піксельні сенсори генерують сигнал в результаті проходження частинок. З цієї причини середнє порогове значення — мінімальний введений заряд, необхідний пікселю для реєстрації попадання — відіграє центральну роль як в оперативній роботі детектора, так і в довгостроковому забезпеченні якості.

2.1 Концепція порогового значення в сенсорах MAPS

В детекторах на основі MAPS, таких як ALPIDE, заряд генерується в епітакціальному шарі з високим опором, а потім збирається невеликим чутливим діодом. Сигнал заряду підсилюється і формується всередині вбудованої в піксель електроніки. Пороговий параметр Q_{thr} визначає мінімальну кількість заряду, який реєстрацію активації, внаслідок влучення частинки від шуму.

Оскільки ALPIDE працює в режимі безперервного зчитування даних в періоди високої інтенсивності (включаючи зіткнення важких іонів з десятками тисяч треків за подію), підтримання стабільних порогових значень важливо як для запобігання помилкових спрацювань, так і для запобігання втрати ефективності.

Порогові значення залежать в першу чергу від двох налаштувань 8-бітного ЦАП:

- I_{THR} — регулює формувальний підсилювач і, таким чином, встановлює ефективний мінімальний рівень шуму;
- V_{CASN} — контролює базовий рівень попереднього підсилювача, безпосередньо налаштовуючи порогове значення.

Ці комбінації ЦАП розрізняються в різних мікросхемах і змінюються протягом терміну служби детектора через радіаційні пошкодження, збільшення струму витоку і переналаштування роботи, що виконується командою контролю якості.

2.2 Формалізм S-подібної кривої і виділення порогу

Реакція пікселя ALPIDE на введений заряд відповідає сигмоподібній залежності, відомої як S-подібна крива. Він визначається за формулою:

$$S(Q) = \frac{1}{2} 50 + 50 \times \operatorname{erf} \frac{(Q - Q_{THR})}{\sqrt{2}\sigma}$$

де, σ – еквівалентний шумовий заряд (ENC), що описує часовий та електронний шум, що розмиває поріг активації, Q_{THR} – це порогове значення, Q – введений заряд. Більш вузька S-подібна крива відповідає більш низькому рівню шуму і більш точному виділенню порога. (див. рис.2.1).

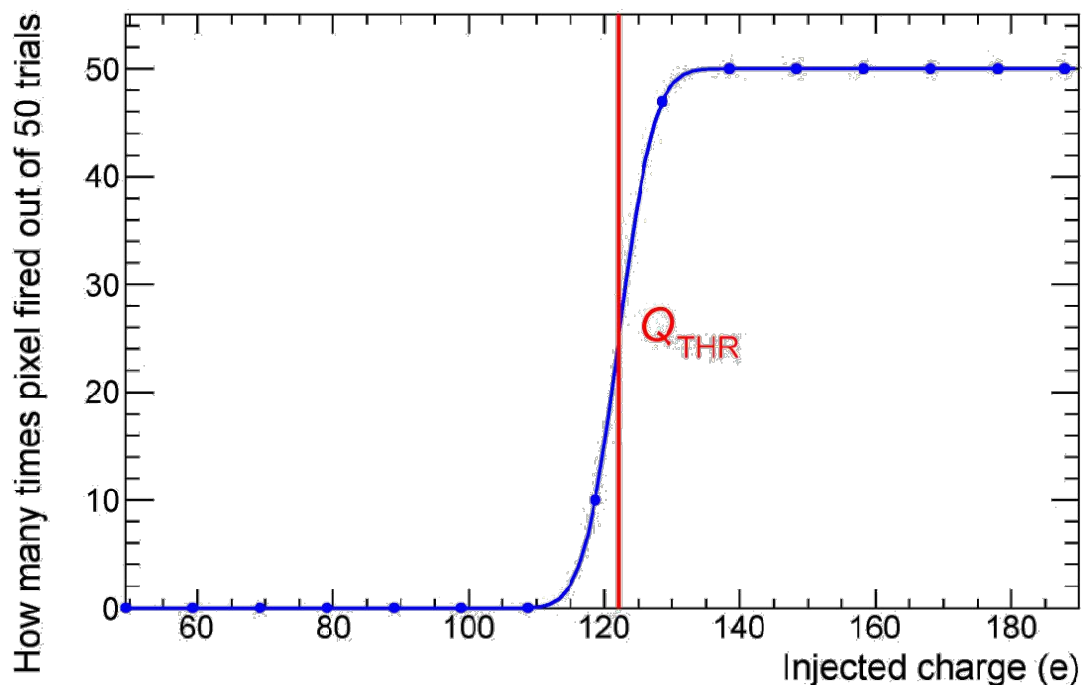


Рисунок 2.1 Ймовірність реєстрації заряду в пікселі ALPIDE. Дані апроксимовані S-кривою. [2]

Робочий процес калібрування протікає наступним чином:

- Введення заряду: стимулюється лише частина ($\sim 10\%$) пікселів, щоб мінімізувати збої під час збору даних.
- Сканування заряду: вводиться заряд, який збільшується з 0 до 50 DAC ($1 \text{ DAC} = 10 \text{ e}^-$) рівномірно.
- Повторна вибірка: на кожному етапі відгук пікселя реєструється 50 разів для побудови розподілу ймовірностей.
- Апроксимація до кривої: зібрані точки апроксимуються S-подібною кривою для отримання значень Q_{THR} та σ .
- Агрегування: Порогові значення усереднюють на рівні чіпу(див. рис.2.2).

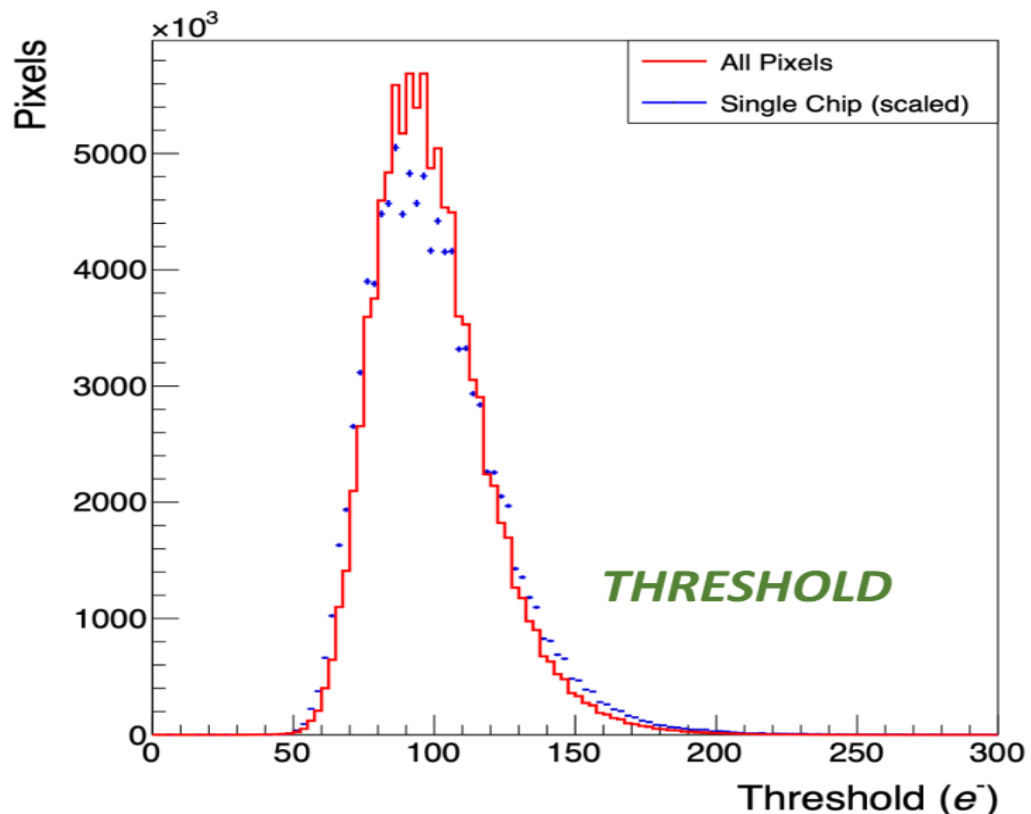


Рисунок 2.2 Приклад залежності кількості увімкнених пікселів від поданого на них заряду [2]

Ця процедура забезпечує надійні порогові вимірювання і забезпечує додаткове спостереження шуму.

Використовуючи цей набір даних, визначається середнє порогове значення для кожного чіпу. Потім отримані значення формуються у вигляді гістограм для всіх семи шарів. На цих гістограмах вісь X представляє номер чіпу, вісь Y відповідає номеру стейву в шарі, а кольорова шкала вказує середнє порогове значення чіпу. Результати калібрування ВТС зберігаються завдяки QC Workflow у базі даних ALICE. Згодом ця інформація може бути використана для додаткових досліджень, таких як визначення порогових значень, що залежать від часу.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПОРОГОВИХ ПАРАМЕТРІВ. ЗМІНА ПОРОГОВИХ ПАРАМЕТРІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЧАСУ І РАДІАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ. СПОСТЕРЕЖУВАНІ ЕФЕКТИ.

3.1 Формулювання задачі

Завдання полягало в отриманні порогового значення усередненого для кожного стейву і побудови графіків як функції часу, тобто залежність від номера пробігу. Для цього потрібно було отримати доступ до спеціалізованих закритих баз даних проекту ВТС, за допомогою специфічного ПЗ належним чином обробити і у результаті отримати графіки середнього порогового значення з належним бінінгом як функція часу. Рисунки повинні включати всі стейви для кожного шару (таблиця. 1.1).

Для більш легкого читання графіків, починаючи з 3-го шару, розділяємо їх на верхню і нижню частини. Створене програмне забезпечення повинно бути інтегроване в загальний скрипт оболонки Linux у QC аналіз фреймворк. Загальний QC фреймворк проекту ВТС включає в себе багато інших параметрів контролю якості, таких як частота помилкових влучень, якість реконструкції треку, параметри кластеризації, ефективність зіставлення треків між різними детекторами (ITS – TPC track matching efficiency), тощо.

Метою даної роботи є розробка систематичного методу відстеження довгострокової еволюції порогового параметру в реальних експериментальних умовах, включаючи періоди набору експериментальних даних зіткнень протон – протон (pp) і важких іонів (Pb–Pb, O-O, Xe-Xe).

Завдання полягає в наступному:

- витягти з бази даних порогові значення для чипів всіх шарів (наведено у таблиці 1.1),

- реконструювати їх поведінку в залежності від кількості запусків (часу),
- локалізувати фізичні ефекти (наприклад, радіаційне пошкодження)
- відрізнити фізичні ефекти від експлуатаційних (наприклад, параметри ЦАП),
- візуалізувати результати в ясній, наочній формі для експертів.

Для шарів 3-6, які містять значно більшу кількість чипів, графіки моніторингу розділені на верхню і нижню половини для поліпшення простоти аналізу.

Крім того, розроблений програмний модуль повинен бути повністю сумісний з фреймворком аналізу якості на базі Linux.

3.2 Структура вхідних даних і загальні принципи збору даних

Програмне забезпечення, розроблене мною в цій роботі, працює на основі наборів калібрувальних даних, що надаються системою контролю якості ALICE (див. рис.3.1).

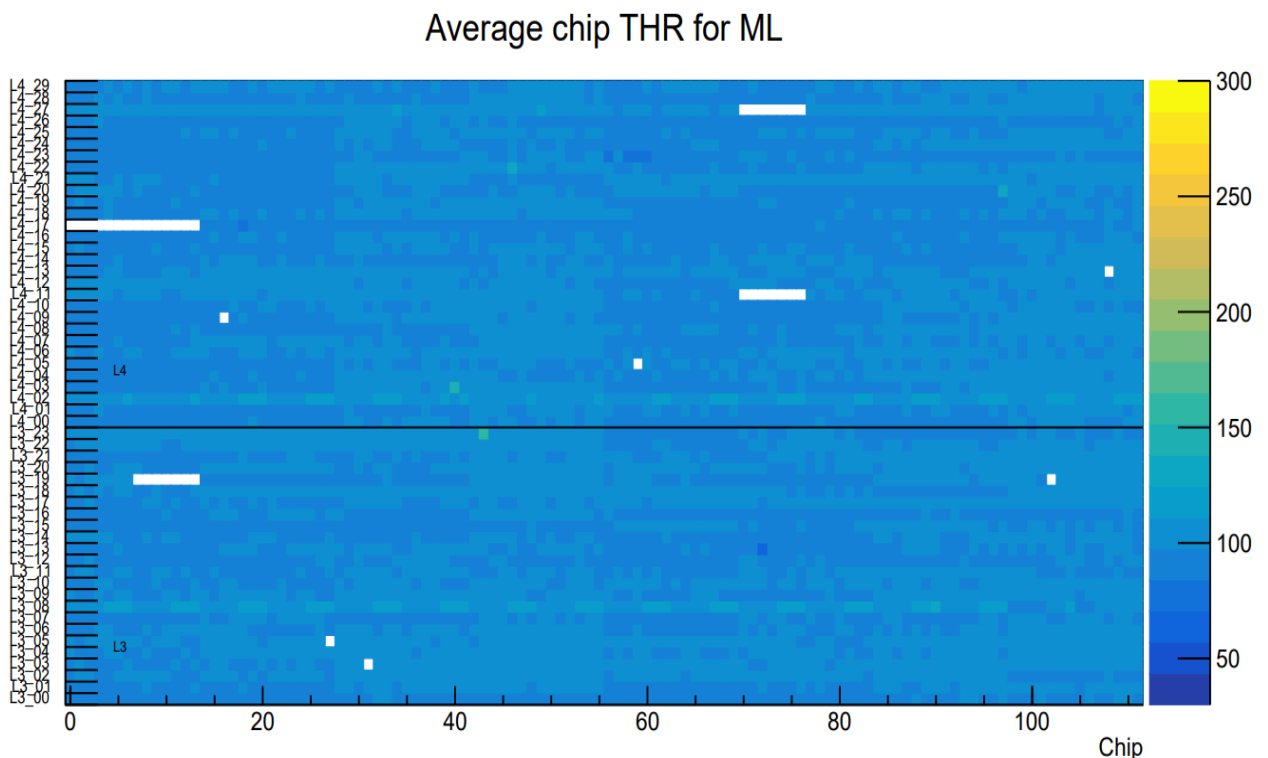


Рисунок 3.1 Приклад гістограми середніх порогових значень для чипів

При кожному запуску калібрування створюється кореневий файл, що містить набір двовимірних гістограм, які кодують середні порогові значення, отримані для всіх чипів ALPIDE у внутрішніх, середніх та зовнішніх шарах (IB, ML, OL). Ці гістограми служать основними вхідними даними для аналізу.

Кожна клітинка гістограми відповідає конкретному чіпу, розташованому на даній стейві, і зберігає відновлений пороговий заряд, виражений в одиницях DAC. По осям відкладені:

- Вісь X – Індекс чіпу
- Вісь Y – Індекс панелі в межах шару
- Вісь Z (кольорова вісь) – середнє порогове значення

Щоб дослідити зміну порогового параметра з часом, програмне забезпечення повинно завантажувати подібні гістограми у послідовності запусків. Обробка певної кількості запусків, які відносяться до одного періоду дозволяє:

- аналізувати короточасні зміни, викликані різкою зміною температури, налаштуванням ЦАП або тимчасовими проблемами;
- визначте довгострокові тенденції, пов'язані з впливом радіації, старінням та циклами експлуатації;
- порівняти поведінку калібрування в різних режимах роботи ВАК (Pb–Pb, p–p).

3.3 Алгоритм аналізу та робочий процес обробки даних

Основний алгоритм аналізу був розроблений для вилучення порогових значень для стейвів та перетворення їх у залежні від часу графіки для всіх детекторних шарів. Його основні етапи можна коротко описати наступним чином:

- 1) Фільтрація на рівні чіпів і усереднення порогових значень.

Для кожного етапу алгоритм обчислює середнє порогове значення, використовуючи тільки ті чіпи, які надали достовірні дані. Чіпи з пороговим

значенням, рівним нулю, інтерпретуються як такі, що не відповідають вимогам (неактивні або відсутні дані) і автоматично виключаються. Їх кількість динамічно реєструється для кожного етапу і кожного запуску.

2) Необов'язкове виключення проблемних прогонів.

Деякі калібрувальні прогони відповідають особливим конфігураціям детектора. Система дозволяє користувачеві виключити такі прогони з подальшого аналізу, щоб уникнути спотворення помилкових, довгострокових тенденцій.

3) Побудова графіків зміни середнього порогового значення як функції часу для кожного шару.

Кожен графік будується відповідно:

- Вісь X – номер запуску.
- Вісь Y – середнє порогове значення (в одиницях виміру DAC).
- Легенда – номер стейву.

Таким чином, для кожного шару (або напівшару) створюється мультиграфік, що містить по одній кривій на стейв.

4) Окремі діагностичні графіки для обліку проблемних чипів.

Алгоритм також підтримує контроль кількості чипів, які не пройшли калібрування (наприклад, низький поріг або високий рівень шуму). У майбутніх версіях буде додано автоматичне сповіщення, як тільки частка таких чипів на будь-якому шарі перевищить 25% (в основному це актуально для ML і OL).

3.4 Реалізація алгоритму у фреймворку CERN ROOT

Програмне забезпечення для аналізу було реалізовано за допомогою фреймворку CERN ROOT та стандартних інструментів C++. Інфраструктура QCAnalysis надає інтерфейси для доступу до об'єктів калібрування, що зберігаються в базі даних ALICE.

3.4.1 Доступ до даних.

Пошук даних здійснюється за допомогою модифікованого класу `GetObject.cxx`, спочатку розробленого групою ALICE QC. Клас був адаптований для:

- вилучення об'єктів з використанням узгоджених і зручних для читання іменувань,
- автоматично пошуку необхідних root файлів в каталозі сховища QCAnalysis,
- перевірки структури гістограми перед аналізом.

3.4.2 Основні функції.

Для спрощення процесу виділення порогових значень було введено кілька допоміжних функцій.

```
std::pair<Double_t, Double_t> GetAvgThresholdsForStaveAndNumberOfFailedNChip(TH2F* h, Int_t stvNum, Int_t numChip) {
```

```
    std::pair<Double_t, Double_t> avgFailed;
    TH1D* hproj = h->ProjectionX("proj", stvNum, stvNum);
    Double_t sum = 0;
    Int_t cNumChip = numChip;
    Int_t failedNumChip = 0;
    for (int i = 1; i <= numChip; i++) {
        Double_t forChip = hproj->GetBinContent(i);
        if (forChip == 0) {
            cNumChip--;
            failedNumChip++;
        }
        sum += forChip;
    }
    Double_t avg = 0;
    if (cNumChip > 0) {
        avg = sum / cNumChip;
    }
    avgFailed.first = avg;
    avgFailed.second = failedNumChip;
    return avgFailed;
}
```

1) Функція проектування на стейв.

Ця функція проектує оригінальну структуру даних, еквівалентну тривимірній гістограмі, на вісь X для обчислення:

- середнього порогового значення для кожного стейву,
- кількості порожніх або недійсних чіпів.

2) Функція вилучення номера запуску.

```

set <string> GetRunNumbers(TFile* analyzefile)
{
    set <string> result;
    TList* listKeys = analyzefile->GetListOfKeys();
    for (TObject* key : *listKeys) {
        string fileName = key->GetName();
        string sRunNumber = fileName.substr(fileName.find("run") + 3, 6);
        result.insert(sRunNumber);
    }
    return result;
}

```

Дозволяє програмному забезпеченню визначити повний список ідентифікаторів запуску, присутніх у root файлі, для коректної ідентифікації та вилучення даних, та надання наглядного візуального уявлення для подальшого аналізу.

3) Модуль конфігурації.

У спеціальній структурі зберігається конфігурація для кожного шару:

- ім'я шару,
- діапазон значень індексу стейву,
- кількість чіпів на стейві,
- кількість стейвів на одному шарі.

```

vector <LayerParameters> init() {
    LayerParameters l0 = { "IB", 1, 12, 9, 1 };
    LayerParameters l1 = { "IB", 13, 28, 9, 13 };
    LayerParameters l2 = { "IB", 29, 48, 9, 29 };
    LayerParameters l3Top = { "ML", 1, 12, 112, 1 };
    LayerParameters l3Bottom = { "ML", 13, 24, 112, 1 };
    LayerParameters l4Top = { "ML", 25, 39, 112, 25 };
    LayerParameters l4Bottom = { "ML", 40, 54, 112, 25 };
    LayerParameters l5Top = { "OL", 1, 21, 196, 1 };
    LayerParameters l5Bottom = { "OL", 22, 42, 196, 1 };
    LayerParameters l6Top = { "OL", 43, 66, 196, 43 };
    LayerParameters l6Bottom = { "OL", 67, 90, 196, 43 };

    vector <LayerParameters> config = { l0, l1, l2, l3Top, l3Bottom, l4Top, l4Bottom, l5Top, l5Bottom, l6Top, l6Bottom };

    return config;
}

```

3.4.3 Основний цикл аналізу.

Основна обчислювальна процедура виконується наступним чином:

Крок 1-Вибір файлу користувачем

Користувач вибирає файл калібрування з каталогу, який використовується за замовчуванням.

```

void AnalyzeAllLayerThresholds() {
    vector <LayerParameters> config = init();

    vector <Int_t> colorConfig = { kRed, kGreen, kBlue, kMagenta, kOrange };
    vector <Int_t> styleConfig = { 24,25,26,30,28,32 };
    string filepath;
    cout << endl << "Please enter the full path to the file to analyze" << endl;
    gSystem->Exec("ls ../Data/*all-layers* -Art | tail -n 500");
    cin >> filepath;
    string runNumberSuffix = filepath.substr(filepath.find("_run"), filepath.size() - filepath.find("_run") - 5);
}

```

Крок 2 - Виконання підрахунку.

Номери результатів витягуються та сортуються. Вони будуть відображатися на осі X для всіх створених графіків.

```

TFile* analyzefile = new TFile(filepath.c_str());
set <string> allRunNumbers = GetRunNumbers(analyzefile);
for (int numLayer = 0; numLayer <= 10; numLayer++) {
    LayerParameters configToUse = config[numLayer];
    TMultiGraph* avgLayerThreshold = new TMultiGraph();
    TMultiGraph* failedChipsForLayer = new TMultiGraph();
    TLegend* legend = new TLegend(1, 0.19, 0.9, 0.925);
    TLegend* legendForChips = new TLegend(1, 0.19, 0.9, 0.925);
    int colorPointer = 0;
    int stylePointer = 0;
    set <string> emptyRunNumbers = {};
}

```

Крок 3-ітерація шарів.

Оскільки шари 3-6 розділені на верхню та нижню половини, алгоритм починає цикл на 11 ітерацій, та для кожного логічного шару ініціалізує об'єкт типу TMultiGraph, що за дизайном дозволяє згрупувати графіки до єдиної сутності, що буде використана для візуалізації.

Крок 4- ітерація стейвів.

Для кожного логічного шару алгоритм:

- витягує параметри конфігурації,
- створює окремий об'єкт TGraph для кожного етапу,
- розраховує внутрішні буфери для зміни порогу.

```
for (int currentStv = configToUse.nFirstStave; currentStv <= configToUse.nLastStave; currentStv++) {
    TGraph* stvGraph = new TGraph();
    TGraph* failedChips = new TGraph();
    Double_t runSequenceNumber = 1;
    for (auto runNumber : allRunNumbers) {
```

Крок 5-ітерації по запускам

Для кожного етапу:

- вилучає відповідну гістограму, з файлу, обраного користувачем
- фільтрує порожні та пошкодженні гістограми, для коректних розрахунків вихідних даних
- функція проекції повертає середнє порогове значення і кількість непрацюючих чіпів,
- ці значення додаються до графіка для конкретного стейву.

```
TList* listKeys = analyzefile->GetListOfKeys();
for (TObject* key : *listKeys) {
    string fileName = key->GetName();
    if (fileName.find(configToUse.name) != string::npos && fileName.find(runNumber) != string::npos) {
        TH2F* h = (TH2F*)analyzefile->Get(key->GetName());
        if (h->Integral() == 0) {
            emptyRunNumbers.insert(runNumber);
            continue;
        }
        std::pair <Double_t, Double_t> avgFailed = GetAvgThresholdsForStaveAndNumberOfFailedNChip(h, currentStv, configToUse.nChipsPerStave);
        Double_t avgThrForStv = avgFailed.first;
        Int_t failedNumChip = avgFailed.second;
        if (avgThrForStv != 0) {
            stvGraph->AddPoint(runSequenceNumber, avgThrForStv);
        }
        failedChips->AddPoint(runSequenceNumber, failedNumChip);
        runSequenceNumber++;
    }
}
```

Крок 6-стилізація та завершення

Графіки стилізовані, додані підписи та зібрані мультиграфіки.

```
stvGraph = AddStyle(stvGraph, colorConfig[colorPointer], styleConfig[stylePointer]);
failedChips = AddStyle(failedChips, colorConfig[colorPointer], styleConfig[stylePointer]);
int colorConfigSize = colorConfig.size() - 1;
if (colorPointer == colorConfigSize) {
    colorPointer = 0;
    stylePointer = stylePointer + 1;
}
else {
    colorPointer = colorPointer + 1;
}
legend->AddEntry(stvGraph, Form("Stv%d", currentStv - configToUse.nStavesForLayer), "p");
avgLayerThreshold->Add(stvGraph);
legendForChips->AddEntry(failedChips, Form("Stv%d", currentStv - configToUse.nStavesForLayer), "p");
failedChipsForLayer->Add(failedChips);
```

3.4.4 Генерація вихідних даних.

Підсумковий результат представлений в двох взаємодоповнюючих форматах:

- Резюме у форматі PDF, що містить кілька графіків для всіх шарів в одному документі.
- Окремі зображення у форматі PNG для кожного шару або напівшару (див. рис.3.2).

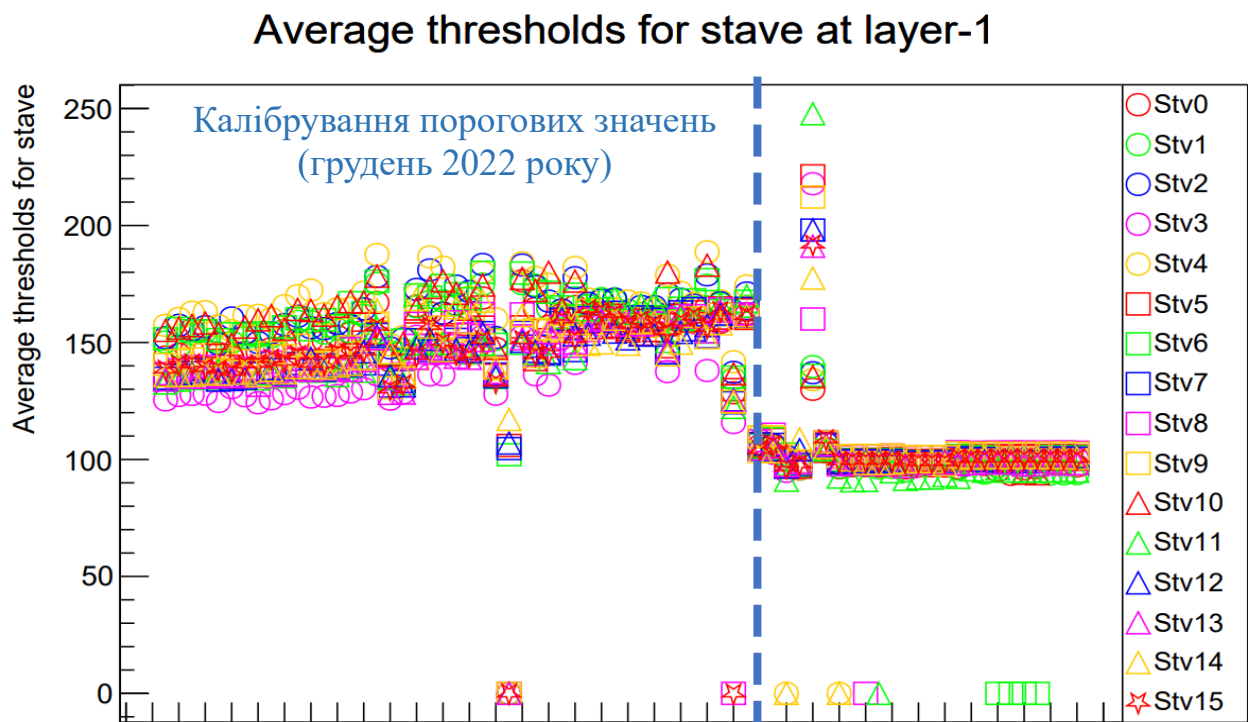


Рисунок 3.2 Приклад: еволюції порогового значення в шарі 1 за один рік з 01.09.2022 по 05.10.2023. Синя лінія – момент оптимізації параметрів калібрування.

3.5 Приклади трендів та гіпотези

Довгостроковий моніторинг середнього порогового параметру по всім семи шарам детектору ВТС дозволяє виявити систематичні тенденції, пов'язані, у тому числі, з радіаційним навантаженням, умовами експлуатації і загальним старінням детектора. Оскільки в експерименті ALICE періоди роботи з важкими іонами (Pb–Pb) і протон-протонними (pp) чергуються, результуюча радіаційна обстановка змінюється на порядки величини. Ця

відмінність дозволяє нам досліджувати як короточасну реакцію сенсорів ALPIDE на інтенсивне опромінення, так і довгострокову стабільність в значно більш м'яких умовах.

У наступному підрозділі представлені репрезентативні приклади еволюції порогових параметрів в періоди збору даних Pb–Pb, коли радіаційне навантаження максимальне. Цей режим особливо інформативний, оскільки він виявляє нелінійну поведінку порогового значення, його залежність від радіального положення кожного стейву і потенційні переходи між різними режимами відгуку (збільшення → насичення → зменшення).

3.5.1 Графіки, отримані для запуску Pb+Pb

Шар 0 є найближчим до області взаємодії пучків і, отже, шаром який отримує найбільше випромінювання. Відповідний графік демонструє чітку закономірність: хоча порогові значення залишаються відносно згрупованими для всіх стейвів, ближче до кінця періоду набору даних за період Pb–Pb спостерігається чітка тенденція до зниження. Така поведінка відповідає очікуванням для чипів з високим рівнем опромінення:

- Ефективність збирання заряду знижується по мірі накопичення радіаційних пошкоджень.
- Струми витоку зростають, викликаючи зміни в ефективному внутрішньому зміщенні поверхневої частини пікселя.
- Стабілізація порога, керована ЦАП, стає менш ефективною при підвищенні власного шуму.

В результаті поріг ALPIDE поступово знижується. Цей ефект особливо виражений в шарі 0, доза якого перевищує дозу опромінення шару 6 майже на три порядки. Таким чином, спостерігається монотонне зниження, яке фізично узгоджується з прогнозованою екстремальною радіаційною обстановкою на малих радіусах (див. рис.3.3, 3.4).

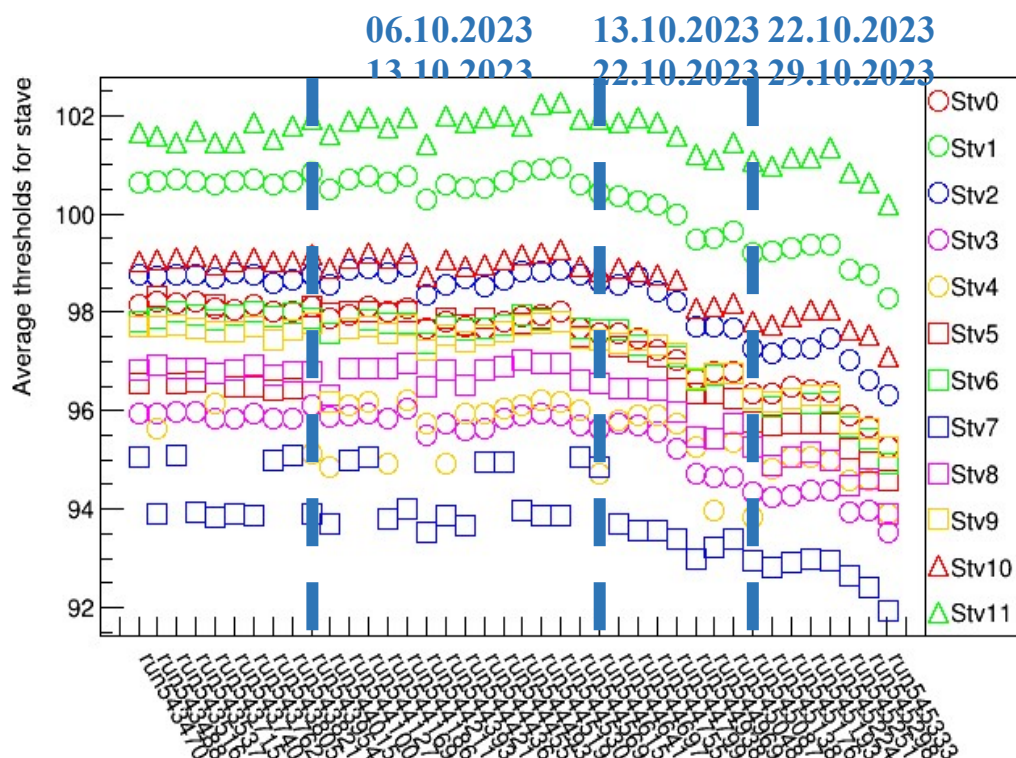


Рисунок 3.3 Приклад графіку зміни порогового значення шару 0 під час Pb-Pb запусків.

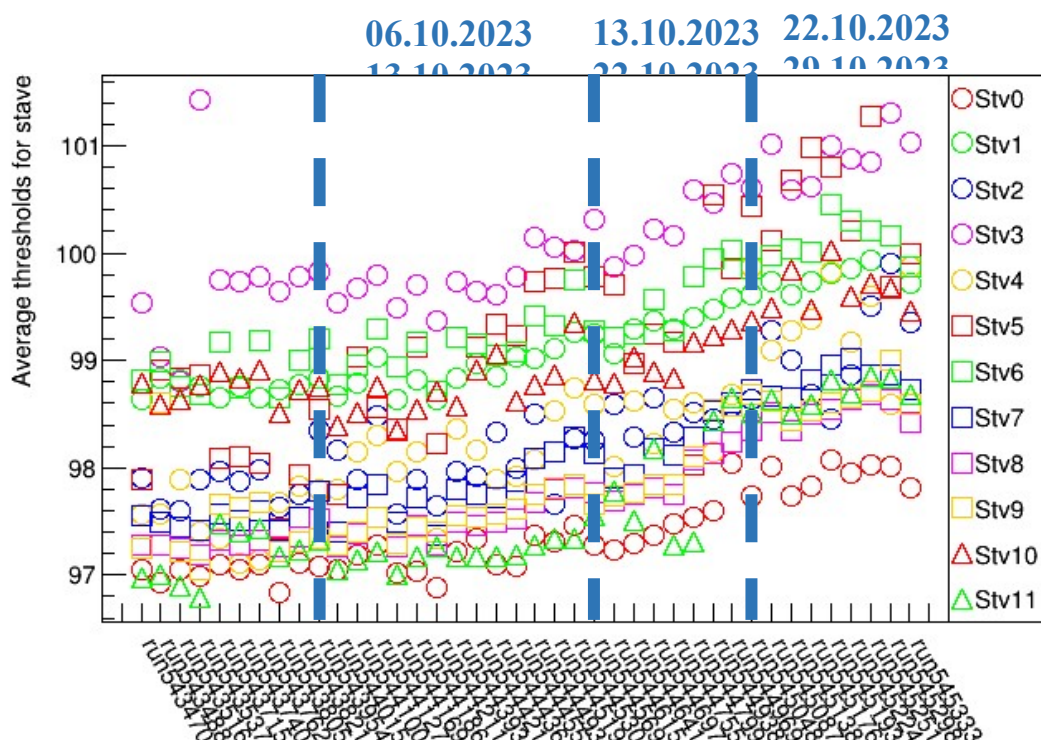


Рисунок 3.4 Приклад графіку зміни порогу для верхньої половини шару 3 під час Pb-Pb

На відміну від шару 0, порогові значення у шарі 3 спочатку збільшуються з часом, відображаючи помірне накопичення дози іонізації (TID). Ця тенденція є типовою для чипів MAPS, що працюють при проміжних радіаційних навантаженнях:

- При помірному TID електропровідність транзисторів та характеристики підсилювача змінюються таким чином, що порогове значення підвищується.
- Викликаний випромінюванням, накопичення заряду в оксидних шарах може тимчасово збільшити ефективну порогову напругу на інтерфейсі (див. рис.3.5).

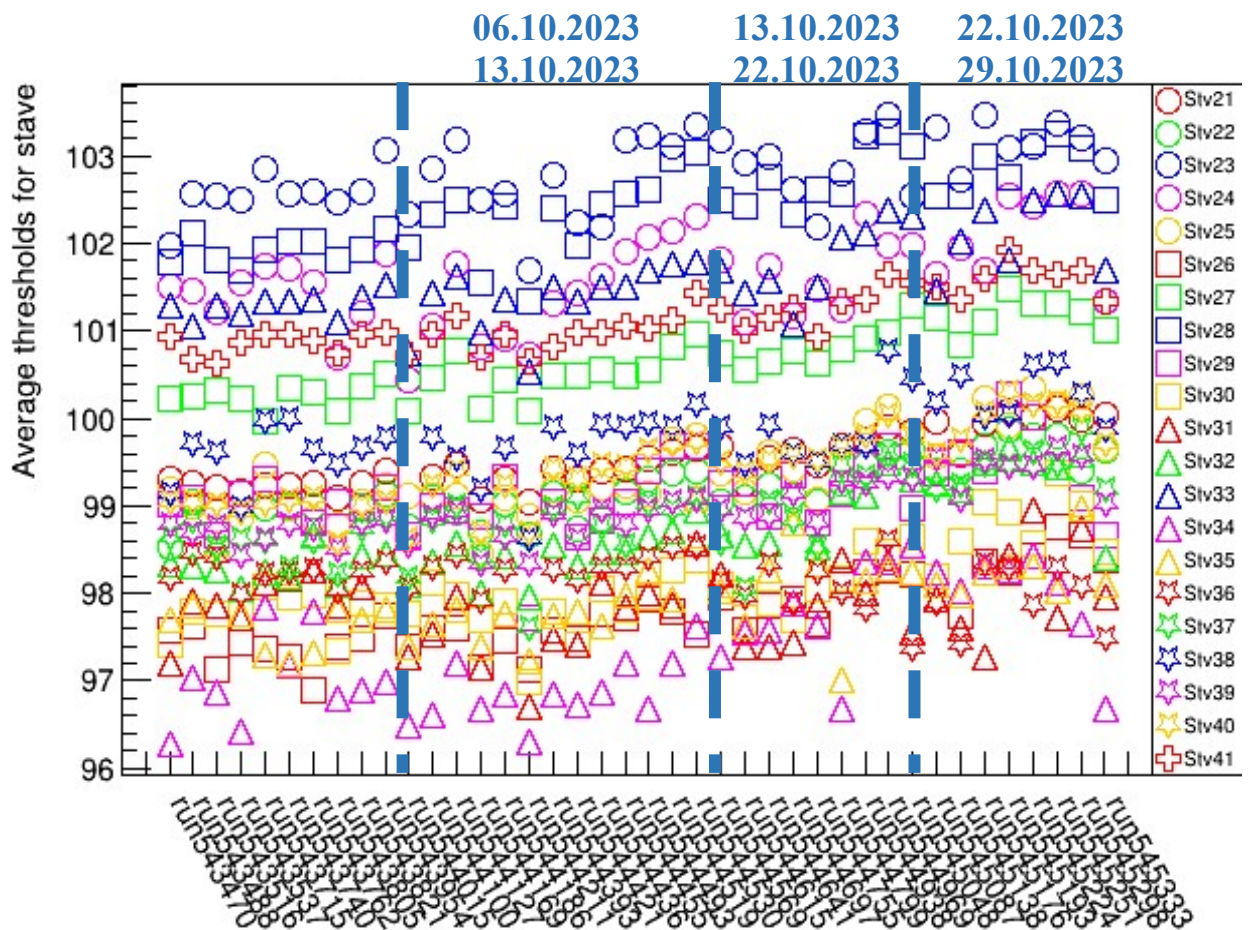


Рисунок 3.5 Приклад графіку зміни порогу для нижньої половини шару 3 під час Pb–Pb.

Однак ближче до кінця періоду роботи Pb–Pb криві демонструють помітне згладжування, що свідчить про те, що система досягає квазістабільної рівноваги, де конкуруючі механізми (підвищений шум і внутрішня стабілізація ЦАП) врівноважують один одного. Така поведінка на плато відмінно узгоджується з емпіричними спостереженнями, отриманими на опромінених прототипах ALPIDE, і прогнозами, які основані на моделюванні.

Для шару 5 радіаційне навантаження значно менше, і це відбивається в значно більш повільній зміні порогового параметру. Хоча невелика тенденція до підвищення все ще спостерігається, її нахил дуже слабкий, і не можна чітко виділити перехід до області плато. Це говорить про те, що:

- Накопиченого TID на цьому радіусі недостатньо, щоб перевести систему в режим насичення, яке спостерігається на рівні 3.
- Статистичні флуктуації від сенсору до сенсору переважають над систематичним дрейфом, викликаним випромінюванням.
- Інтерфейсна електроніка залишається в режимі, коли стабілізація, керована ЦАП, ефективно компенсує повільні зміни параметрів.

Іншими словами, порогове значення у шарі 5 все ще знаходиться в початковому режимі підвищення, далеко від точки переходу, де наслідки припливу починають посилюватися або змінюватися.

3.5.2 Загальна інтерпретація трендів Pb–Pb.

Спільний аналіз шарів 0, 3 і 5 виявляє узгоджену глобальну закономірність (див. рис.3.6):

- Поблизу області взаємодії (шар 0): порогове значення знижується через дію серйозного радіаційного опромінення і збільшення струму витоку.
- Проміжні радіуси (шар 3): порогове значення збільшується, потім наближається до плато, що відповідає ефекту помірного впливу радіації.

- Зовнішні радіуси (шар 5 і вище): зміни порогового параметру невеликі, з повільним монотонним зростанням і без видимого насичення.

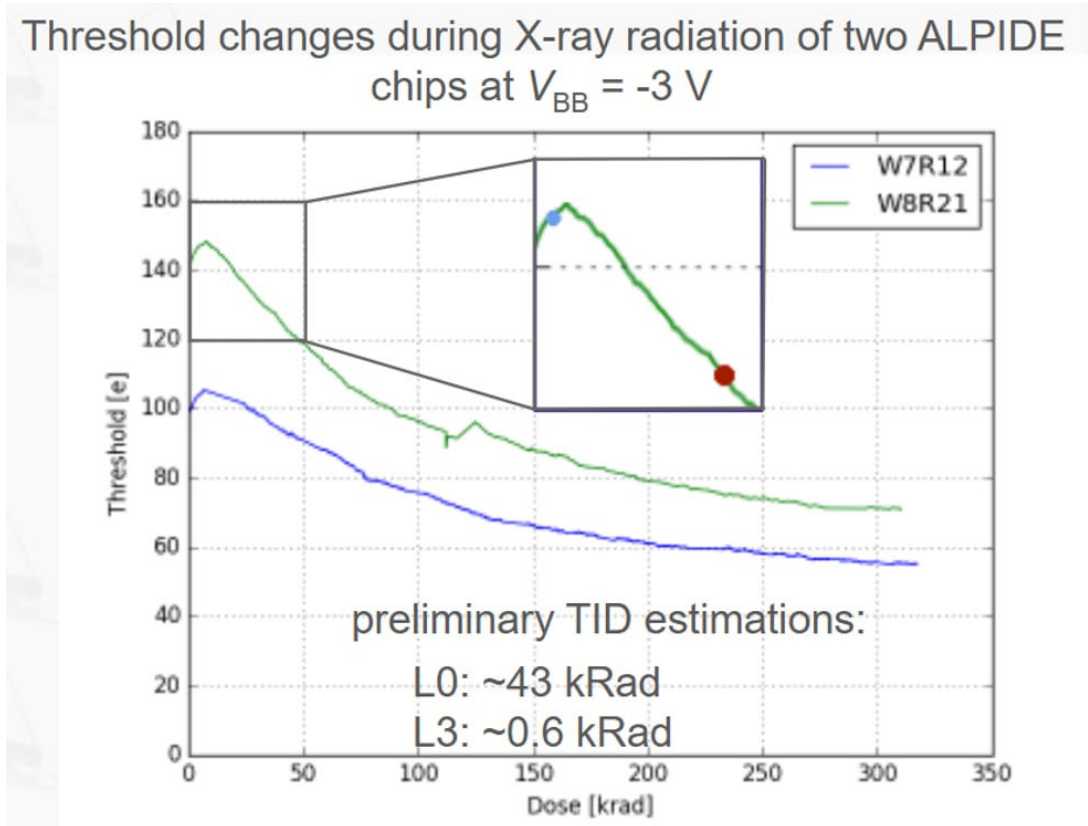


Рисунок 3.6 Дані отримані на етапі проектування ALPIDE сенсорів.
Синя точка відповідає накопленому радіаційному навантаженню на момент 2023 року. Червона точка відповідає накопленому радіаційному навантаженню на момент 2024 року

Ймовірною уніфікованої інтерпретацією є наступна послідовність:

- Дози від низьких до помірних (зовнішні шари): Порогове значення поступово збільшується.
- Проміжні дози (середні шари): Порогове значення досягає плато, коли накопичення радіаційного пошкодження частково компенсується внутрішніми механізмами регулювання.
- Високі дози (внутрішні шари): Порогове значення знову починає знижуватися через зниження ефективності збору заряду і зниження ефективної точки активації шуму.

Ця триетапна поведінка (збільшення $\rightarrow$ насичення $\rightarrow$ зменшення) відповідає спостереженням, отриманим в ході випробувань прототипів ALPIDE на опромінення, і відповідає відомій реакції MAPS technologies при різних умовах TID або NIEL.

Цікаво, що для шару 0 початкова фаза наростання взагалі не видно, що дозволяє припустити, що навіть на ранніх етапах Pb–Pb радіаційне навантаження вже знаходиться в межах режиму "високих доз". Це робить шар 0 особливо чутливим зондом з тривалою стійкістю до радіації.

3.5.2 Поведінка порогового параметру під час p–p запусків за 2024 рік

В період протон-протонних (p–p) зіткнень в 2024 р. еволюція порогового параметру демонструє помітно іншу поведінку порівняно з періодами важких іонів (Pb–Pb). Це розходження очікувано, враховуючи, що p–p взаємодії генерують значно меншу кратність часток i , отже, накладають істотно менше радіаційне навантаження на чіпи ALPIDE. В результаті ефективна доза, що накопичується ITS під час виконання p–p, залишається малою для всіх шарів, за винятком, внутрішніх шарів.

На графіку (рис.3.7) для шару 0 можна побачити монотонне зменшення середнього порогу, що відповідає поведінці зеленої кривої на рис.3.6 після проходження максимуму. Також на цьому графіку спостерігається ефект від точного коректування параметрів, які відповідають за порогове значення чіпів. Рішення про проведення коректування було прийнято на підставі систематичного аналізу параметру.

На графіку (рис.3.8) для шару 3 можна чітко спостерігати зростання порогу, що відповідає початковому етапу кривої на рисю, що говорить, про те, що шар 3 отримує набагато менше радіаційне навантаження, навіть за довгий період p–p. Коректування також спостерігається на графіку для шару 3, воно проводиться не лише для приведення до конкретного значення порогу, а і для зменшення діапазону коливання значень параметру у одному шарі.

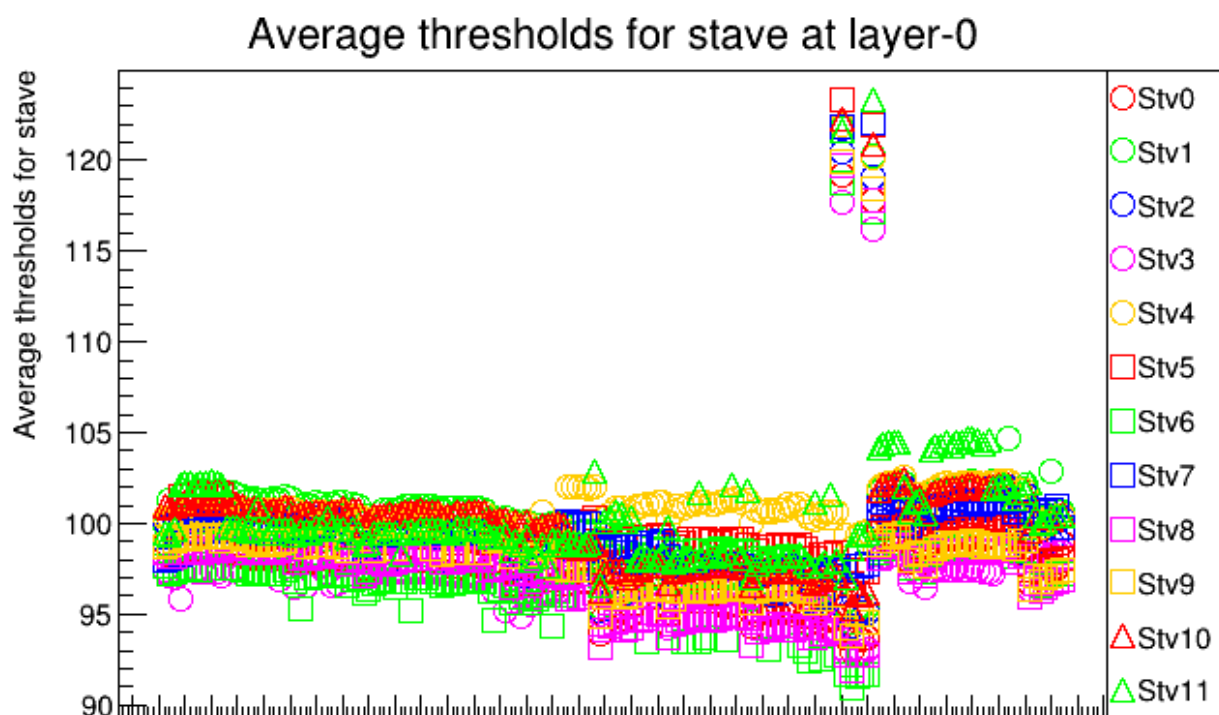


Рисунок 3.7 Приклад часового тренду порогового значення для верхньої частини шару 4 під час р-р запусків (квітень 2024 р.)

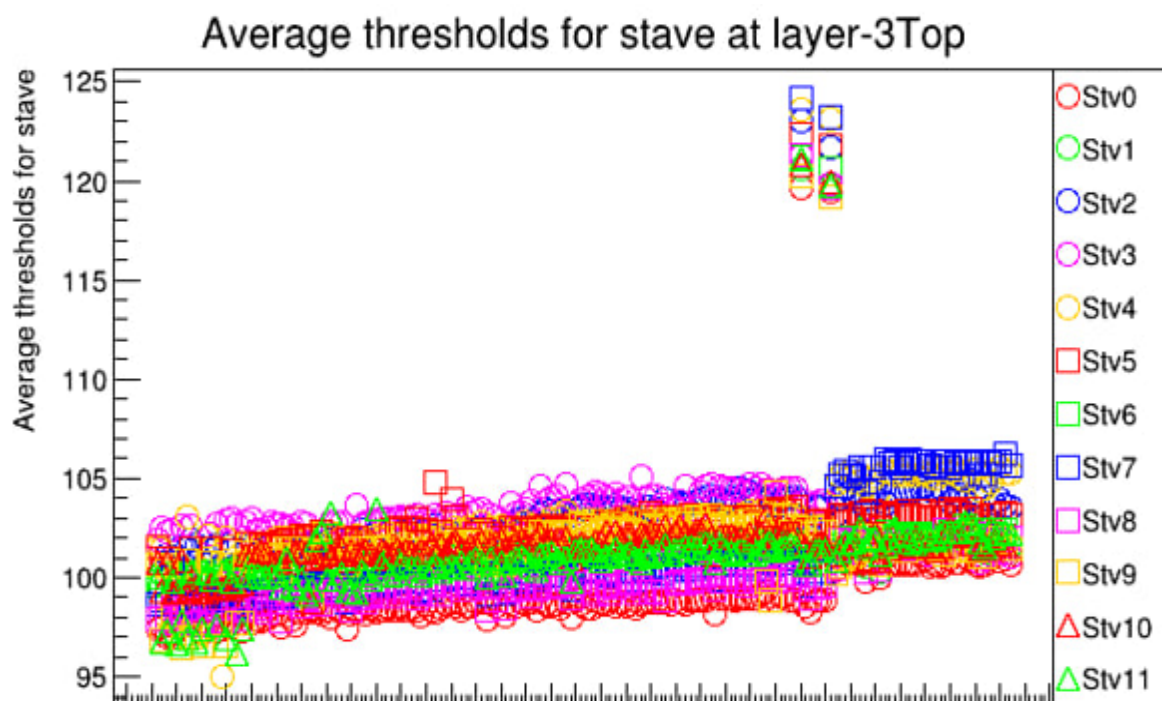


Рисунок 3.8 Приклад часового тренду порогового значення для верхньої частини шару 4 під час р-р запусків (квітень 2024 р.)

Для більш детального аналізу було обрано невеликий період збору даних (квітень 2024 року). Як видно на рис.3.9, більшість стейвів демонструють лише незначні коливання низької амплітуди навколо стабільного середнього значення. Ці коливання залишаються в очікуваних статистичних межах і в першу чергу відображають:

- залежний від температури електронний дрейф,
- короточасні коливання регулювання ЦАП,
- зміни миттєвої яскравості ВАУ при заданих заповненнях.

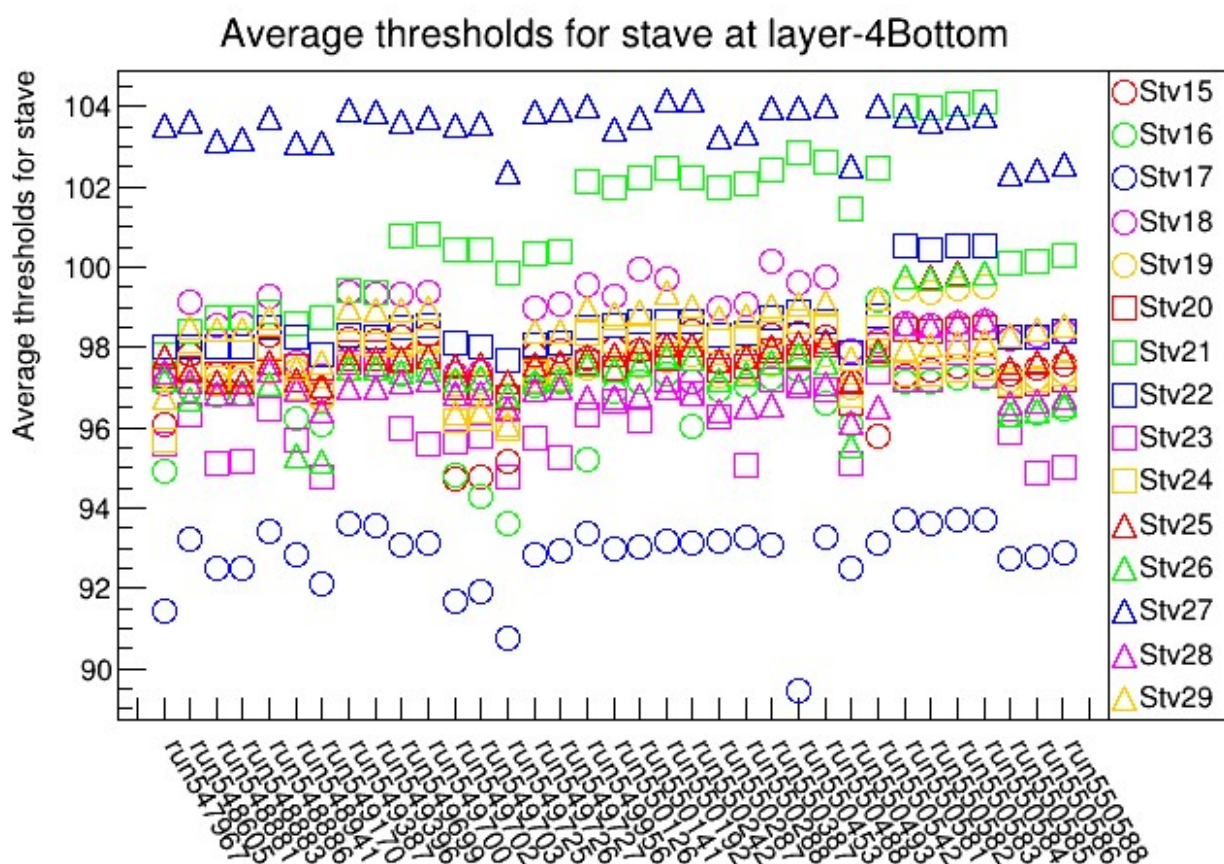


Рисунок 3.9 Приклад часового тренду порогового значення для верхньої частини шару 4 під час р-р запусків (квітень 2024р.).

У шарі 4 і інших зовнішніх шара, проаналізованих за цей період, важко визначити систематичну довгострокову тенденцію, що підтверджує, те що радіаційне середовище під час роботи р-р не створює впливу на поріг заряду чіпів ALPIDE.

Одним помітним виключенням є стейв 21, який демонструє монотонне зростання протягом усіх квітневих запусків 2024 року. Така поведінка узгоджується з раніше спостережуваними випадками неправильно налаштованого локального ЦАП або короткочасної нестабільності низьковольтного ланцюга живлення. Спостерігається стрибкоподібне підвищення порогового значення для запусків 550581-550584, що збігається із запланованим зміною параметрів детектора, підтверджуючи, що аномалія викликана не випромінюванням, а приладами.

Поведінка шарів 3-6 залишається незмінною:

- немає монотонного погіршення якості,
- відсутність утворення плато,
- немає викликаного випромінюванням зниження, як це спостерігається в періоди P_b – P_b .

Ці результати встановлюють набір даних p – p за квітень 2024 року в якості контрольного періоду з мінімальним радіаційним впливом. Такі періоди особливо корисні для перехресних перевірок характеристик детекторів, порівняльного аналізу стабільності калібрування і перевірки того, що параметри ЦАП залишаються в межах заданих робочих інтервалів.

На наведених графіках (рис.3.10, 3.11) (побудованих на експериментальних даних за 2025 рік) можна спостерігати стрибки значень в лівій частині графіків – це обумовлено спеціальними параметрами запусків для перевірки працездатності детектору і ці високі значення не впливають на основну тенденцію порогового параметру.

На графіці, який представлений для шару 0, можна побачити коливання у середній частині графіку – це відображає проведення оптимізації порогу для приведення його до конкретного значення (100 DAC). Оптимізація позначається на графіках як чорна штикована лінія. Висновки про необхідність її проведення, в тому числі робились на основі цієї роботи.

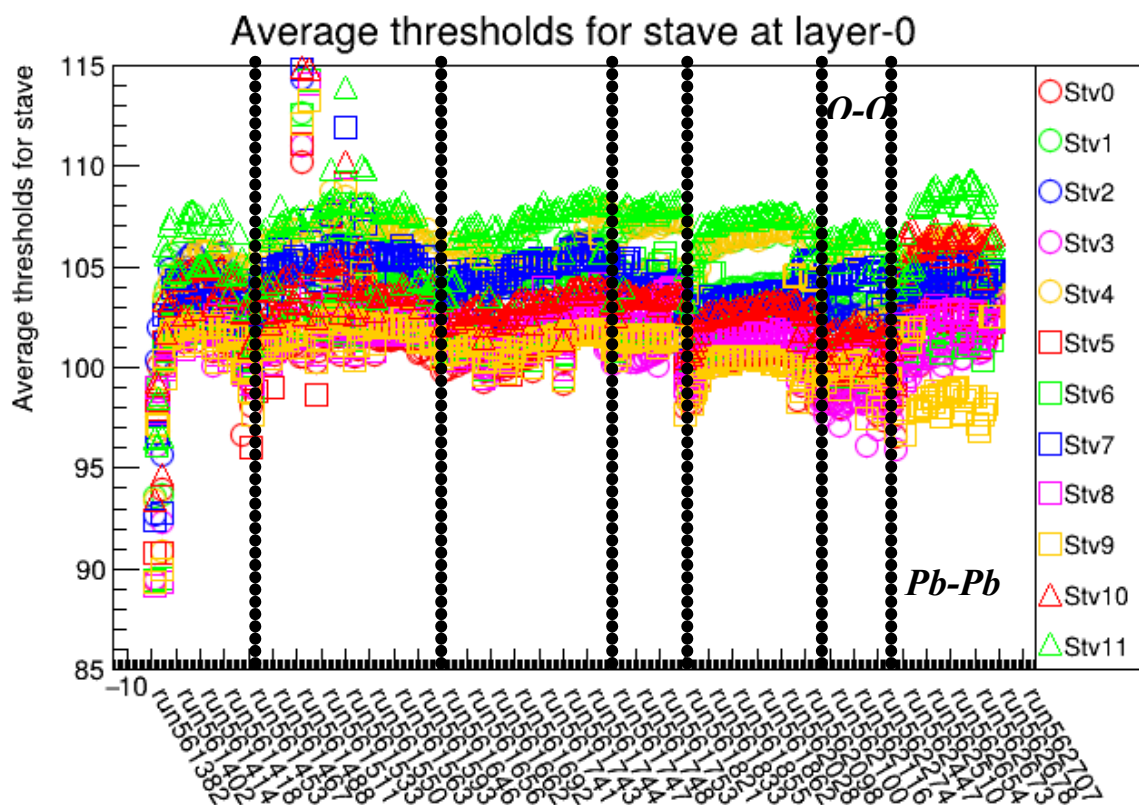


Рисунок 3.10 Часовий тренд порогового значення для шару 0 за весь 2025 рік

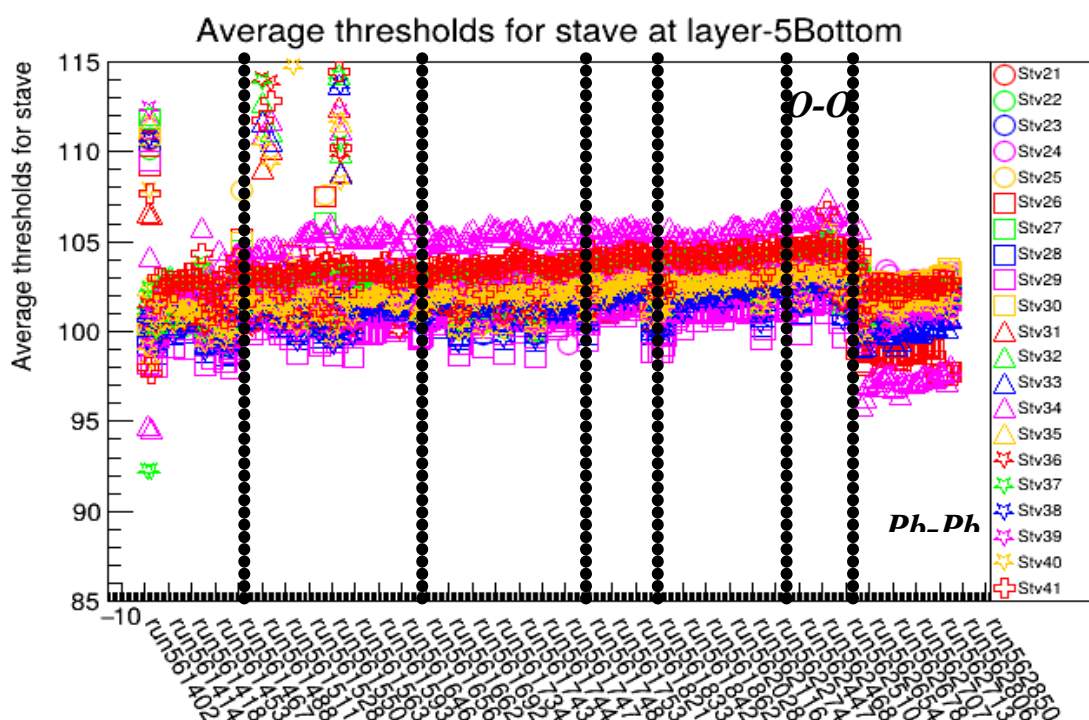


Рисунок 3.11 Часовий тренд порогового значення для нижньої частини шару 5 за весь 2025 рік

Між кожним етапом оптимізації параметру, спостерігається тренд на зростання, для всіх шарів. Шар 5 має майже постійну тенденції на зростання (у середній частині графіку), це відповідає дослідженням проведеним під час технічного проектування чипів.

Права частина графіків відповідає, коротким періодам набору даних при взаємодії іонів кисню (O-O) та періоди при взаємодії важких іонів свинцю (Pb-Pb). У шарі 0 діапазон значень для кожного стейву збільшився, проте вони були стабільні та коливалися біля конкретного значення порогу. У шарі 5 зростання порогу має більшу кривизну, ніж у р-р періоді, що повністю узгоджується з минулими дослідженнями.

3.5.4 Радіаційне навантаження

Були розраховані TID та NIEL в залежності від яскравості ВАК в різні періоди його роботи. Ці дані повністю підтверджують, що радіаційне навантаження на внутрішні шари на порядок більше ніж на зовнішні шари.

Розрахунки було проведено для шарів: 0, 1, 2, 3, після чого стало зрозуміло, що для наступних шарів доза радіації замала, щоб спостерігати ефект (див. табл.3.1 та рис.3.12).

Таблиця.3.1

Радіаційне навантаження на різні шари у періоди зіткнень р-р, Pb-Pb.

	TID (krad)				NIEL (1 MeV n_eq/cm^2)			
	L0	L1	L2	L3	L0	L1	L2	L3
pp2022	12,3	7,2	4,1	0,2	1,74E+11	1,16E+11	7,45E+10	6,57E+09
pp2023	5,2	3,1	1,7	0,1	7,37E+10	4,90E+10	3,15E+10	2,78E+09
Pb-Pb2023	12,1	7,2	4,0	0,2	1,28E+11	8,51E+10	5,50E+10	4,84E+09
pp2024	20,9	12,3	7,0	0,3	2,97E+11	1,97E+11	1,27E+11	1,12E+10
Pb-Pb2024	11,7	7,0	3,9	0,2	1,71E+11	1,14E+11	7,34E+10	6,46E+09
pp2025	19,1	11,3	6,4	0,3	2,72E+11	1,81E+11	1,16E+11	1,03E+10
Сумарна	81,3	48,0	27,3	1,2	1,12E+12	7,41E+11	4,78E+11	4,21E+10

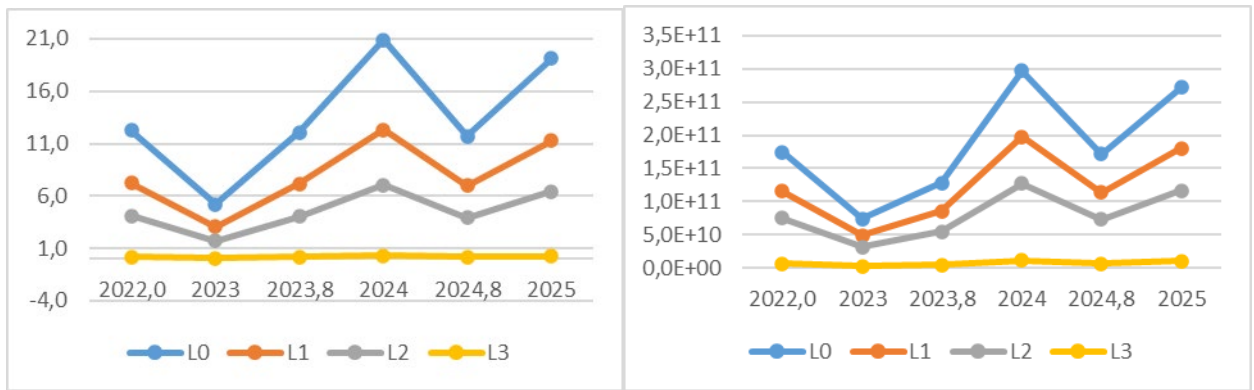


Рисунок 3.12 Візуалізація даних радіаційного навантаження на різні шари детектору у періоди зіткнень p-p, Pb-Pb.

Як видно радіаційне навантаження для шару 0, від 10 до 80 раз більше ніж для шару 3, дуже залежить від характеру систем, які зіштовхуються, та характеристики пучків. Це повністю узгоджується з даними отриманими на стадії проектування, у продовж вивчення радіаційного ушкодження чипів. Видно, що шар 3 не отримує значного радіаційного ушкодження, таким чином шари 4, 5, 6 отримують ще менше, саме тому значення для цих шарів не вивчалися.

3.5.5 Шум середнього порогового значення

Шум, пов'язаний з пороговим параметром, кількісно визначає відхилення відгуків окремих пікселів від ідеалізованого наближення S-подібної кривої. Формально це відповідає параметру ширини σ , отриманого при апроксимації кривою ймовірності активації пікселя (див. рис. 2.1). У той час як порогове значення характеризує початок активації пікселя, параметр шуму відображає стабільність і чіткість цієї активації і дуже чутливий до:

- продуктивності аналогового інтерфейсу,
- коливань базової лінії,
- ефективності збирання заряду,
- ефектів локального радіаційного ураження,
- коливань температури і стабільності джерела живлення.

Моніторинг шуму був введений в якості додаткового параметра контролю якості в травні 2024 року для підвищення чутливості процесу калібрування. На рис.3.13 наочно показано різке зниження рівня шуму в крайній лівій ділянці шкали, що відповідає спеціальною процедурою оптимізації шуму, що виконується командою контролю якості, це рішення так само приймається на основі проведеного мною аналізу. Це покращення помітно у всіх стейвах внутрішніх шарів, підкреслюючи ефективність перекаліброваних налаштувань ЦАП (в першу чергу I_{THR} і V_{CASN}).

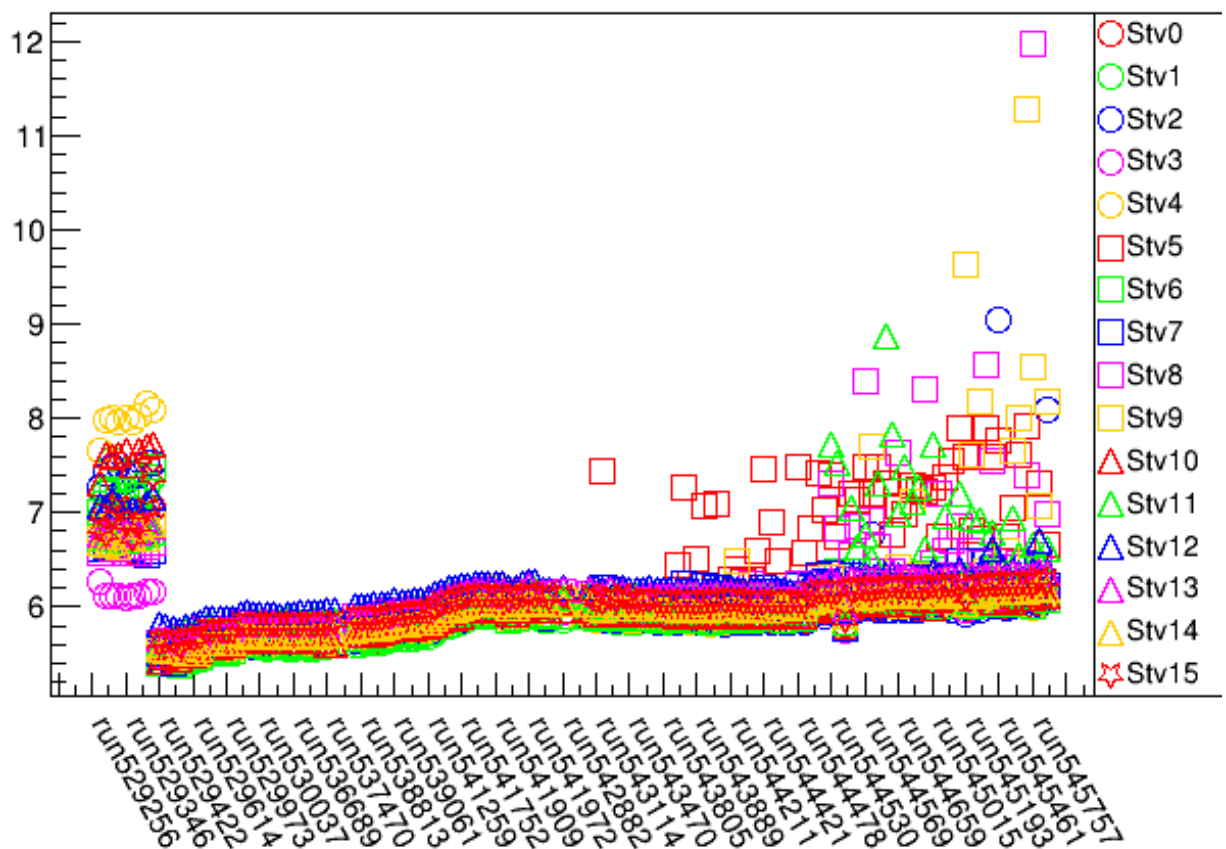


Рисунок 3.13 Приклад еволюції шуму для шару 1 за рік

Особливої уваги заслуговує поведінка шуму в періоди Pb–Pb. Через надзвичайно високу кількість частинок, яка досягає 8000 або більше треків на одну подію — заповнюваність локального потрапляння значно збільшується, що призводить до:

- посиленням коливальних базової лінії,

- тимчасового розширенню S-подібної кривої через підвищення активності пікселів,
- підвищеної сприйнятливості до тимчасових порушень збору заряду.

Ці ефекти відображені у зміні кривизни на рис. 3.14, де параметр шуму зростає в періоди взаємодії з високою щільністю треків.

Навпаки, зовнішні шари демонструють майже постійну шумову поведінку, як показано на рис.3.14 та 3.15. Оскільки шари 5 і 6 отримують суттєво менші дози випромінювання і піддаються меншій кількості влучень за подію, їх аналогові інтерфейсні схеми залишаються ближче до номінального стану навіть під час роботи Pb–Pb.

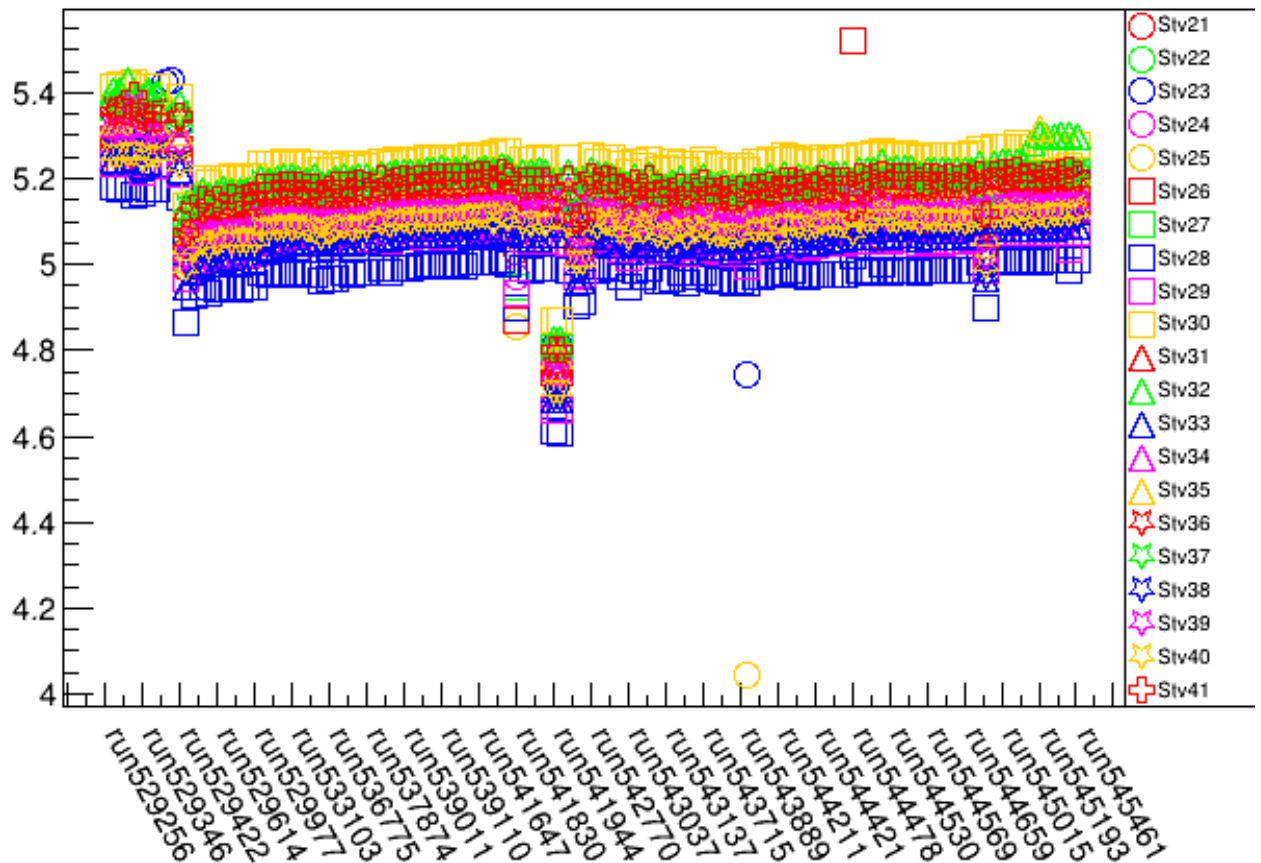


Рисунок 3.14 Динаміка шуму для нижньої частини шару 5

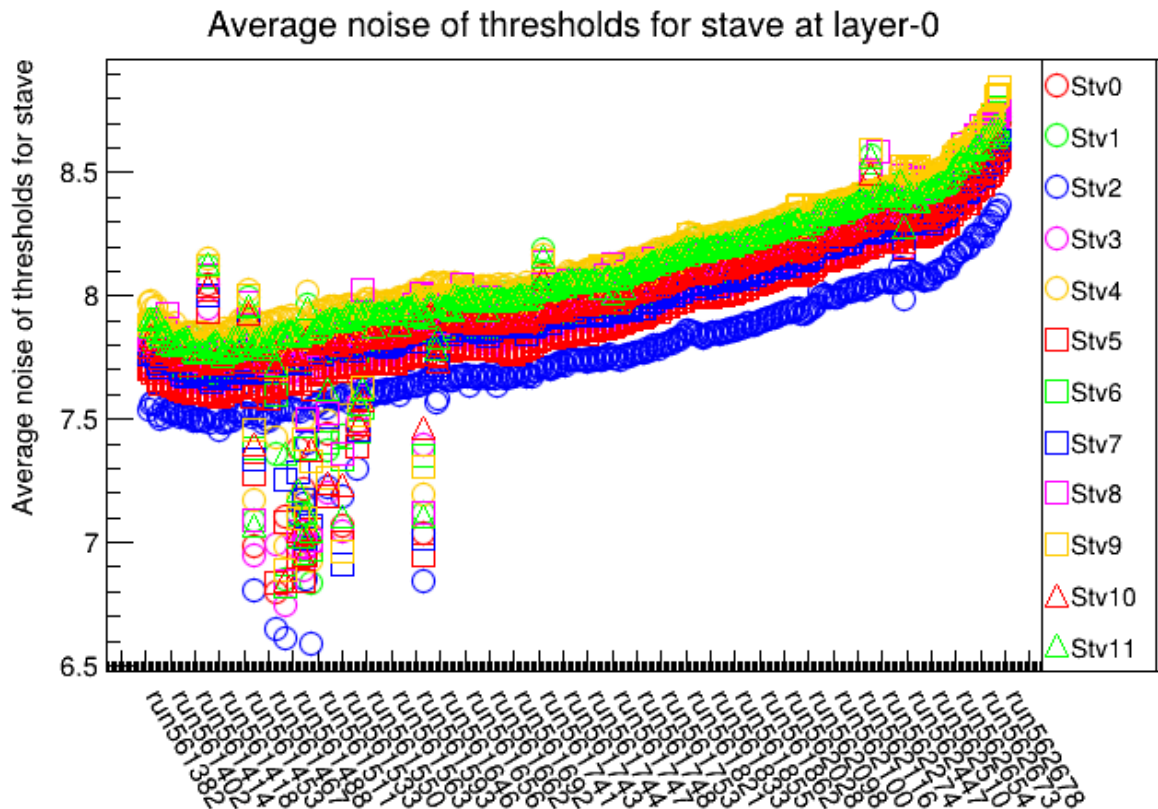


Рисунок 3.15 Динаміка шуму для шару 0, за 2025 рік

У внутрішніх шарах, особливо на шарах 0 і 1, ситуація більш делікатна. У правій частині графіків можна спостерігати кілька нерегулярних збурень. Ці коливання можуть бути викликані:

- недосконалою оптикою пучка і флуктуаціями точки взаємодії у ВАК, які періодично зміщують область світіння і тимчасово збільшують локальні влучання у ВАК;
- граничної нестабільністю в системі розподілу низької напруги або напруги зсуву, яка може впливати на стейви;
- температурними неоднорідностями у внутрішньої механічної опорної конструкції, які більш чутливі до миттєвих умов пучка.

Основне, що впливає на шум – це випромінювання, оскільки воно розмиває S-криву, та збільшує шум. Ефекти, які підтверджують це, можна спостерігати на графіку наведеному за 2025 рік, де кривизна значно збільшується, після початку Pb-Pb періоду.

Деякі стрибки значень шуму протягом всього 2025 року пов'язані з моментальним ростом шуму у конкретних чіпах, що відображається на середньому значенні для всього відповідного стейву.

Приклади графіків шуму наведені у додатку А.

Вивчення та спостереження цього параметра значно зміцнює систему контролю якості, дозволяючи на ранній стадії виявляти апаратні аномалії, які можуть бути непомітні при аналізі тільки порогових значень. Чутливість, до деяких факторів, робить аналіз шуму цінним інструментом для:

- діагностики вражених чипів,
- виявлення несправностей у колах електроживлення,
- дозволяє відрізнити проблеми з калібруванням від реальних наслідків радіаційного пошкодження.

РОЗДІЛ 4

ВИВЧЕННЯ КОРЕЛЯЦІЇ МІЖ ПОРОГОВИМ ПАРАМЕТРОМ І КОЛИВАННЯМИ НАПРУГИ

4.1 Перевірка гіпотези та аналіз даних

4.1.1 Обґрунтування та формулювання гіпотези

Стабільність порогу активації чіпу визначається складною взаємодією декількох фізичних і операційних механізмів. До числа найбільш важливих факторів відносяться:

- накопичена доза опромінення (TID / NIEL),
- внутрішні зміщення ЦАП (насамперед V_{CASN} та I_{THR}),
- коливання температури,
- залежні від часу зміни струмів витоку,
- стабільність роботи розподільної системи низької напруги і напруги зміщення.

Хоча всі ці фактори можуть впливати на порогове значення, одним з найбільш прямих і потенційно універсальних факторів є стабільність напруги живлення. Оскільки чіпи ALPIDE містять аналогові попередні підсилювачі та дискримінатори, які залежать від стабільної точки зміщення, розумно припустити, що навіть невеликі коливання напруги можуть змінити ефективний поріг активації пікселів.

Таким чином, робоча гіпотеза для цього розділу була сформульована наступним чином:

- Нульова гіпотеза: невеликі коливання напруги живлення не викликають статистично значущих змін порогового параметра.
- Альтернативна гіпотеза: невеликі коливання напруги живлення впливають на відхилення порогового параметру.

Для перевірки цієї гіпотези було проведено цілеспрямоване кореляційне дослідження. Ідея полягала в тому, щоб виявити цикли

калібрування, в яких середнє порогове значення демонструвало несподівані відхилення, а потім перевірити, чи збігаються ці відхилення з аномаліями в наруги, що подається.

4.1.2 Вибір циклів для аналізу

Перший етап аналізу полягав в автоматичному скануванні всіх доступних калібрувальних циклів. Для кожного циклу обчислювалося середнє порогове значення для кожного: чіпу, стейву, шару. Потім був розрахований показник відхилення $\Delta Q = Q_{\text{запуску}} - Q_{\text{минулий}}$. Порогові значення викидів були визначені як:

- зміни, що перевищують одну одиницю DAC,
- відхилення, які не відповідають довгостроковим тенденціям,
- окремі підняття рівня, не пов'язані з періодами опромінення або процедурами технічного обслуговування.

На основі цієї процедури відбору були складені таблиці, в яких вказані: номер запуску, день запуску, уражений шар, величина відхилення, коментарі щодо можливого робочого контексту. Ці таблиці слугували основним набором даних для кореляційного тестування (див. рис.4.1 та табл. 4.1).

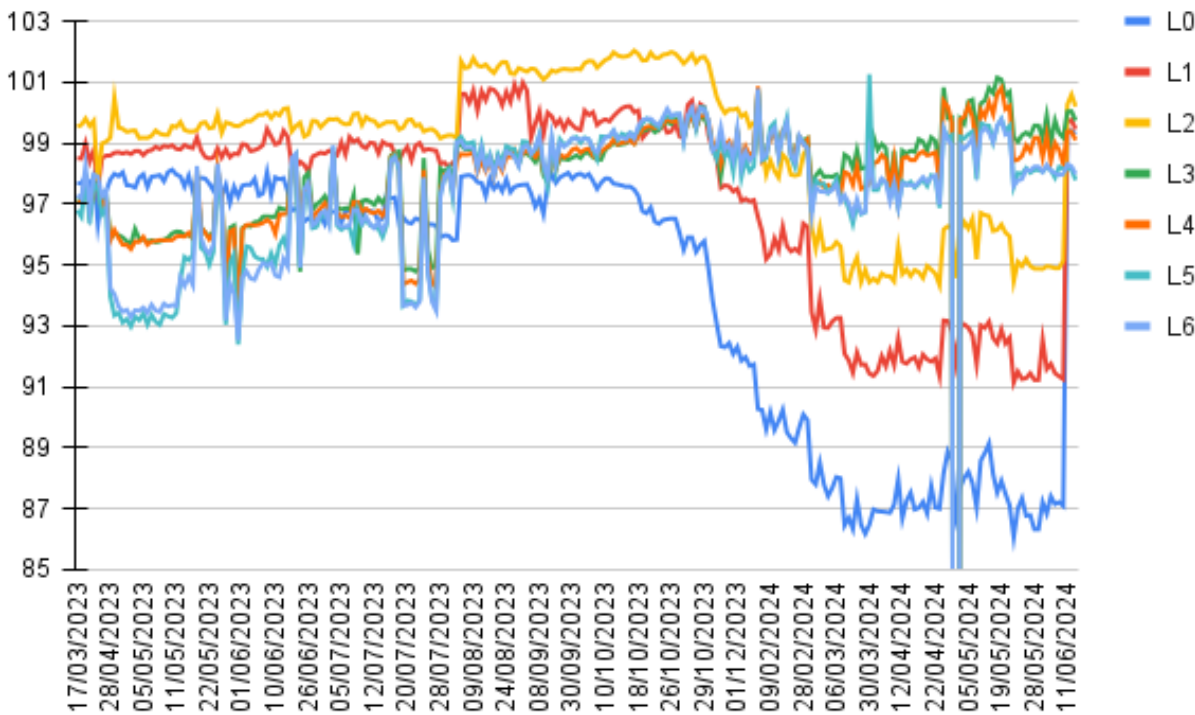


Рисунок 4.1 Середнє порогове значення на шар

Таблиця 4.1

Приклади запусків з виявленими відхиленнями порогового значення за 2023

date	run	L0	L1	L2	L3	L4	L5	L6
22/05	536826	97.444	98.5196	99.5125	96.0846	96.0407	95.4318	95.6669
25/05	536975	97.927	98.825	99.9458	97.9607	98.1712	98.2384	98.3295
27/05	537090	97.2833	98.5283	99.3328	97.2348	97.2196	96.7308	97.1941
29/05	537138	97.6258	98.7896	99.6722	94.0014	93.9461	93.0413	93.1878
30/05	537257	97.0348	98.5359	99.6378	96.2175	96.0996	95.0452	94.4049
31/05	537280	97.5615	98.6544	99.5696	96.2952	96.1684	95.3643	94.0364
31/05	537336	97.244	98.6329	99.5528	93.4482	93.1677	92.3889	92.5307
01/06	537415	97.6018	98.9634	99.6241	96.2142	96.1652	94.6399	94.5811

diffL0	diffL1	diffL2	diffL3	diffL4	diffL5	diffL6
-0.224	0.0303	0.0291	0.1625	0.1971	0.4235	0.2998
0.483	0.3054	0.4333	1.8761	2.1305	2.8066	2.6626
-0.6437	-0.2967	-0.613	-0.7259	-0.9516	-1.5076	-1.1354
0.3425	0.2613	0.3394	-3.2334	-3.2735	-3.6895	-4.0063
-0.591	-0.2537	-0.0344	2.2161	2.1535	2.0039	1.2171

0.5267	0.1185	-0.0682	0.0777	0.0688	0.3191	-0.3685
-0.3175	-0.0215	-0.0168	-2.847	-3.0007	-2.9754	-1.5057
0.3578	0.3305	0.0713	2.766	2.9975	2.251	2.0504

4.1.3 Дані контролю напруги і струму

Щоб перевірити, чи пов'язані порогові відхилення з коливаннями напруги, з бази даних ALICE були вилучені наступні дані напруги на джерелі живлення шару. Графіки для напруги відтворювалися онлайн на спеціалізованій дошці моніторингу даних. Для кожного досліджуваного запуску калібрування були зібрані дані про напругу, що охоплюють приблизно 12 хвилин, оскільки саме такий час займає правильно завершений калібрувальний запуск. За цей проміжок часу ведеться візуальний огляд графіків для напруги та визначаються коливання AVDD, після чого робиться висновок, пов'язані коливання порогу для шару з малими коливаннями напруги (див. рис.4.2).

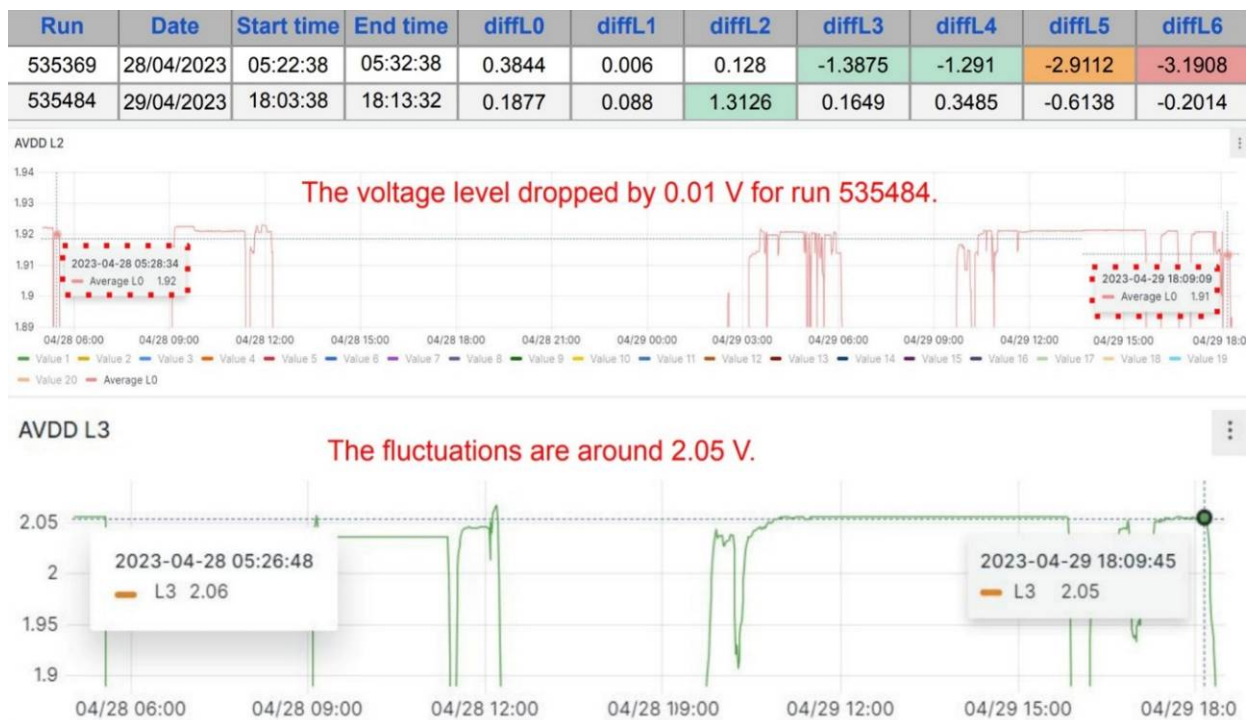


Рисунок 4.2 Приклад коливання напруги під час калібрування

З рисунку, на якому наведено приклад графіків для шарів 2 та 3, для двох калібрувальних запусків, можна зробити висновки, що напруга була стабільною з малими коливаннями порядку $\pm 0,01\text{В}$.

4.1.4 Візуальне порівняння аномалій

Незважаючи на відсутність глобальної кореляції, були проведені додаткові візуальні перехресні перевірки для кількох репрезентативних запусків. Ці пробіги включали найбільші порогові стрибки, що спостерігаються в: шарі 0, верхній половині шару 3, нижній половині шару 4. Кожен випадок аналізували шляхом накладання графіка зміни порогового значення на відповідний графік коливань напруги. Було зауважено, що коли напруга залишалася монотонною пороговий параметр показував раптове відхилення. В той самій час ніяких ознак нестабільності електропостачання або стрибків струму помічено не було.

У деяких випадках відхилення можна було співвіднести з:

- налаштування ЦАП,
- зміни в конфігурації порогового калібрування, виконані командою контролю якості
- тимчасова нестабільність порогу конкретного стейву, яка була відома команді контролю якості з інших причин.

4.2 Висновок до розділу

Метою цієї глави було дослідити потенційний причинно-наслідковий зв'язок між коливаннями напруги на джерелі живлення та змінами в отриманому середньому пороговому значенні чипів ALPIDE. Робоча гіпотеза припускала, що короточасні відхилення в напрузі, можуть впливати на ефективну робочу точку вбудованого аналогового інтерфейсу, тим самим призводячи до помітних зрушень порогового параметра на рівні стейву і шару. Такий ефект був би фізично обґрунтований: недостатня стабілізація базових значень ЦАП V_{CASN} і I_{THR} в поєднанні з перехідними стрибками

напруги могли б змінити базову величину дискримінатора і отримане порогове значення.

Однак аналіз, проведений за період 2023-2024, не підтвердив цю гіпотезу щодо діапазону відхилень напруги, досягнутих при стандартних операціях збору даних. Виявилось, що коливання порогу не пов'язані з малими коливаннями напруги, що може підтвердити стійкість ALPIDE чипів та системи ВТС загалом.

Аналіз був проведений для періоду з 17.03.2023 по 12.06.2024, в цей проміжок часу, в тому числі, проходили запуски важких іонів. Виявилось, що велике випромінювання (Pb-Pb запуски), не вплинуло на відсутність зв'язку між коливаннями порогу та малими коливаннями напруги. Проте, наскільки відомо аналіз було продовжено іншими дослідниками і спираючись на більший набір експериментальних даних, була виявлена залежність, яка може свідчити про наявність кореляції.

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ ПОРОГОВИХ ЗНАЧЕНЬ АКТИВАЦІЇ ПІКСЕЛІВ

Вивчення значень активації на рівні пікселів являє собою один з найбільш детальних діагностичних підходів, доступних для оцінки продуктивності і довгострокової стабільності чипів ALPIDE в системі ALICE ITS. Хоча попередні розділи цієї роботи зосереджувались на зміні порогових значень з часом та великомасштабних агрегованих показниках, цей розділ розглядає мікроскопічну поведінку окремих пікселів та виникаючі колективні властивості чипів на одному стейві.

Мета полягає в тому, щоб витягти значущу структуру з розподілів порогів активації і пов'язаних з ними параметрів шуму, порівнявши ці структури за шарами детектора і за кількома періодами калібрування. Два набори даних з калібрувальних запусків, зареєстрованих у червні та жовтні, є основою для порівняння. Саме ці запуски обрані як приклади «добрих» запусків.

Аналіз відтворює розподіл активації пікселів на основі файлів дерев з розширенням root, де збережені всі дані про калібрувальний запуск, які знаходяться у базі даних ALICE. Працюючи з root деревами, а не з попередньо агрегованими гістограмами, алгоритм зберігає повну деталізацію і виявляє ледь помітні сигнатури – структурні, теплові або пов'язані з розподілом потужності, — які були б втрачені після усереднення.

Результати дозволяють отримати як безпосередні показники контролю якості, так і дані довгострокового моніторингу, корисні для прогнозування технічного обслуговування та виявлення радіаційного ушкодження чипів.

5.1 Структура даних та алгоритм відновлення

Вихідні результати калібрування – дані порогу активації кожного пікселя для усього детектора. Таким чином, для кожного запуску

калібрування TTrees містять більше ніж 12,5 мільярдів записів лише для порогу, в той час як у структурі збережені дані про шум та інші параметри калібрування. Конвеєр аналізу спроектований таким чином, щоб він залежав від пам'яті і був масштабованим: дані передаються в потоковому режимі і групуються за ідентифікатором чіпу, гістограми накопичуються поступово, а зведена статистика обчислюється у процесі.

Для кожного чіпу алгоритм буде:

- діаграму активації пікселів (ширина комірки = 1 DAC),
- діаграму піксельного шуму,
- зведені дескриптори (середнє, стандартне відхилення).

Діаграми на рівні стейву алгоритм буде шляхом накладання діаграми чіпу, що належать до одного і того ж самого стейву (див. рис. 5.1).

Number of pixel per THR for chip 2

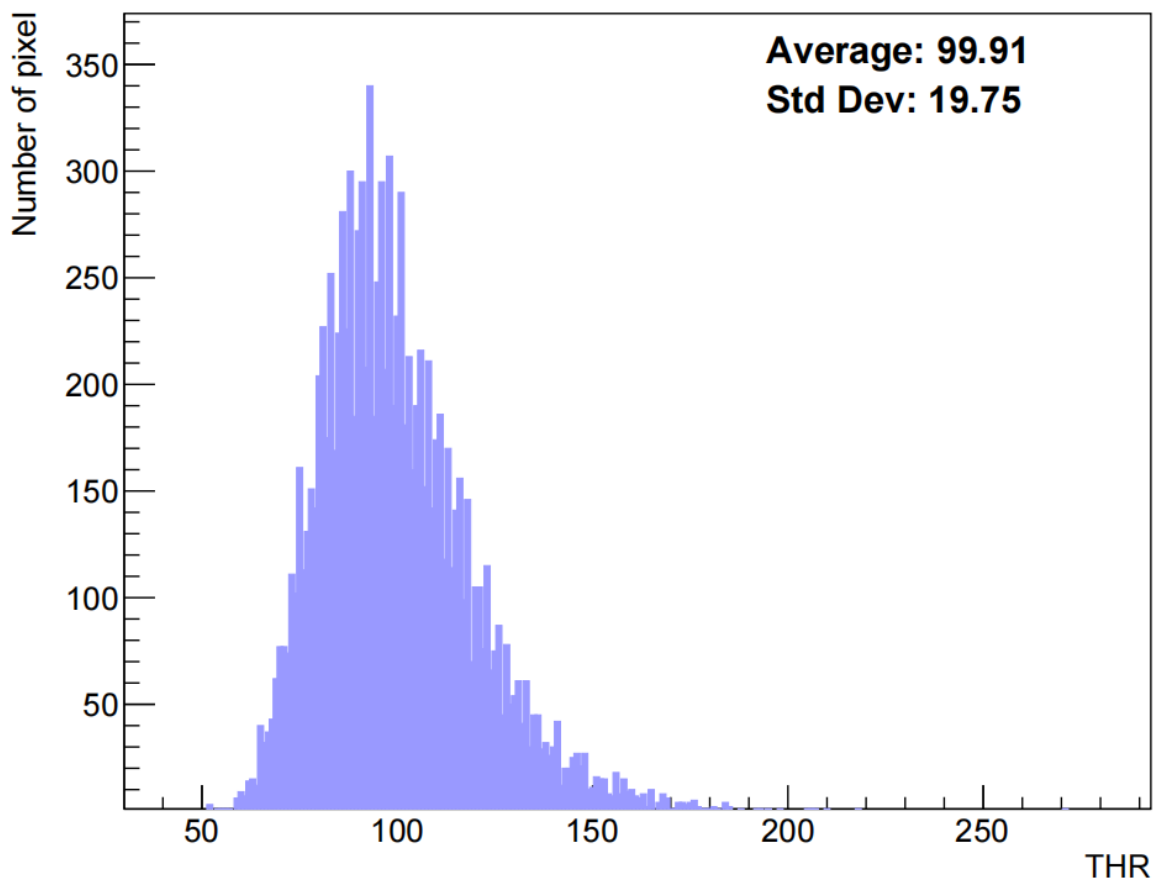


Рисунок 5.1 Приклад діаграми активації на рівні пікселів зі статистикою

Індекс чіпу був обраний за допомогою наскрізної нумерації усього детектору, загальна кількість чипів 24120. Оскільки кількість отриманих рисунків занадто велика, даний алгоритм в першу чергу розроблювався для аналізу стану внутрішніх шарів (шари 1, 2, 3). На внутрішніх шарах у стейвів по 9 чипів та кількість стейвів дозволяє їх опрацювати власноруч.

Всі гістограми містять однакове маркування осей і узгоджені позначення блоків DAC для полегшення порівняння між запусками.

5.2 Теоретичні очікування та знайдені відхилення

В ідеальному детекторі порогові значення пікселів на чипі утворювали б вузьку гауссову криву, ширина якої визначається тимчасовим електронним шумом. Реальні пристрої відрізняються від цього ідеалу через низку факторів: обмеженого дозволу ЦАП, невідповідності транзисторів між пристроями, мінливості ємності діодів, неоднорідного накопичення заряду і впливу навколишнього середовища, такого як випромінювання з ВАК та температурні градієнти або перепади ІЧ-випромінювання від джерела живлення. Ці ефекти викликають характерну асиметрію в бік збільшення значень і подовжений хвіст на гістограмах активації для кожного чіпу. Важливо зазначити, що така асиметрія може бути стаціонарною (тобто структурною) або еволюційною (тобто, змінну у часі, що свідчить про деградацію); для розрізнення цих можливостей потрібні порівняльні дослідження.

5.3 Спектри активації на рівні пікселів: спостереження

Набори даних за червень та жовтень демонструють високу узгодженість спектрів активації для кожного чіпу: кожен чіп демонструє яскраво виражений основний пік, що супроводжується правим хвостом. Положення піків на чіпах зазвичай різняться на 1-3 одиниці DAC, це відхилення в рамках похибки за період у 5 місяців. Форма хвосту відтворювана у всіх випадках, що виключає короточасні експлуатаційні збої

в якості основних причин. Статистичні показники (середнє значення, стандартне відхилення) були розраховані для всіх чипів;

Для контекстуалізації змін ми визначаємо два індикатори моніторингу:

$\Delta\mu_{chip} = \mu_{chip(жовтень)} - \mu_{chip(червень)}$: зміна середнього порогу для кожного чіпу.

$\Delta\sigma_{chip} = \sigma_{chip(жовтень)} - \sigma_{chip(червень)}$: зміна стандартного відхилення для кожного чіпу.

На детекторі $\Delta\mu_{chip}$ знаходиться в межах ± 3 DAC для переважної більшості чипів; $\Delta\sigma_{chip}$ також невеликий. Висновок полягає в тому, що поведінка активації стабільна на досліджуваному часовому масштабі. У майбутньому планується провести моніторинг після завершення Pb-Pb запусків у 2025 році, для того щоб визначити вплив випромінювання на детектор (див. табл.5.1).

Таблиця 5.1

Приклад зміни показників наведено у таблиці нижче:

Chip number	Noise, 10.2025		THR, 10.2025		Noise, 06.2025		THR, 06.2025	
	avg	stdDev	avg	stdDev	avg	stdDev	avg	stdDev
0	8,72	1,10	98,89	20,01	8,28	1,10	101,00	20,03
1	8,70	1,00	100,24	21,15	8,27	0,98	102,81	21,17
2	8,72	1,03	99,91	19,75	8,31	1,01	101,70	19,83
3	8,69	1,04	97,82	20,03	8,27	1,05	101,01	20,15
4	8,76	1,07	97,10	20,09	8,35	1,03	100,55	20,20
5	9,02	1,09	99,27	16,92	8,61	1,10	99,70	16,90
6	8,93	1,05	98,02	20,16	8,54	1,03	100,58	20,22
7	8,78	1,09	98,13	19,28	8,36	1,07	101,47	19,40

Chip number	$\Delta\mu_{thr}$	$\Delta\mu_{noi}$	$\Delta\sigma_{thr}$	$\Delta\sigma_{noi}$
0	-2,12	0,44	-0,02	0,00
1	-2,57	0,43	-0,01	0,02
2	-1,79	0,41	-0,07	0,01

3	-3,18	0,42	-0,12	-0,01
4	-3,45	0,42	-0,12	0,04
5	-0,42	0,41	0,02	-0,01
6	-2,56	0,39	-0,06	0,03
7	-3,33	0,42	-0,12	0,02

На основі цих даних було побудовано графіки для зміни за три місяці середнього порогу для чіпу та зміни стандартного відхилення по всьому детектору (див. рис. 5.2, 5.3).

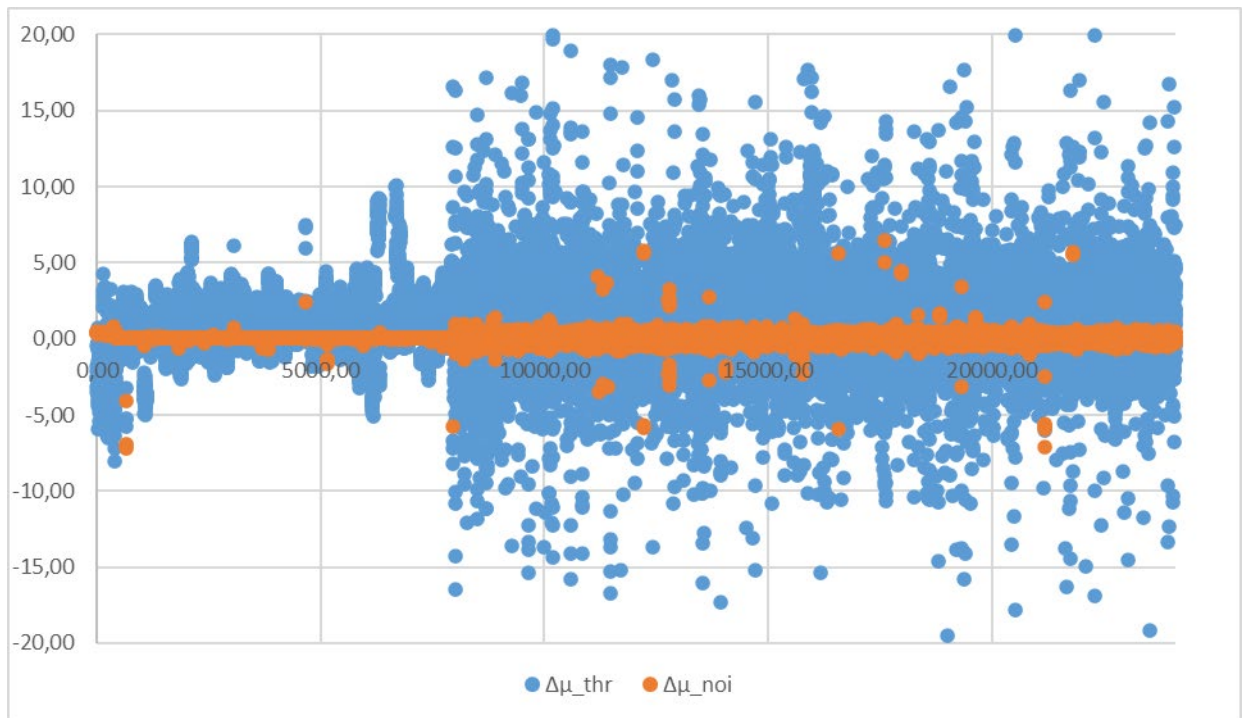


Рисунок.5.2 Залежність зміни за три місяці середнього порогу та його шуму для всіх чіпів детектора

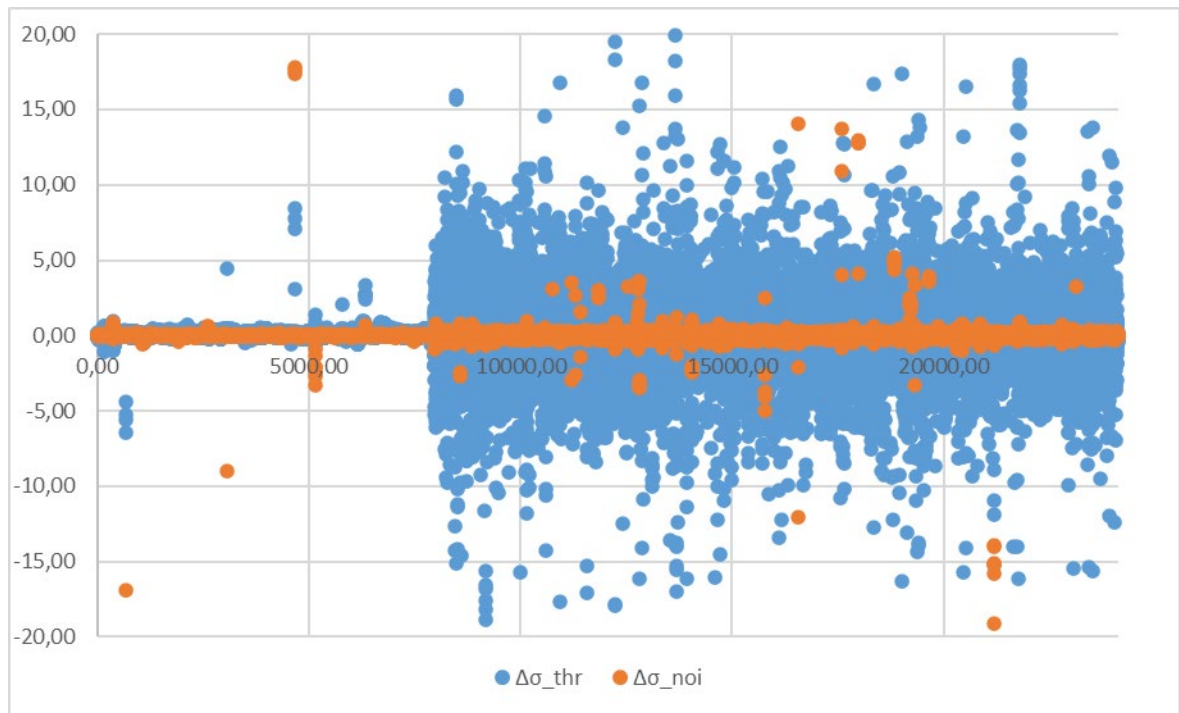


Рисунок.5.3 Залежність зміни за три місяці стандартного відхилення порогу та його шуму для всіх чипів детектора

Зауважмо, що є три чіткі зони, які відповідають параметрам: IB, ML, OL. Для області IB характерно збільшеним діапазоном параметрів у від'ємній частині (по осі X від 0 до 500). Для області ML характерно більш рівномірний розподіл, який має збільшену частину у позитивній зоні. Для третьої області OL, характерний діапазон з більшим розбігом значень.

5.4 Накладення чипів на рівні стейву і виявлення відхилень

Накладені діаграми чипів для кожного стейву показують загальну однорідність і роблять відхилення праворуч помітними. Більшість стейвів утворюють щільні оболонки, центроїди яких стабільні між запусками (див. рис. 5.4).

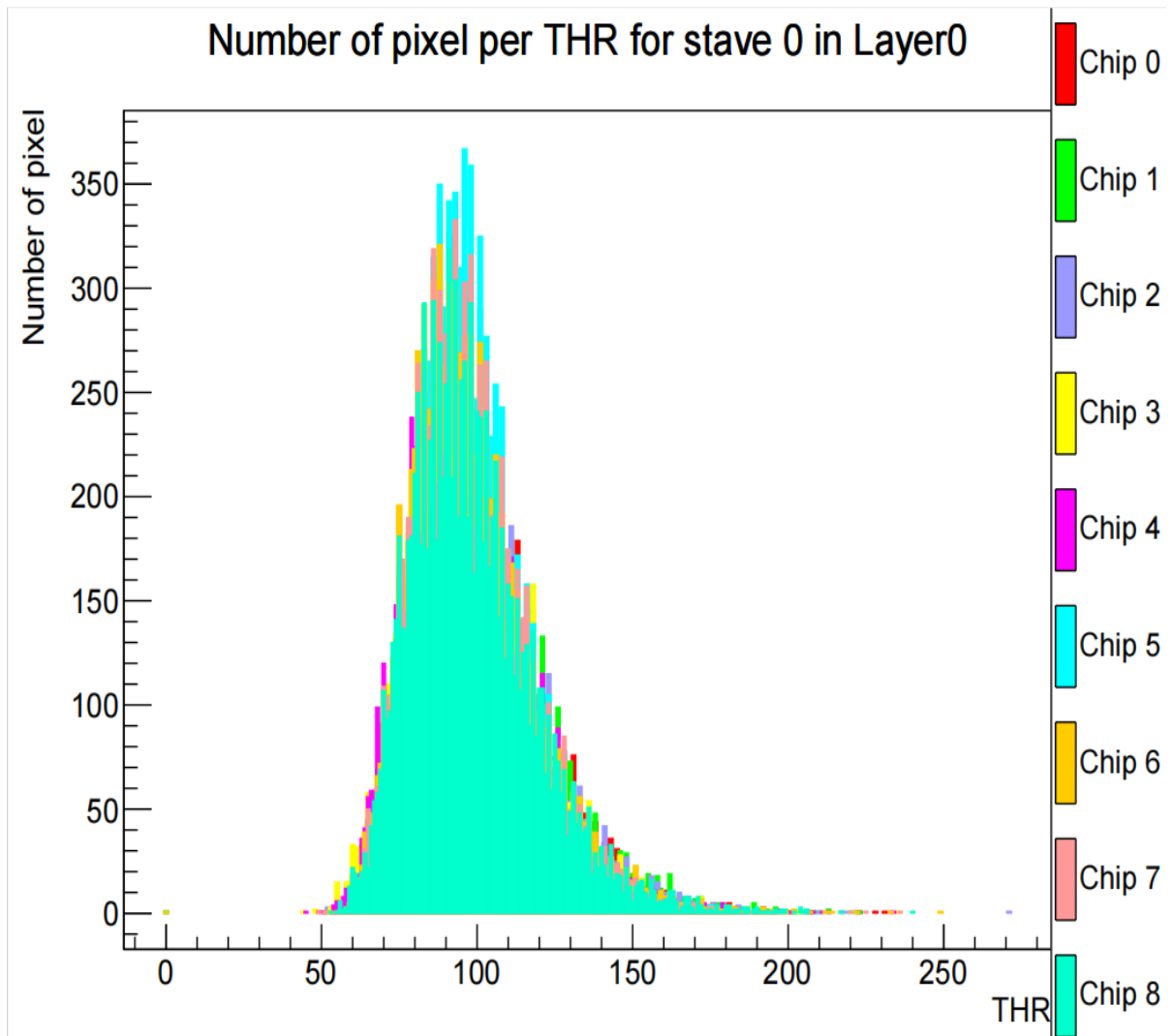


Рисунок 5.4 Накладання діаграм для чипів, які належать одному стейву

У разі виникнення відхилень вони, як правило, локалізуються на одному або двох чіпах, а не відображають загальний збій в системі. Таким чином, накладки служать ефективним засобом первинної діагностики станів чипів особливо для внутрішніх шарів, оскільки є інструмент вимкнення чіпу у випадку значного відхилення від норми.

Був протестований стандартизований критерій відхилення: чіп позначається проблемний, якщо $|\Delta\mu_{chip}| > 3 DAC$ або $\Delta\sigma_{chip} > 0.5 DAC$. При використанні цього порогового значення виходить невеликий, список кандидатів-переважно на шарі 2, – які потребують цілеспрямованого

контролю (наприклад, повторної оцінки DAC для кожного чіпу, перехресних теплових перевірок, калібрування джерела живлення).

5.5 Просторова структура: коливання порогу чипів на одному стейві

Повторювана квазісинусоїдальна модуляція середніх порогових значень за індексом чипу спостерігається на всіх шарах. Це явище найбільш помітно на більш довгих стейвах з великою кількістю чипів (середні і зовнішні шари). Амплітуда становить близько $\sim 0,5-1,0$ одиниць DAC, а періодичність корелює з фізичною сегментацією розподілу потужності.

Електрична імплементація передбачає, що невеликі перепади опору або індуктивності вздовж гнучкого адаптера живлення призводять до систематичних змін локальної аналогової базової лінії. Модуляція відтворюється в період з червня по жовтень, що підтверджує її структурне походження зі електричного кільця. Моніторинг амплітуди та фази цих коливань з часом є чутливим способом визначення однорідності розподілу низької напруги (див. рис. 5.5, 5.6).

Червоні штриховані лінії на графіках позначають поділ по стейвам.

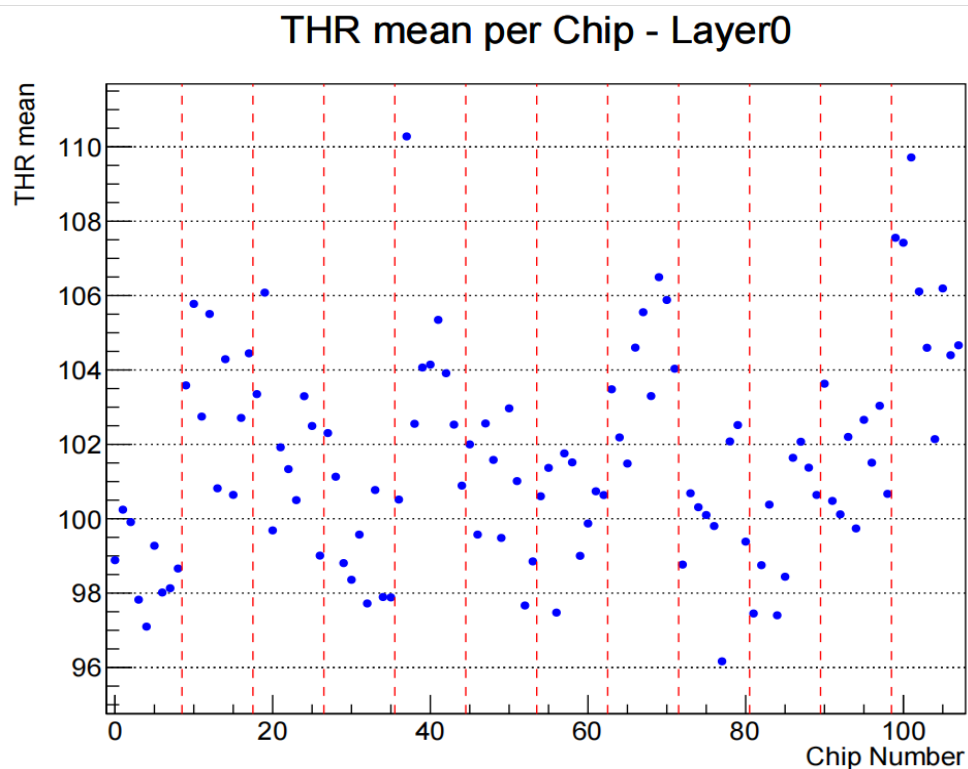


Рисунок 5.5 Приклад графіку порогового значення від номеру чіпу для шару 0

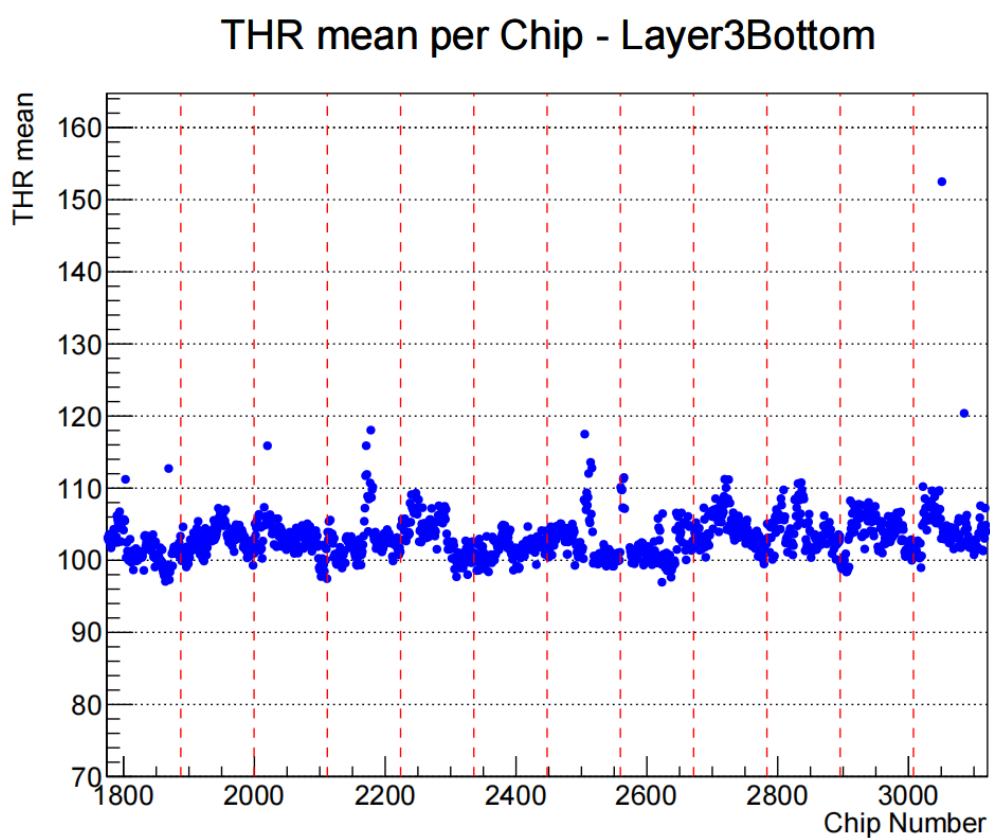


Рисунок 5.6 Приклад графіку порогового значення від номеру чіпу для верхньої частини шару 3

В двох наведених прикладах можна спостерігати коливальну поведінку. Найменш виражена квазісинусоїдальна поведінка спостерігається у шарі 2 (див. рис. 5.7).

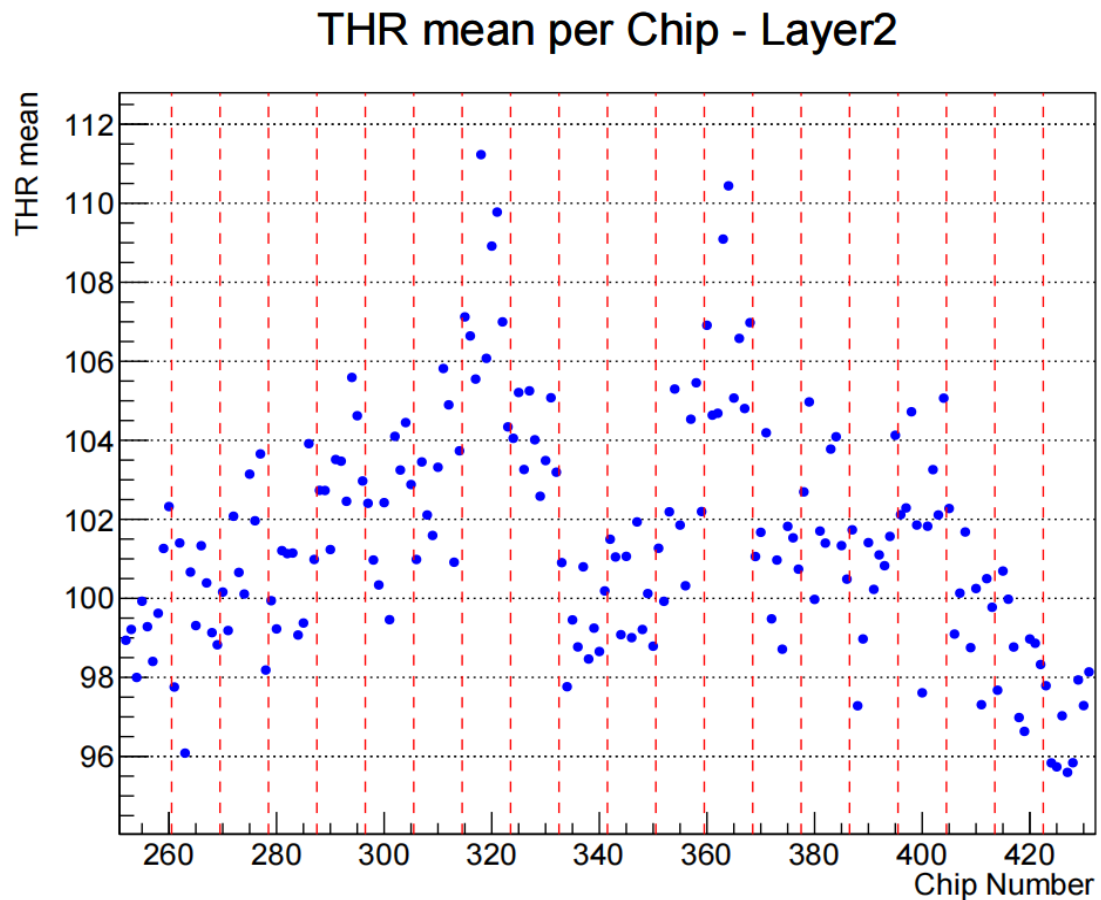


Рисунок 5.7 Приклад порогового значення як залежність від номеру чіпу для шару 2

5.6 Графіки стандартних відхилень: чутливість та інтерпретація

Стандартне відхилення σ для кожного чіпу відображає дисперсію від пікселя до пікселя і є раннім показником погіршення однорідності. Для більшості шарів σ залишається на рівні номінальних значень з незначними коливаннями від чіпу до чіпу. У жовтні в шарі 2 спостерігалось незначне підвищення σ для ~20-30% чіпів. Це локальне збільшення не відповідає чіткій геометричній схемі, що вказує на масове радіаційне пошкодження, або ефекти, пов'язані зі зміщенням. Оскільки σ чутливий до короточасних змін навколишнього середовища, повторні вимірювання дозволять визначити, чи є ефект тимчасовим чи постійним (див. рис. 5.8, 5.9).

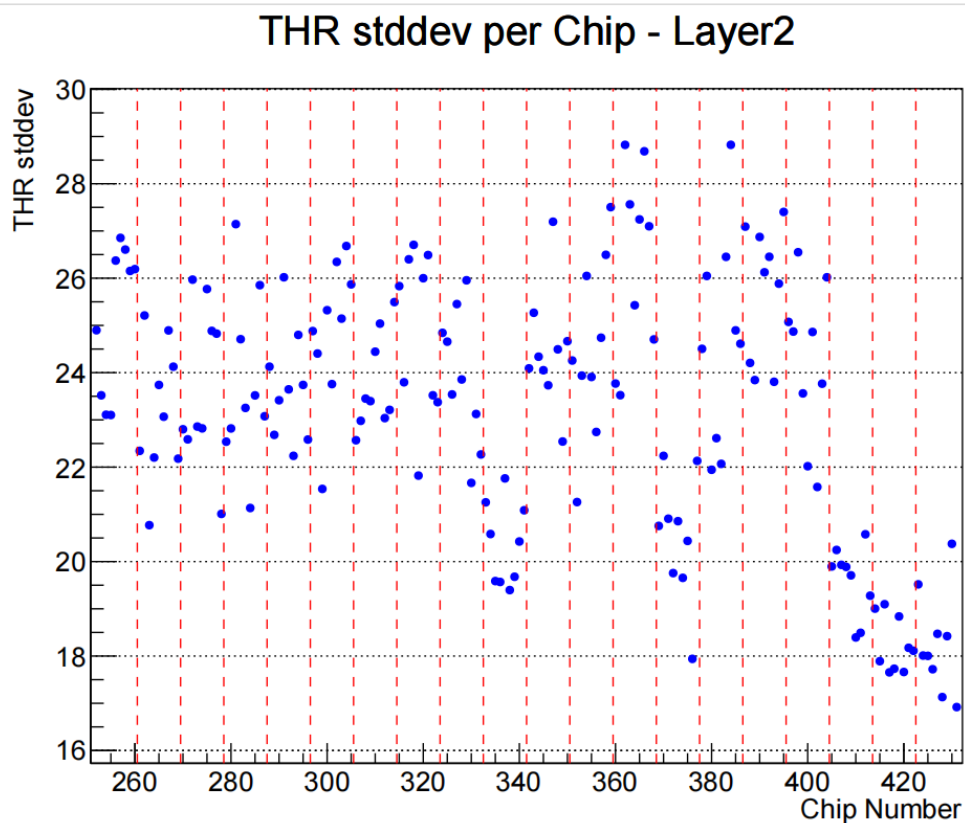


Рисунок.5.8 Графік стандартного відхилення порогового значення в залежності від номеру чіпу для шару 2 для запуску у червні

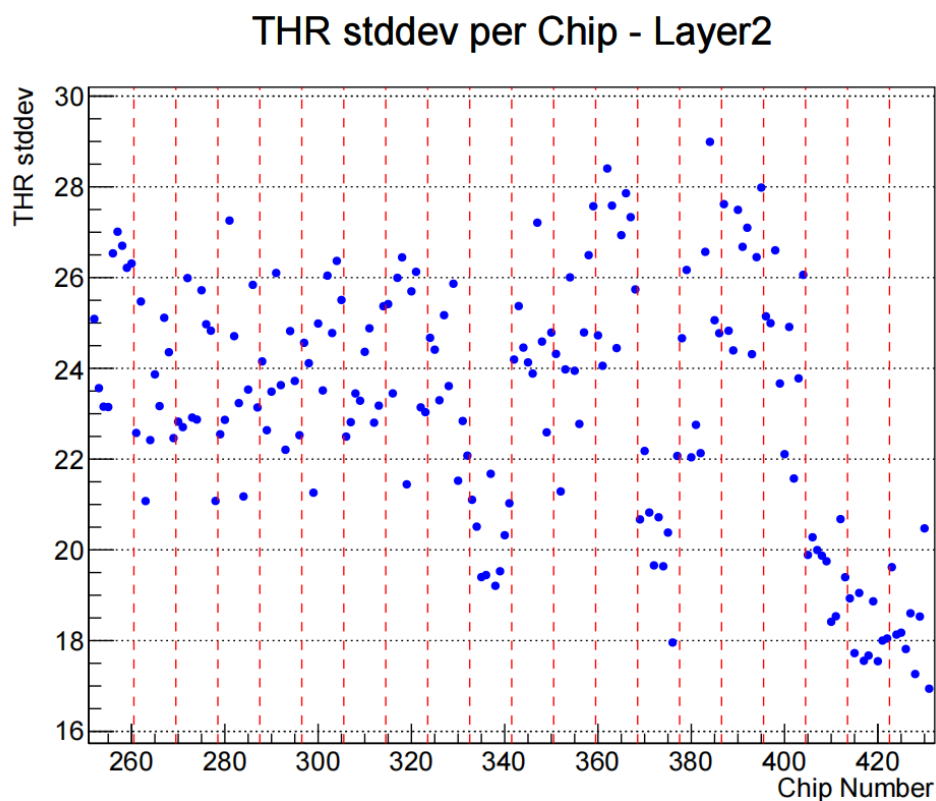


Рисунок 5.9 Графік стандартного відхилення порогового значення в залежності від номеру чіпу для шару 2 для запуску у жовтні

Як можна побачити з двох графіків наведених для одного шару і для запусків у червні та у жовтні, стандартне відхилення майже не змінилося, проте можна чітко побачити, що права частина графіку має зовсім іншу характерну поведінку, на відміну від лівої частини.

Була висунута гіпотеза, про те, що така поведінка може бути викликана більшим радіаційним опроміненням чипів правої частини графіку. Через те, що під час події зіткнення пучків рух продуктів може частіше влучати в конкретні чіпи (це імовірнісний процес), що і викликає більше ушкодження конкретних чипів.

Гіпотеза буде перевірена у майбутньому, планується побудувати аналогічні графіки, проте по осі X будуть відкладений радіальне положення чипів, що дозволить визначити у яку частину детектору частіше влучає продукт зіткнення.

5.7 Аналіз шуму та кореляція шуму і порогу

Шум, виділений з результатів підгонки по S-подібної кривої, дозволяє провести незалежну перевірку. Розподіли шуму відображають багато особливостей: глобальну стабільність між запусками, помірну радіальну залежність (більш високу поблизу області взаємодії). Були розраховані коефіцієнти кореляції між $\Delta\sigma_{\text{threshold}}$ і $\Delta\sigma_{\text{noise}}$ для кожного чіпу.

Чіпи з підвищеним порогом σ часто також демонструють підвищений рівень шуму, що підтверджує гіпотезу про локальну аналогову нестабільність, а не суто статистичні коливання.

З діаграм для шуму (див. рис. 5.10, 5.11). можна зробити такі висновки:

- аналогічна ситуація з подовженою правою частині, як і у порогового значення,
- є пікселі, які мають високий рівень шуму, у 5-7 разів більший за середній рівень для шару 0, та у 7-9 разів більший для шару 2,

- значних відхилень у шумі чіпів на стейві немає.

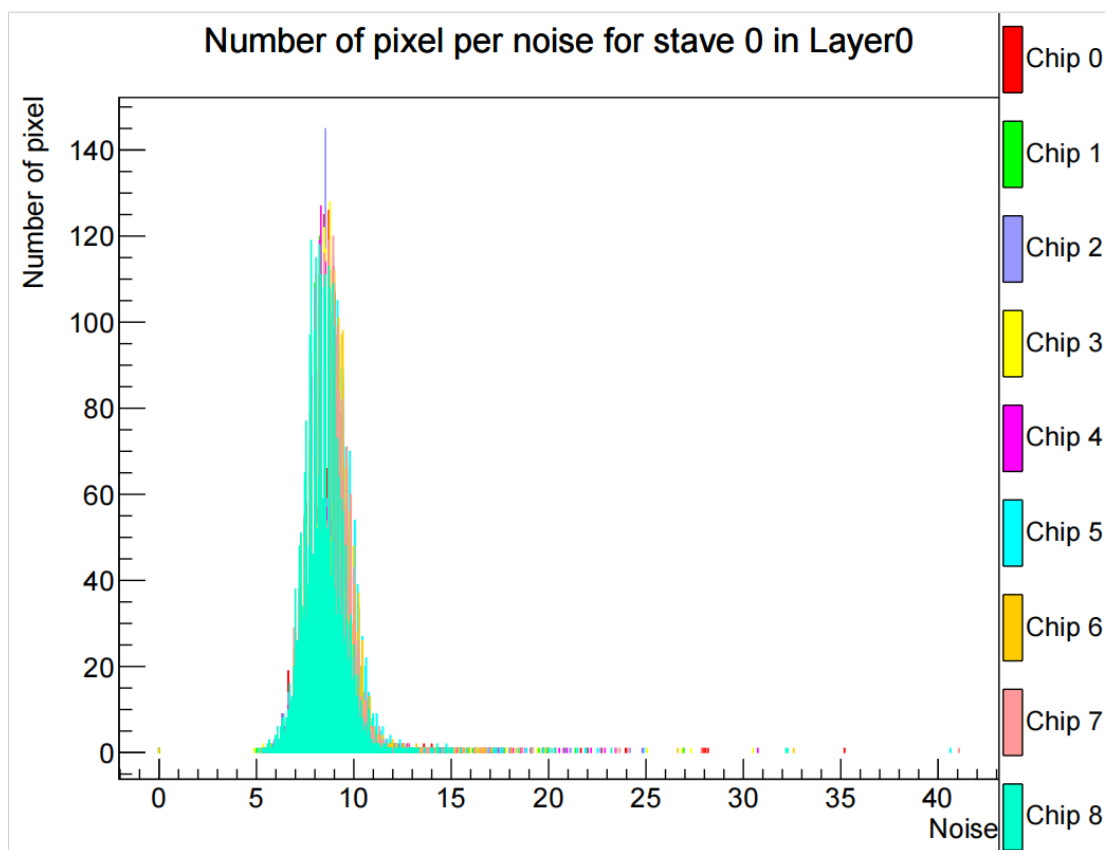


Рисунок.5.10 Накладання діаграм шуму для чіпів, які належать одному стейву на шарі 0

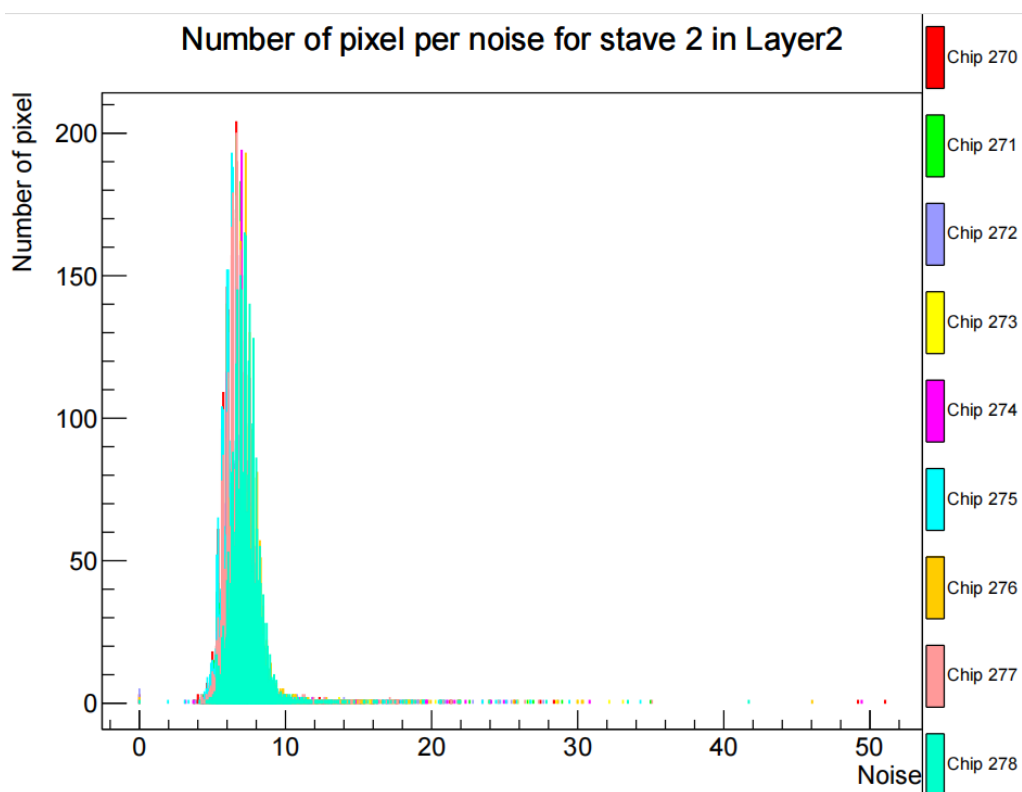


Рисунок 5.11 Накладання діаграм шуму для чипів, які належать
одному стейву на шарі 2

З графіка (див. рис. 5.12). можна зробити висновок, що для одного шару значення шуму знаходяться в діапазоні 1,5 DAC, що є досить суттєвим відхиленням.

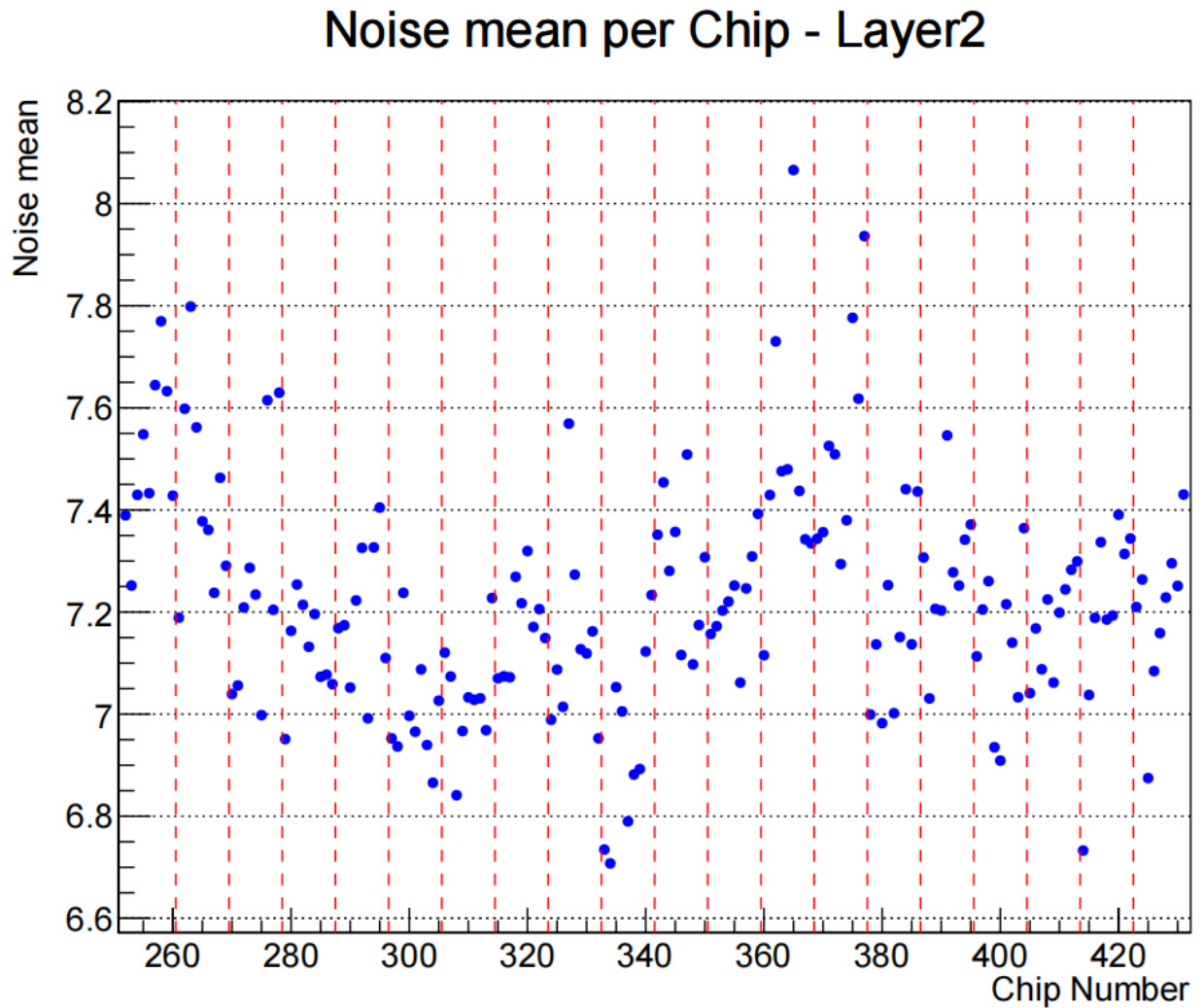


Рисунок 5.12 Графік залежності середнього порогу в залежності від номеру
чипу

5.8 Висновки до розділу

Аналіз, заснований на попіксельній реконструкції активації, підтверджує, що датчики ALPIDE працювали в стабільному режимі в період між контрольними запусками в червні і жовтні. Основні висновки полягають в наступному:

- стійкий розподіл активації з правим перекосом, характерне для архітектури ALPIDE;
- стабільне вирівнювання порогу за рівнем навантаження і відтворена квазісінусоїдальна модуляція як функція номеру чіпу, обумовлена топологією розподілу потужності та структурою електричного кільця;
- невелике, але помітне збільшення ширини розподілу і шуму в підмножині чіпів рівня 2, що мотивує до продовження моніторингу.;
- практична корисність показників $\Delta\mu$ і $\Delta\sigma$ для кожного чіпу для автоматизованого контролю якості та раннього виявлення аномалій.

У сукупності ці результати демонструють, що аналіз активації пікселів є чутливим і практичним інструментом як для рутинного контролю якості, так і для довгострокових досліджень працездатності детекторів. Дотримання рекомендованих порогових значень моніторингу, удосконалення електрообладнання та ведення історії кожного чіпу підвищують стійкість ВТС до майбутніх експлуатаційних навантажень.

ВИСНОВКИ

Представлена робота, забезпечує цілеспрямовану та детальну оцінку стабільності та довгострокової поведінки порогового параметру детектору ALICE BTC2 під час третього запуску LHC. Розробка та застосування спеціалізованої аналітичної структури, здатної обробляти калібрувальні дані на рівні пікселів з сенсорів ALPIDE, покращує розуміння того, як детектор реагує на складні робочі умови протон-протонних та іон-іонних зіткнень. Результати показують, що BTC2 демонструє високий ступінь стабільності, при цьому спостерігаються лише невеликі та локалізовані варіації протягом періоду поточної експлуатації.

Центральним результатом дослідження є характеристика часових тенденцій середніх значень порогів для різних шарів детектору. Аналіз підтверджує, що внутрішні шари, які піддаються найбільшому потоку частинок та радіаційному навантаженню, демонструють поступове зниження порогу, особливо під час збору даних Pb-Pb. Така поведінка узгоджується з очікуваними ефектами, викликаними радіацією. Навпаки, зовнішні шари демонструють незначне збільшення порогу, що узгоджується з їх меншим радіаційним ушкодженням та більшою чутливістю до температури або змін, пов'язаних з ЦАП. Ці протилежні тенденції у внутрішніх та зовнішніх областях забезпечують узгоджену та фізично обґрунтовану картину того, як детектор реагує на робоче середовище.

Дослідження також підкреслює наявність квазісинусоїдальної модуляції порогових значень вздовж стейву по індексу чіпу на всіх шарах. Ця структура залишається стабільною протягом кількох місяців та калібрувальних циклів, що може свідчити про те, що вона походить від внутрішньої електричної топології мережі та розподілу живлення стейву, а не від зовнішніх впливів навколишнього середовища. Виявлення цієї особливості вимагало високодетального аналізу на рівні пікселів та

підтверджує цінність розроблених інструментів у виявленні систематичних закономірностей, які неможливо виявити методами, що базуються на середніх значеннях.

Ще одне важливе спостереження стосується продуктивності шару 2, де підмножина чіпів демонструє невеликі, але послідовні відхилення як у середньому пороговому значенні, так і в ширині розподілу. Хоча ці відхилення залишаються в робочих межах, вони являють собою найбільш виражені локальні неоднорідності, що спостерігалися в дослідженні. Моніторинг цих чіпів у майбутньому може допомогти з'ясувати, чи залишаються ці ефекти стабільними, чи змінюються з накопиченою дозою.

По всьому детектору спектри активації на рівні пікселів залишаються стабільними між періодами калібрування, демонструючи майже ідентичні форми та підтримуючи вузькі розподіли. Це підтверджує, що сенсори ALPIDE зберігають однорідність та функціональність при безперервній роботі та підтверджує їхню придатність для високошвидкісного збору даних під час RUN3. Розподіл шуму також демонструє високу внутрішню узгодженість, що підтверджує висновок про те, що аналогова інтерфейсна електроніка залишається надійною. Окрім конкретних результатів, аналітична структура, яка розроблена в цій роботі забезпечує універсальну основу для майбутньої діяльності з контролю якості детектору. Завдяки автоматизованому вилученню показників на рівні чіпу та стейву, а також завдяки інструментам візуалізації, структура підтримує виявлення аномалій та сприяє довгостроковим дослідженням радіаційного старіння та впливу навколишнього середовища. Її масштабованість гарантує, що вона може продовжувати задовольняти потреби QC протягом решти періодів RUN3.

Підсумовуючи, детектор BTC2 демонструє чудову операційну стабільність, лише з обмеженими та локалізованими відхиленнями. Розроблені в роботі методи значно покращують діагностичні можливості інфраструктури QC ALICE та безпосередньо сприяють підтримці

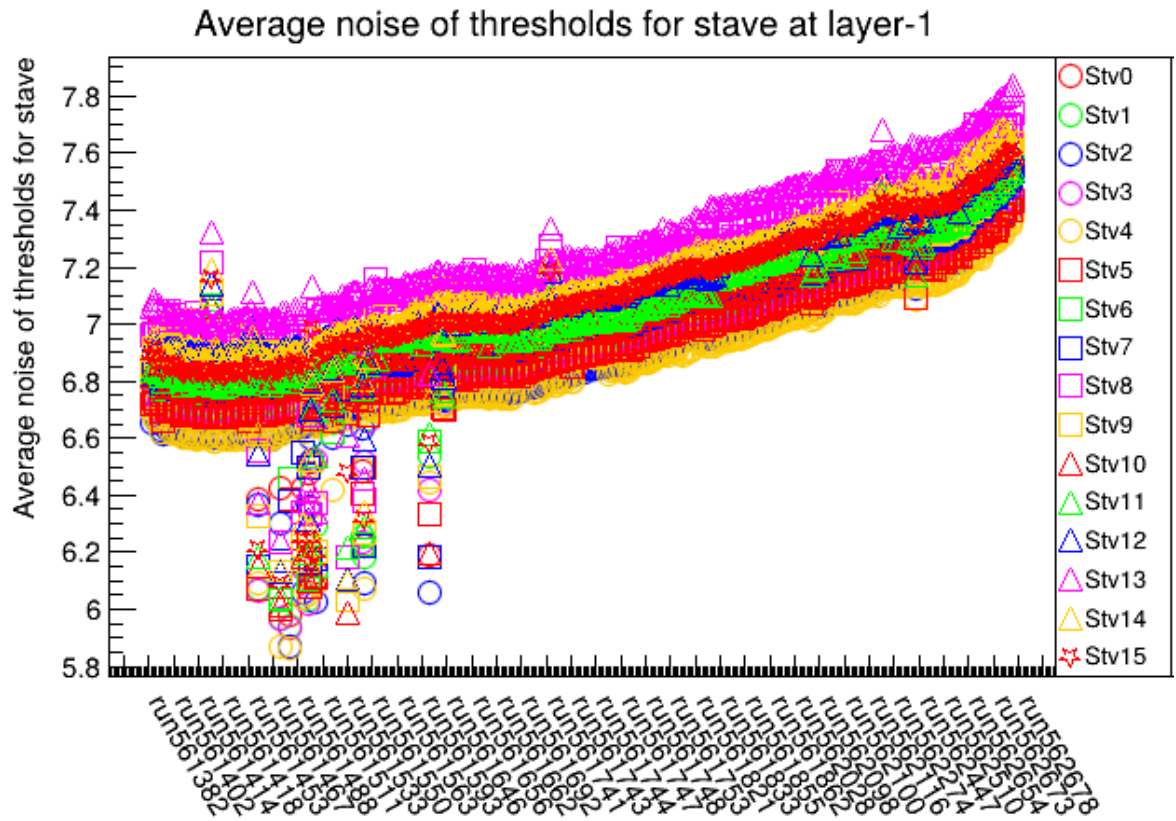
продуктивності відстеження, необхідної для експерименту ALICE.

ДЖЕРЕЛЯ

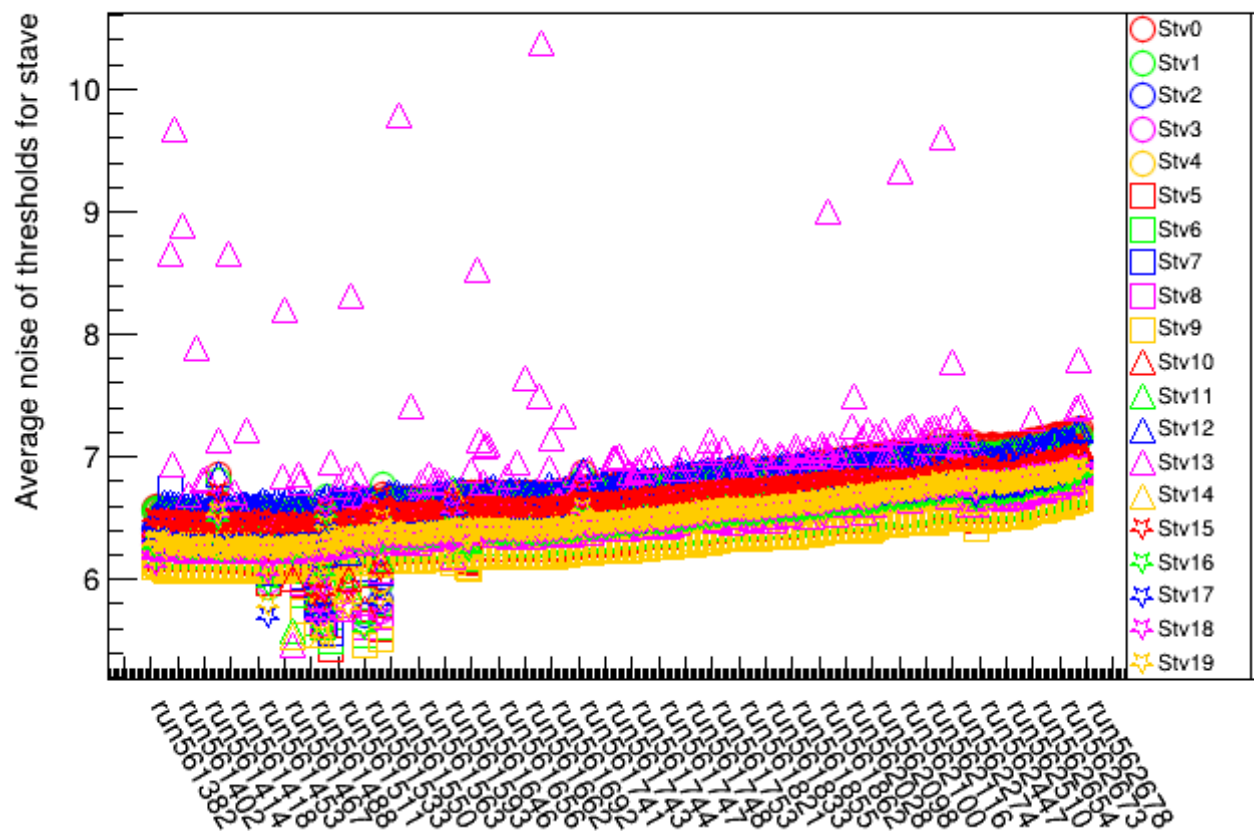
- [1] Magnus Mager. “*ALICE ITS3 – a next generation vertex detector based on bent, wafer-scale CMOS sensors*”. Presented 24 Sep 2021. URL: <https://indico.cern.ch/event/1071914/>
- [2] Abelev, B.; et al. [Alice Collaboration]. Upgrade of the ALICE Experiment: Letter Of Intent. J. Phys. G 2014, 41, 087001. [Google Scholar] [CrossRef]
- [3] Martinengo, P. The new Inner Tracking System of the ALICE experiment. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2017, 967, 900–903. [Google Scholar] [CrossRef]
- [4] Aglieri, G.; Cavicchiola, C.; Chalmet, P.L.; Chanlekc, N.; Collud, A.; Giubilatoe, P.; Hillemannsa, H.; Juniquea, A.; Keila, M.; King, D. Monolithic active pixel sensor development for the upgrade of the ALICE inner tracking system. J. Instrum. 2013, 8, C12041. [Google Scholar] [CrossRef]
- [5] Mager, M.; et al. [ALICE Collaboration]. ALPIDE, the Monolithic Active Pixel Sensor for the ALICE ITS upgrade. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2016, 824, 434–438. [Google Scholar] [CrossRef]
- [6] TowerJazz. Available online: <http://www.jazzsemi.com> (accessed on 26 January 2019).
- [7] B Abelev et al. Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System. Tech. rep. Nov. 2013. DOI: 10.1088/0954-3899/41/8/087002. URL: <https://cds.cern.ch/record/2011297>.
- [8] Raskina V, Křížek F. Characterization of Highly Irradiated ALPIDE Silicon Sensors. Universe. 2019; 5(4):91. <https://doi.org/10.3390/universe5040091>
- [9] Nicolo’ Valle. “A Monolithic Active Pixel Sensor-based Inner Tracking System for ALICE”. In the *15th Terascale Detector Workshop 2023*. URL: https://indico.desy.de/event/36972/contributions/135034/attachments/80455/105173/ITS2_tw.pdf

- [10] ALICE DataBase. URL: <http://ccdb-test.cern.ch:8080/browse/qc/ITS/MO/>
- [11] Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (n.d.). *ALPIDE Operations Manual*. INFN. https://sunba2.ba.infn.it/MOSAIC/ALICE-ITS/Documents/ALPIDE-operations-manual-version-0_3.pdf

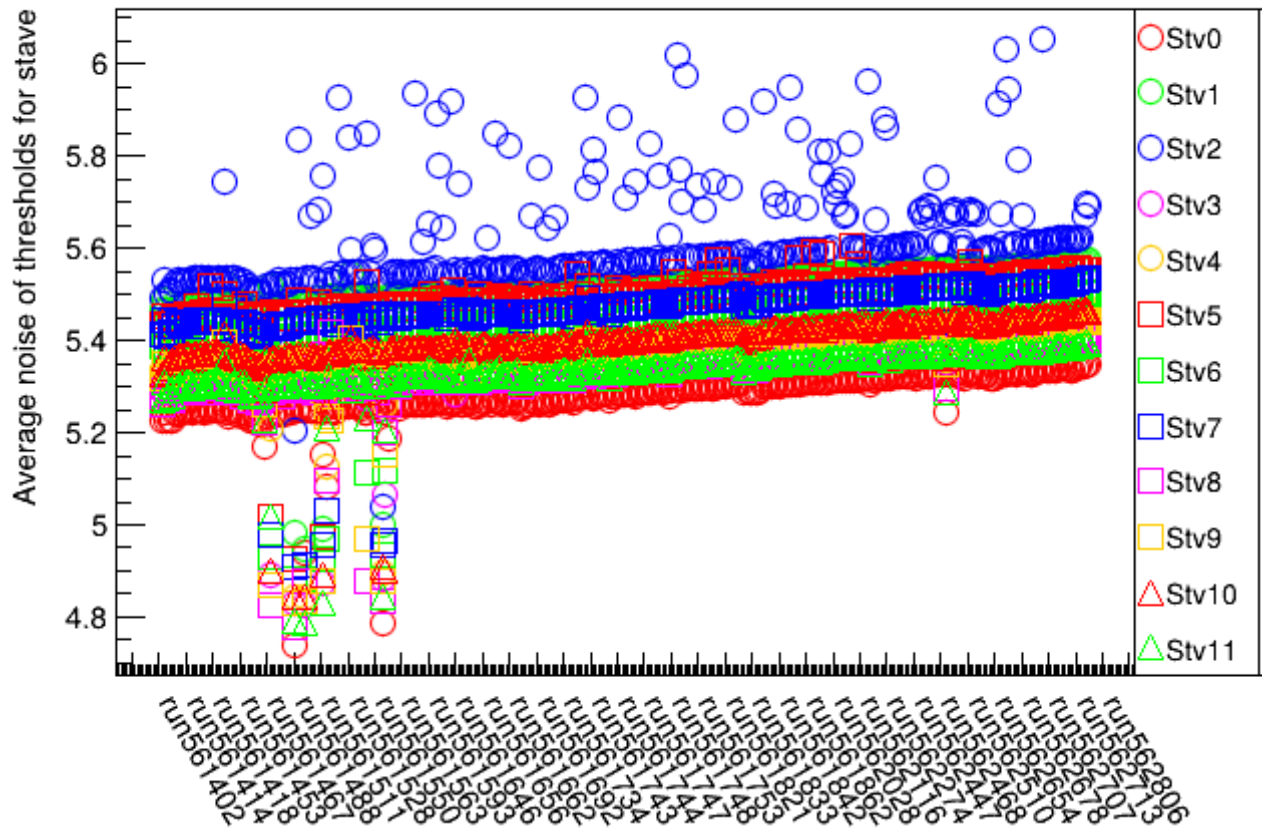
ДОДАТОК А
ГРАФІКИ ШУМУ ЗА 2025 РІК



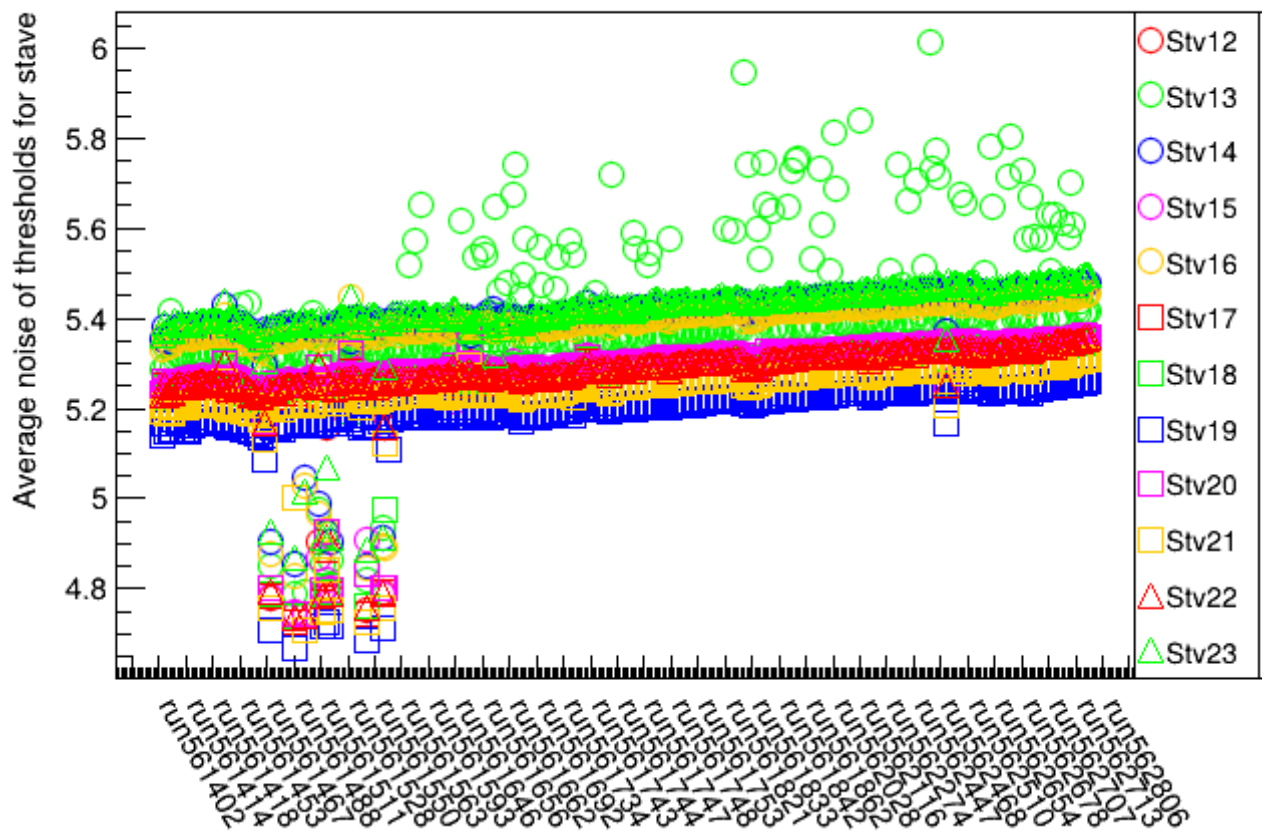
Average noise of thresholds for stave at layer-2



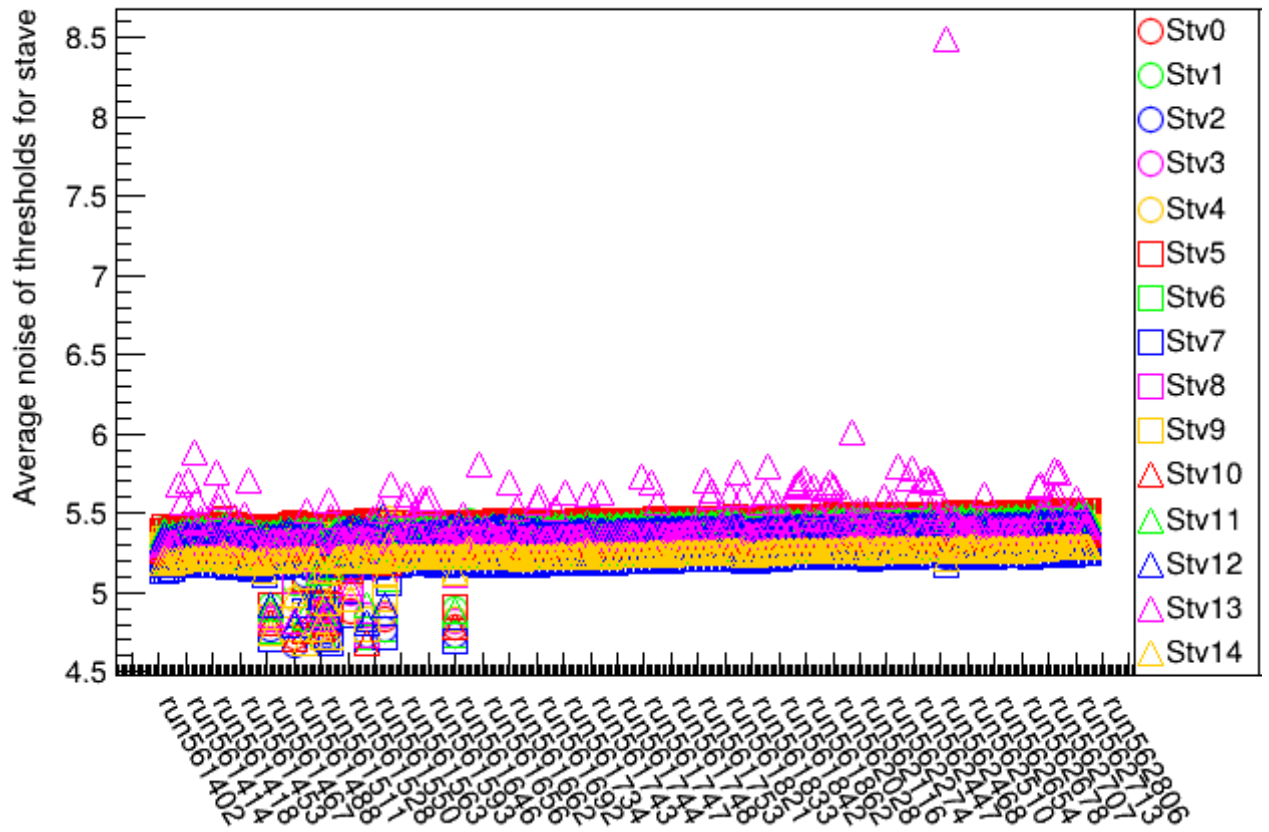
Average noise of thresholds for stave at layer-3Top



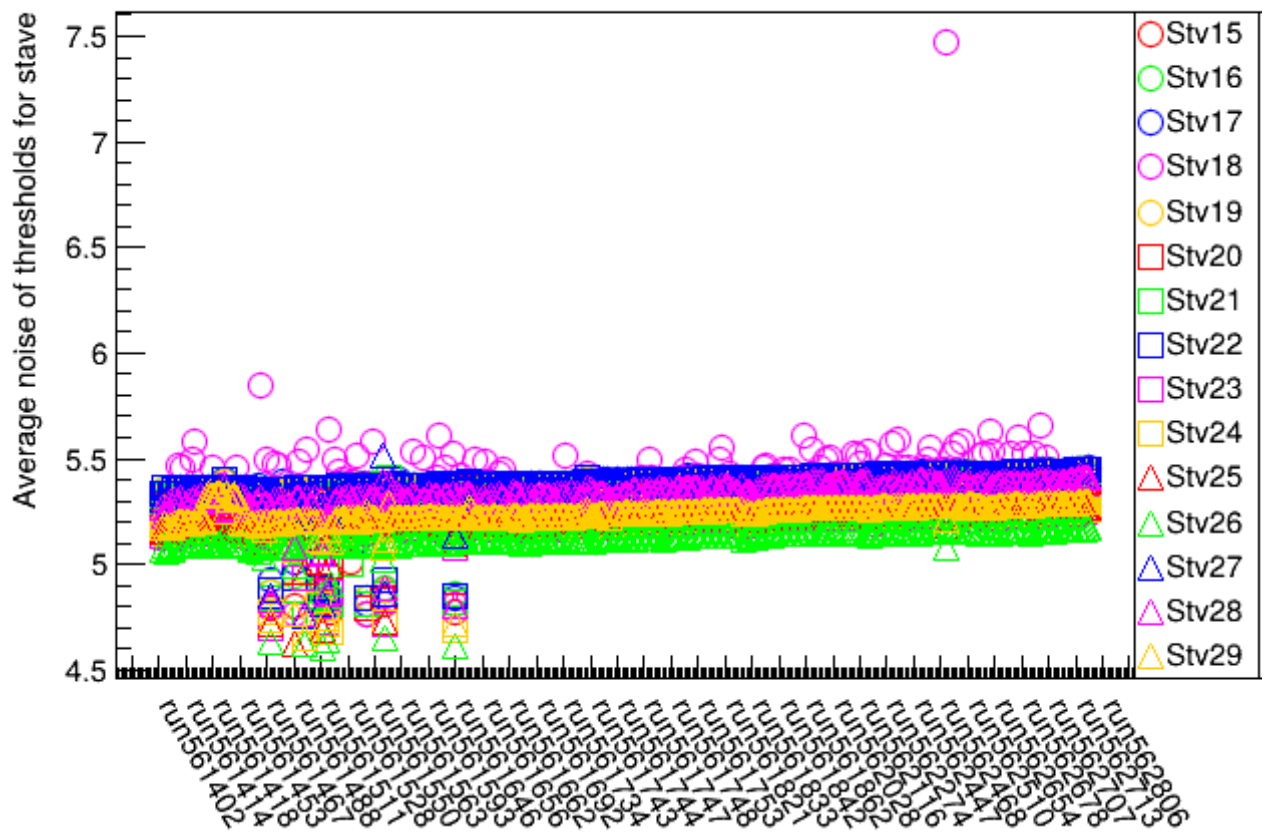
Average noise of thresholds for stave at layer-3Bottom



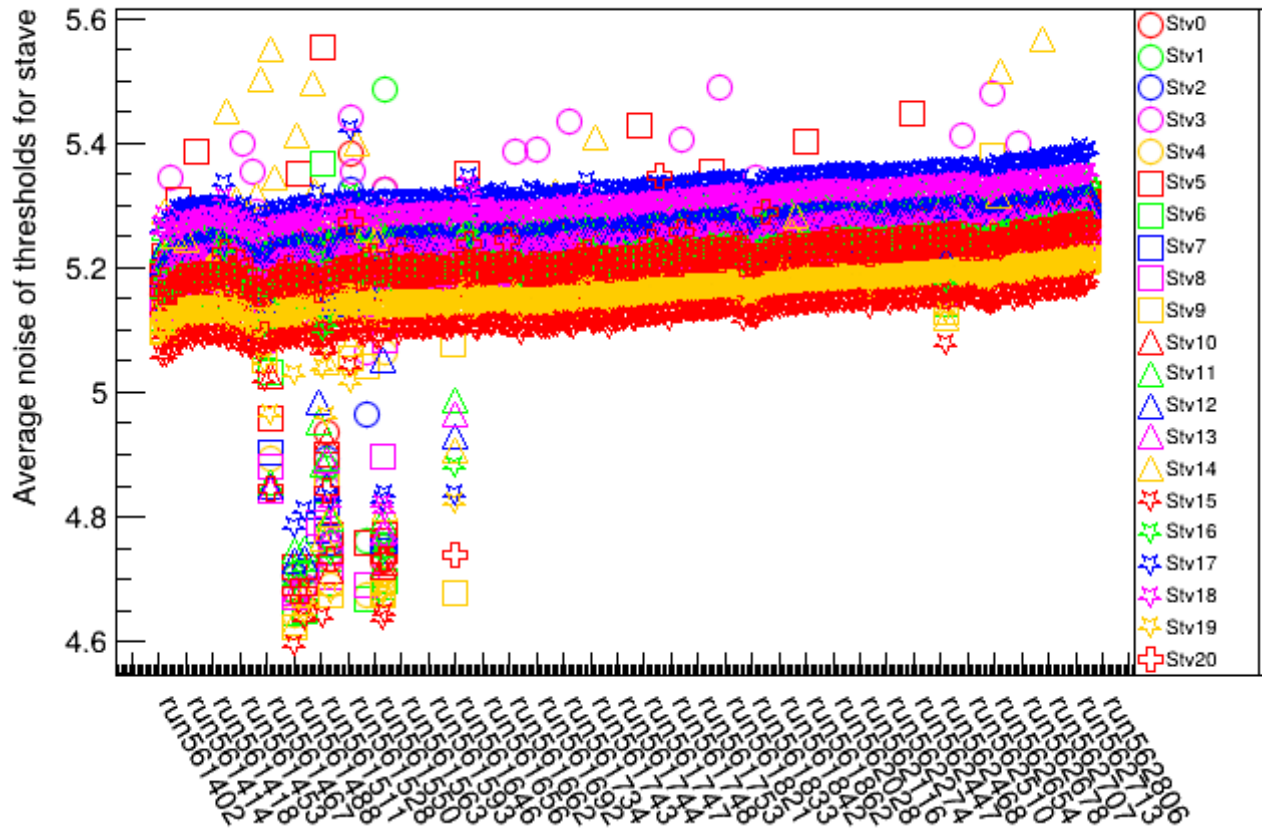
Average noise of thresholds for stave at layer-4Top



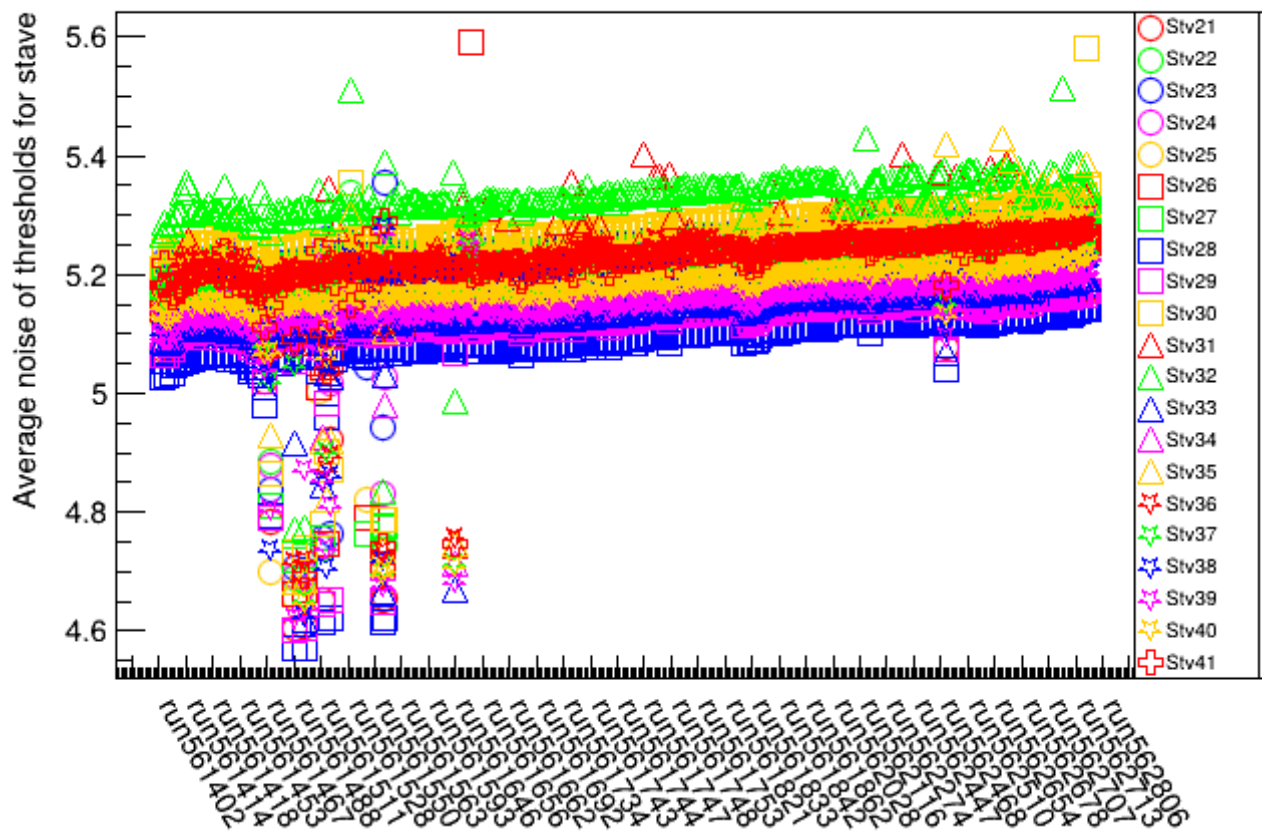
Average noise of thresholds for stave at layer-4Bottom



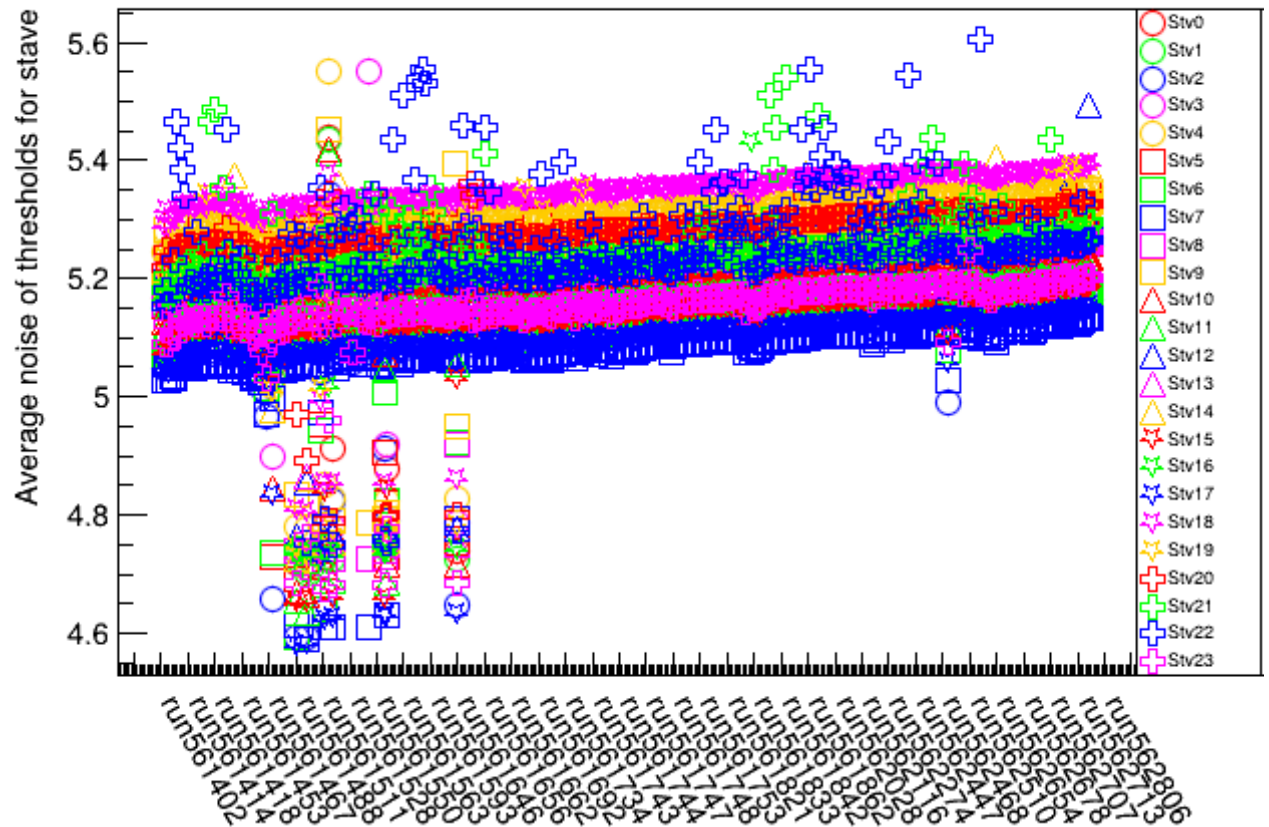
Average noise of thresholds for stave at layer-5Top



Average noise of thresholds for stave at layer-5Bottom



Average noise of thresholds for stave at layer-6Top



Average noise of thresholds for stave at layer-6Bottom

