

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 53-072

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ДЕФЕКТОСКОПИЯ ДЕТЕКТОРОВ ПО ВОЗНИКАЮЩИМ
В НИХ ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ

Научный руководитель
к.ф.-м.н.

_____ П. Е. Тетерин
_____ Г. И. Воробьев

Выполнил

Москва 2019

Содержание

Содержание	1
Введение	2
sTGC. Устройство, характеристики, область применения	2
Методы дефектоскопии	5
Переходные процессы в электрических цепях. Метод исследования отклика	10
Написание программы	13
Считывание данных отклика	13
Подготовка ПО для анализа	14
Анализ данных отклика	16
Дальнейшие доработки и развитие метода	18
Заключение	18

Цель работы

Изучение и доработка методики дефектоскопии микро-стрипового детектора sTGC с помощью исследования отклика, возникающего в результате переходного процесса в электрической цепи детектора под действием внешнего возбудителя. Создание программы обработки этого отклика на языке программирования Python.

Введение

sTGC. Устройство, характеристики, область применения

Small-strip thin gap chamber (sTGC) - это стрип-падовый газовый детектор, работающий по принципу многопроволочной пропорциональной камеры. Оригинальная технология TGC была разработана учёными Majewski и Charpak[1][2]. Это модифицированная копия детектора ATLAS TGC, которая была придумана для использования в грядущем апгрейде оборудования на LHC, именуемым "Run-3", а так же "high luminosity LHC" (HL-LHC). Суть обновления в повышении эффективности и работоспособности оборудования (в основном имеются ввиду составляющие "Малого колеса" (The New Small Wheel upgrade)) в условиях шумов до 15 кГц/см², которые возникнут, при планируемых значениях светимости (от 2 до 7×10^{34} см² сек⁻¹).[3][4]

1. Устройство.

sTGC имеет квадруплетную структуру Рис.1(b). Каждый слой - это полноценный детектор, состоящий из анодной "сетки" (wires), катодных пластин (падов) и полос (стрипов) и специальных изоляторов, подложек и каркаса Рис.1(a). Анодная сетка состоит из множества позолоченных вольфрамовых проводков, расположенных на расстоянии 1.8 мм друг от друга и 1.4 мм от катодов. Пады и стрипы закрывают корпусные площадки, стрипы направлены перпендикулярно проводам сетки. Особенностью линейки TGC является малый размер зазора (буквально от англ. thin gap) между катодными платами

и сеткой (1.4 мм). Особенностью sTGC является малый "период замещения да и малый размер стрипов в принципе (от англ. small-strip). Шаг стрипов в sTGC равняется 3.2 мм, в то время, как в ATLAS TGC - 11.4 мм (9мм ширина и 2.8 пробел между стрипами). Также, падов в TGC не было [5]. Стрипы и пады внутри детектора покрыты графит-эпоксидной смесью с поверхностным сопротивлением в 100-200 кОм на квадрат. Рабочим газом является смесь, состоящая из 55% CO_2 и 45% n-пентана [6][7].

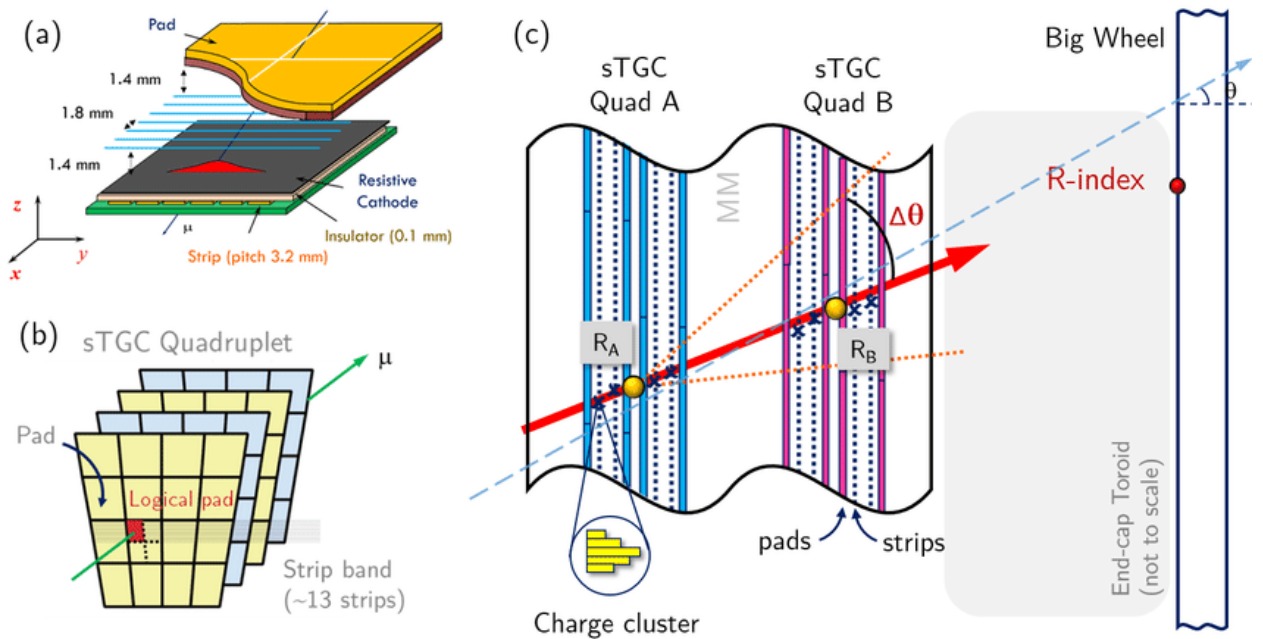


Рисунок 1 – Устройство sTGC

2. Принцип работы

Как уже было отмечено, в линейке TGC заложен принцип многопроволочной пропорциональной камеры, т.е. каждый стрип и составляющие детектора над ним создают своеобразный аналог пропорционального счётчика. Так же, принцип работы схож с детектором типа микромегас (MICROMeshGAS).

Заряженная частица (мюон), пролетая сквозь детектор ионизирует газ, создавая электрон-ионную пару Рис.2(1). За счёт разницы потенциалов на анодной сетке и падах - электроны начинают дрейфовать в сторону анодной сетки (2). Достигнув сетки (3), электрон попадает в более сильное электрическое поле. Ускоряясь он приобретает энергию достаточную, чтоб породить ещё электрон-ионные пара,

которые, так же, под действием поля начинают порождать ещё пары лавинный эффект (4). Для достижения нужного количества рождённых пар коэффициент газового усиления должен быть около $10^4 - 10^5$, эти значения достигаются за счёт подбора состава газа. В итоге, образовавшаяся лавина попадает на полосы, создавая электрический импульс (5). [8]

Помимо этого, пады фиксируют прохождение частицы, чтоб в заранее знать с каких стрипов ожидать сигнала. Фитированием сигналов стрипов по Гауссу находят координату прохождения частицы. Таким образом, используя квадрупленную структуру с схемой совпадений 3 из 4, можно измерять траекторию частицы. Азимутальные же координаты получают с помощью вольфрамовых нитей [6]

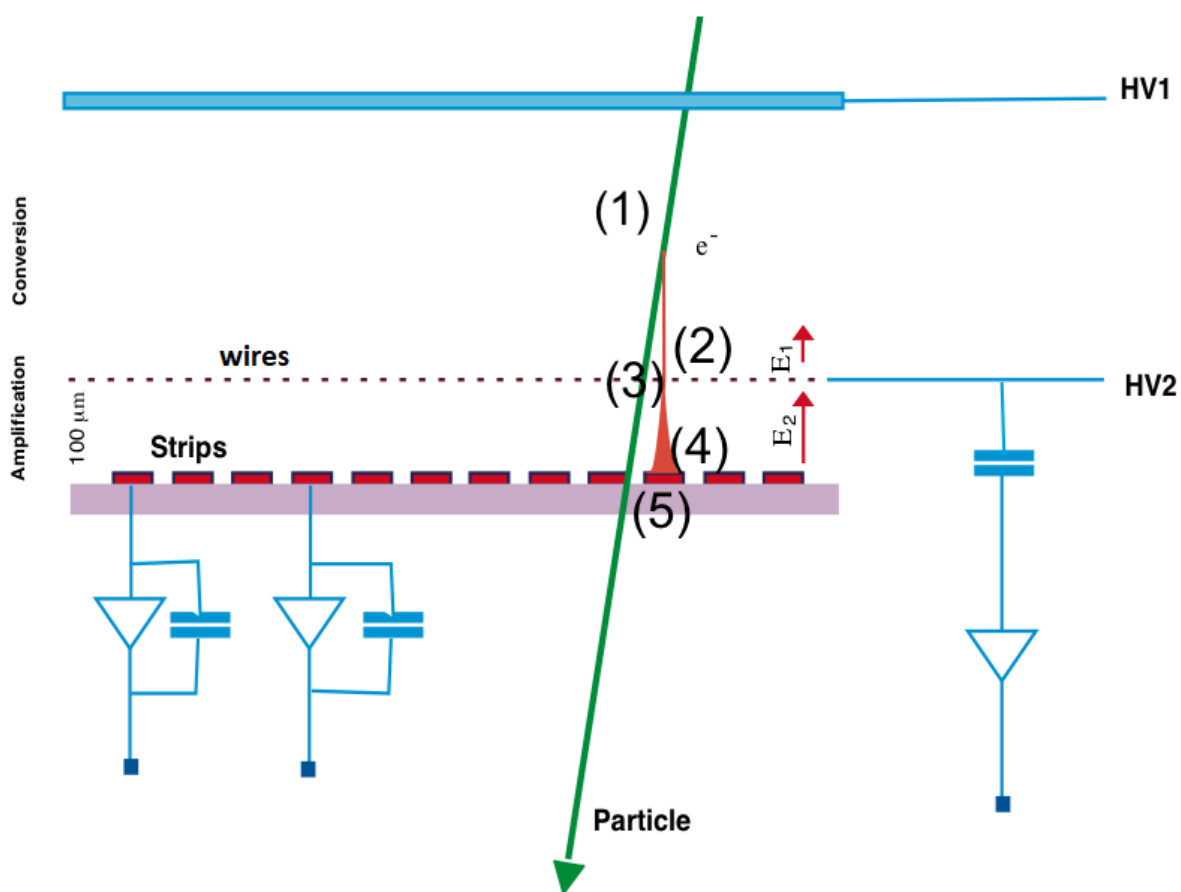


Рисунок 2 – Принцип работы

3. Характеристики

(a) sTGC может работать в штатном режиме при излучении вплоть

до 20 кГц/см² с повышенной эффективностью для минимального количества ионизирующих частиц [4] ;

- (b) При шаге стрипов в 3.2 мм и при считывании сигналов только с нужных стрипов (используя принцип "3 из 4 совпадений") координатное разрешение варьируется от 60 мкм при перпендикулярном угле падения до 150 мкм при угле падения в 30° ;
- (c) Детектирование космических мюонов при излучении до 17 кГц × см⁻² не вызывает ухудшения работы ни единой части детектора sTGC .

4. Область применения

Было уже отмечено, что основная задача этого детектора - это участие в 3-ей фазе экспериментов на ускорителе в CERN, а именно LHC (ATLAS). Однако, сама технология TGC уже использовалась в системе поиска мюонов в OPAL и, опять же, ATLAS.[6] Ну и по описанным выше характеристикам несложно догадаться, что данный детектор весьма перспективен для экспериментов в физике частиц.

Методы дефектоскопии

Детекторы, такие как sTGC, хотя и достаточно устойчивы к высоким интенсивностям потоков частиц, должны соответствовать ряду строгих критериев контроля качества. Отсюда следует необходимость проверять качество камеры, выявлять дефекты и, по возможности, их устранять уже на ранней стадии. Рассмотрим несколько методов дефектоскопии детекторов TGC-серии:

1. Рентгеновское сканирование

Этот метод основан на облучении детектора рентгеновским точечным пучком (от 3 см до 1 мм в диаметре, со скоростью в диапазоне 0,5-100 мм/с или в пошаговом режиме с шагом 0,5 мм или более). Принцип основан на фотоэлектронном эффекте (в работе [9] было проверено, что эффект ионизации газа незначителен при используемых энергиях фотонов меньше 50 КэВ) .

В результате такого "сканирования" можно получить весьма подробную картину содержимого детектора, вплоть до мельчайших дефектов. На Рис.3 отображен результат такого сканирования на детекторе с единичным разрывом. Данная карта токов - визуальное отображение данных токов по разным координатам. На более базовом уровне данное сканирование выдаёт данные в виде Рис.4.

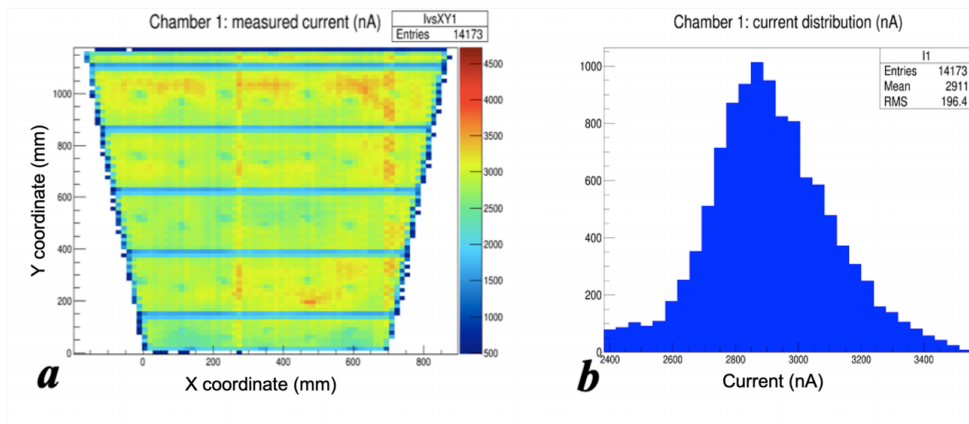


Рисунок 3 – а) Пример токовой карты с одним разрывом; б) Токовое распределение для одного разрыва.

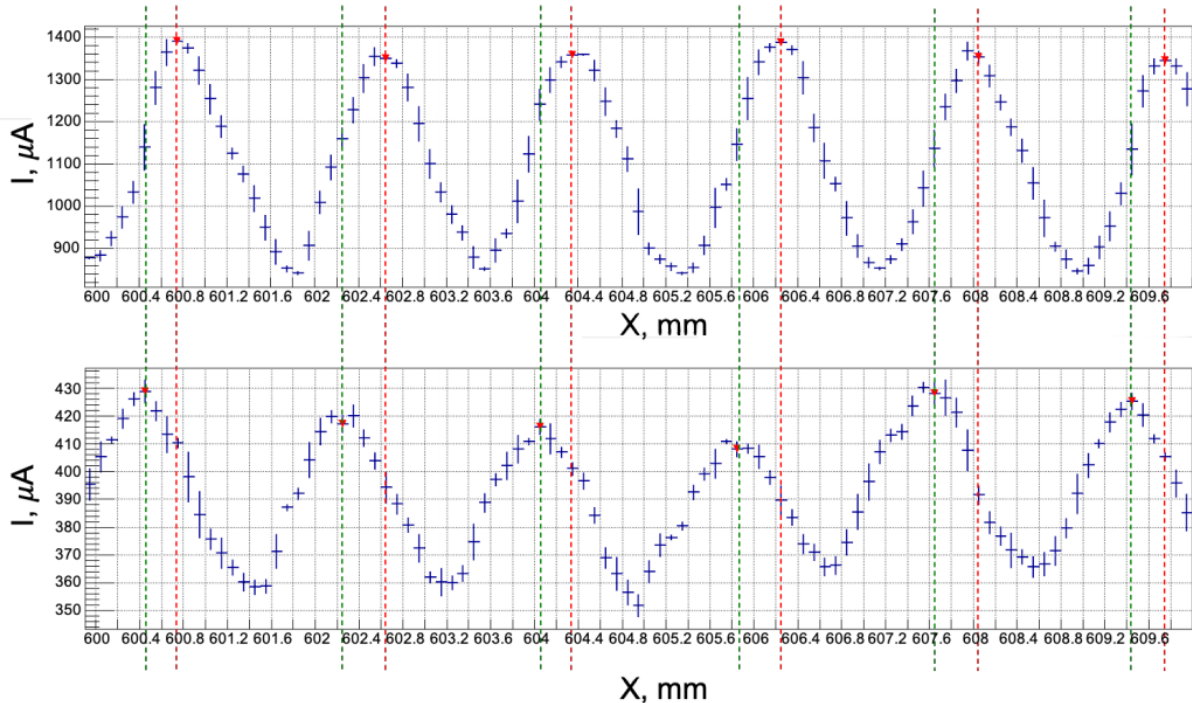


Рисунок 4 – Распределение тока по 2 одновременно облученным слоям прототипа квадруплета sTGC. Пики соответствуют одиночным проводам.

Итог: метод рентгеновского сканирования позволяет измерять однородность газового усиления и находить "горячие точки" (дефекты) в

камерах sTGC. Это также позволяет проводить детальные исследования обнаруженных дефектов и получать информацию, касающуюся падов и стрипов, которые недоступны после сборки камеры.[10]

К *недостаткам* такого метода можно отнести размеры сканера. Пусть они и позволяют исследовать детектор практически на месте проведения экспериментов, однако в случае эксперимента ATLAS, где используются большие и тяжёлые платы, придётся помучиться с их демонтажем. Вы можете увидеть на Рис.5 размеры этого устройства. Так же, не на всех этапах производства удобно использовать сканер такого размера, да и не дешёвое это удовольствие.



Рисунок 5 – Прототип рентгеновского сканера

2. Испытание пучком частиц в Fermilab и CERN

В мае 2014 года полноразмерный прототип sTGC был испытан с помощью пучка пионов с энергией 32 ГэВ на установке испытательных пучков Fermilab. Интенсивность пучка составляла приблизительно 4000 частиц за запуск и соответствовала частоте частиц в среднем около 1 кГц с размером пятна пучка 1 см^2 . В Fermilab стоит телескоп EUDET, состоящий из трех пиксельных датчиков $2 \times 1 \text{ см}^2$ в каждом плече. Между плечами EUDET на подвижной платформе установили

sTGC Рис.6. Тем самым позиционное разрешение одиночного полосового слоя превысило 50 мкм, что соответствует проектным требованиям.

Эксперимент с испытательным пучком проводился на установках CERN H6 с использованием мюонного пучка с энергией 130 ГэВ радиусом около 4 см для проверки характеристик и работоспособности падов. Благодаря узкости пучка можно было проверить реакцию падов и показания детектора при попадании частиц в смежные области между падами.^{[6][7]}

Таким образом, с помощью тестового пучка частиц, зная его траекторию и энергию можно протестировать детектор, буквально, в условиях, приближённых к эксперименту. При одновременном измерении с другим детектором (в случае Fermilab - телескоп EUDET) можно даже определить позиционное разрешение детектора. Однако минусы способа очевидны. При проверке этим методом необходимо транспортировать детектор в лабораторию, способную провести такого рода эксперимент. Очевидно, таким методом дефектоскопии часто не воспользуешься ни в процессе сборки, ни в процессе эксплуатации (обычно им тестируют прототипы).

3. Тест на космику

Тест детектора во время снятия статистики из космоса. Таким образом можно обнаружить общие отклонения от известной статистики, а так же измерить некоторые другие характеристики детектора, такие как: максимальный заряд, который может быть снят со стрипа, с каких стрипов не стоит снимать сигнал по причине возможного дефекта и некоторые математические характеристики, которые не влияют на эксперимент.

4. Высоковольтных тест

Тест обычно проходит так: после необходимой продувки н-пентаном, детекторы выдерживаются при 3200В в течение нескольких суток. В это время снимается токовая кривая, изучаются пробои. Статьи с подробным описанием эксперимента - не найдено.

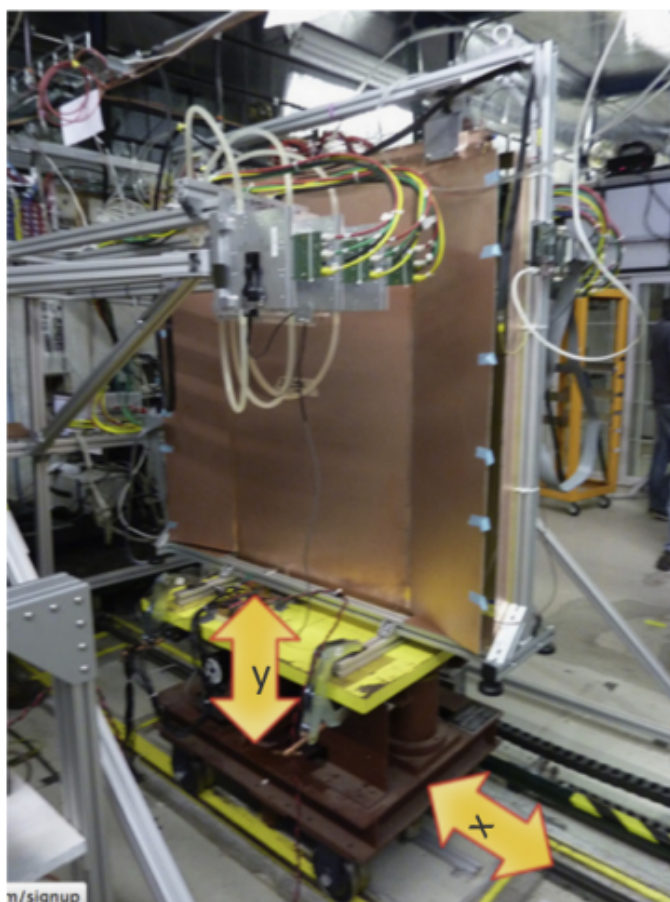


Рисунок 6 – Лучевой тест в Fermilab

5. Не вошедшее

- 1) Тест гамма-облучения на источнике GIF++ (gamma irradiation facility) в CERN. Этот тест был определен в "не вошедшее т.к. ни одной статьи по GIF++ на sTGC не выпущено.
- 2) Были попытки измерять ёмкости катодных плат (стрипов и падов), но это оказалось бесполезно, т.к., видимо, в следствии старения или других факторах ёмкости менялись.
- 3) Прототип рентгеновского теста: позволяет удостовериться в устойчивости новоизготовленных детекторов к потере заряда и высокому напряжению. Например, такой тест проводился для одного из прототипов sTGC, чтобы проверить вышеизложенные характеристики [11]. В ходе этого теста был использован β^- распад ^{90}Sr , чтобы изучить кривую включения и установить оптимальное рабочее напряжения протестированных камер. Эффективности каждой из камер были проверены отдельно, они превысили 99% при рабочем напряжении в 2.93 кВ для одной камеры и 2.9 кВ - для другой.

Ещё раз отметим общие недочёты каждой методики:

1. Неполное покрытие дефектов,
2. В случае пучков, космики и гамма-тестов - обязательное наличие считывающей электроники на детекторах,
3. Помимо этого полное или частичное отсутствие мобильности. (Необходимо совершать множество транспортировочных и демонтажных действий, чтоб детектировать поломку. А также, сложные и большие устройства дефектоскопии.)
4. На пучках тестируют обычно прототипы.

Переходные процессы в электрических цепях. Метод исследования отклика

Переходные процессы - процессы, возникающие в электрических цепях при различных воздействиях, приводящих их из стационарного состояния в новое стационарное состояние. Физическая причина возникновения переходных процессов в цепях – наличие в них катушек индуктивности и конденсаторов, то есть индуктивных и ёмкостных элементов в соответствующих схемах замещения. Объясняется это тем, что энергия магнитного и электрического полей этих элементов не может изменяться скачком при коммутации (процесс замыкания или размыкания выключателей) в цепи. Иными словами, конденсатор не может запасть энергией мгновенно, а если бы мог — для этого потребовался источник энергии бесконечной мощности.

sTGC по своей структуре очень похож на большое количество конденсаторов, т.е. RC - цепь. Тогда, можно создавать сигнал на разных участках цепи и на выходе наблюдать характерный отклик. По виду отклика можно диагностировать дефекты.

Собственно, этот метод был реализован в работе [12]. Была собрана простая аналоговая схема с генератором, осциллографом и самим детектором (C_p) Рис.7.

Если сопротивление в линии трассировки внутри sTGC намного меньше, чем R_0 и плата не имеет графито-эпоксидного покрытия, выходной

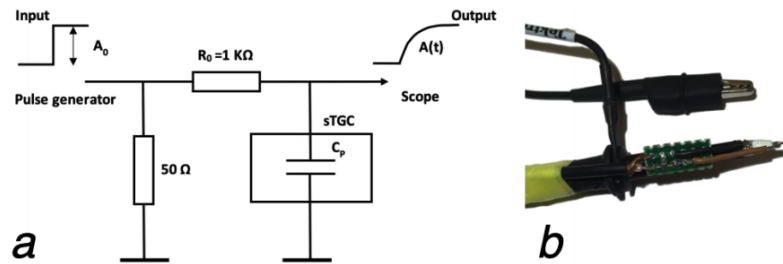


Рисунок 7 – а) схема замещения (или эквивалентная схема) интегрирующей RC_p - цепи, C_p соответствует емкости площадки sTGC; б) фотография реализации на основе щупов Tektronix MSO56.

сигнал экспоненциальный имеет вид 1

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \text{где } \tau = R_0 C_p \quad (1)$$

Типичный сигнал показан на Рис. 8. В идеале коэффициент корреляции между экспоненциальной подгонкой и измеренной функцией имеет смысл для оценки дефектности. В реальной жизни мы используем стандартные функции осциллографа Rise Time и Delay.

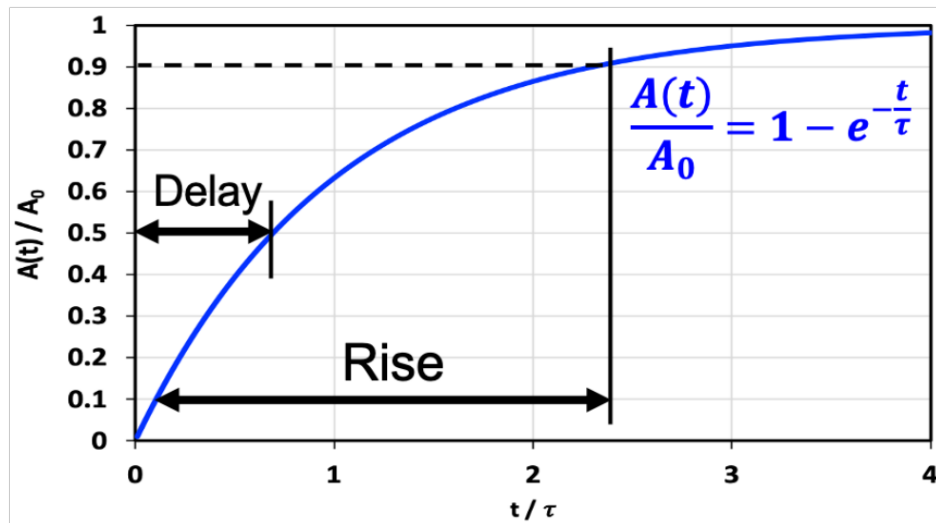


Рисунок 8 – Нормализованная функция отклика после введения шагового импульса с параметрами времени нарастания и задержки.

Задержка и время нарастания являются стандартными опциями осциллографа. Формулы для расчета емкости в случае экспоненциальной

формы волны:

$$C(Delay) = \frac{Delay}{R_0 \ln 2} \quad (2)$$

$$C(Rise Time) = \frac{Rise Time}{R_0 \ln 9} \quad (3)$$

Метод подходит для проверки на каждом этапе массового производства:

1. перед сборкой (голые проводники);
2. после однослойного производства;
3. после склеивания отдельных слоев в дублеты;
4. после окончательной сборки в квадруплеты и после установки плат адаптера.

Метод умеет распознавать: колодки закорочены на землю; отключенные колодки (> 10 кОм); сопротивление линии трассировки (< 10 кОм); взаимосвязанные колодки. Он демонстрирует возможность локализации разрыва и успешного лечения и может быть распространен на диагностическую полосу.

Написание программы

Считывание данных отклика

Метод исследования отклика достаточно эффективен и удобен на всём жизненном цикле детектора, но нуждается в автоматизации. Для решения этой задачи составим код на языке программирования Python с возможностью считывать данные осциллографа в реальном времени и сразу же обрабатывать результаты на наличие дефектов.

Для написания кода считывания данных с осциллографа Tektronix MSO4032 надо понять, как научить программу "видеть" данный осциллограф. Обратимся к производителю с этим вопросом. В "Рук-ве пользователя на русском языке [13] написано:

Использование VISA

Драйвер VISA позволяет получать доступ к данным осциллографа с помощью компьютера с операционной системой MS-Windows. Эти данные используются в пакете программного обеспечения анализа, работающем на ПК, например Microsoft Excel, National Instruments LabVIEW, Tektronix OpenChoice Desktop или в программе собственной разработки. Для связи компьютера с осциллографом применяются обычные протоколы, например USB, Ethernet или GPIB.

Чтобы использовать VISA, загрузите драйверы VISA на компьютер. Кроме того, загрузите необходимое приложение, например OpenChoice Desktop. Драйверы и программное обеспечение OpenChoice Desktop можно найти на веб-сайте Tektronix (www.tektronix.com/downloads).

Рисунок 9 – Скриншот из мануала

Установка драйвера VISA - лишь малая часть нашей задачи. К нашему счастью форум производителя Tektronix, как и интернет полны полезных ресурсов, где разобрано, как можно получить волновую форму сигнала (waveform) с осциллографа. Изучив содержимое сайта [14] мы наткнулись на самый эффективный и удобный вариант. Это готовая библиотека для считывания данных с осциллографов Tektronix.

Последуем инструкции и установим необходимые библиотеки: pyVISA Рис.10 (Для поддержки работы этой библиотеки потребовалось также установить NI-VISA 20.0) и сам PyTektronixScope Рис.11.

```
1 python setup.py install
```

Убедившись, что всё работает перейдём к основному коду.

Как оказалось, благодаря этим пакетам код, позволяющий присвоить переменным X и Y значения волновой формы сигнала, будет выглядеть

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 10.0.18363.836]
(c) Корпорация Майкрософт (Microsoft Corporation), 2019. Все права защищены.

C:\Users\gree->pip install -U pyvisa
Collecting pyvisa
  Downloading PyVISA-1.10.1.tar.gz (6.8 MB)
    |████████████████████████████████████████| 6.8 MB 1.3 MB/s
Installing collected packages: pyvisa
  Running setup.py install for pyvisa ... done
Successfully installed pyvisa-1.10.1
```

Рисунок 10 – Командная строка установки pyVISA

```
Finished processing dependencies for PyTektronixScope==0.2
D:\Users\gree-\Desktop\PyTektronixScope-0.2>
```

Рисунок 11 – Командная строка установки PyTektronixScope

всего в 3-и строчки:

```
1 from PyTektronixScope import PyTektronixScope
2
3 scope = TektronixScope(instrument_resource_name)
4 X,Y = scope.read_data_one_channel('CH2', t0 = 0, DeltaT = 1E-6,
  ↪ x_axis_out=True)
```

Теперь перед нами остался лишь вопрос анализа полученных массивов.

Подготовка ПО для анализа

Для анализа данных, в том числе волновой формы сигнала, мы воспользуемся пакетом библиотек ROOT. Изначально планировалось воспользоваться pyROOT на моей домашней ОС - Windows для анализа данных. Однако при попытке подгрузить библиотеку ROOT в Python-код высветилась ошибка Рис.12.

После поиска этой ошибки в интернете, на ROOT-форуме была найдена статья, в которой было указано, что в нынешних версиях Python и ROOT на операционной системе Windows - pyROOT не работает [15].

Эта проблема была решена с помощью удалённой "фермы", выдан-

```

>>> import ROOT
Traceback (most recent call last):
  File "<stdin>", line 1, in <module>
  File "C:\Program Files\root\bin\ROOT.py", line 24, in <module>
    import cppy
  File "C:\Program Files\root\bin\cppyy.py", line 61, in <module>
    import libPyROOT as _backend
ImportError: DLL load failed: Не найден указанный модуль.
>>>

```

Рисунок 12 – Ошибка при подгрузке библиотеки ROOT

ной кафедрой в образовательных и научных целях студентам моего курса, с операционной системой Linux (@ui02.lxfarm.mephi.ru). На операционную систему, подключение к которой было реализовано с помощью SSH-клиента PuTTY, была поставлена программа Miniconda3 4.8.2 (в целях настроить удобную схему управления пакетами и версиями языка Python) Рис.13. Среди списка пакетов на Anaconda Cloud был найден официальный пакет ROOT, поддерживаемый операционной системой Linux [16]. После чего ROOT был успешно установлен Рис.14 и pyROOT был успешно протестирован в среде Рис.15.

```

b17_01@ui02:~
[b17_01@ui02 ~]$ wget https://repo.anaconda.com/miniconda/Miniconda3-latest-Linux-x86_64.sh
--2020-05-29 19:57:21-- https://repo.anaconda.com/miniconda/Miniconda3-latest-Linux-x86_64.sh
Resolving repo.anaconda.com... 104.16.130.3, 104.16.131.3, 2606:4700::6810:8203, ...
Connecting to repo.anaconda.com|104.16.130.3|:443... connected.
HTTP request sent, awaiting response... 200 OK
Length: 85055499 (81M) [application/x-sh]
Saving to: "Miniconda3-latest-Linux-x86_64.sh"

100%[=====>] 85,055,499 27.8M/s in 2.9s

2020-05-29 19:57:24 (27.8 MB/s) - "Miniconda3-latest-Linux-x86_64.sh" saved [85055499/85055499]

[b17_01@ui02 ~]$ sh ./Miniconda3-latest-Linux-x86_64.sh

Welcome to Miniconda3 4.8.2

In order to continue the installation process, please review the license
agreement.
Please, press ENTER to continue

```

Рисунок 13 – Скачивание и установка Miniconda3 4.8.2


```
bash b17_01@ui02:~
[b17_01@ui02 ~]$ bash
(base) [b17_01@ui02 ~]$ conda install -c conda-forge root
Collecting package metadata (current_repodata.json): done
Solving environment: done
```

Рисунок 14 – Установка

```
bash b17_01@ui02:~
(base) [b17_01@ui02 ~]$ python3.7
Python 3.7.6 | packaged by conda-forge | (default, Mar 23 2020, 23:03:20)
[GCC 7.3.0] on linux
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> import ROOT
>>> exit()
```

Рисунок 15 – Загрузка библиотеки ROOT в Python

Анализ данных отклика

Осталось только написать программу анализа данных с переменных X, Y . Пусть это будет общая программа, получающая данные из `.txt`, и построим в ней с помощью подключенного ROOT по ним [данным из `.txt`] график.

```
1 get_ipython().run_line_magic('jsroot', 'off')
2 from ROOT import TCanvas, TGraph
3
4 n = 200
5 x, y = array( 'd' ), array( 'd' )
6 file = open("N2.txt","r")
7 list1=file.readlines()
8 for i in range( n ):
9     x.append( i )
10    y.append( float(list1[i]))
11    print(' i %i %f %f ' % (i,x[i],y[i]))
12
13 g = TGraph(200,x,y)
14 MyC = TCanvas("MyC", "MyC", 1)
15 g.SetMarkerStyle(8)
16 g.SetMarkerColor(2)
17 g.SetMarkerSize(1)
18 g.SetLineColor(2)
19 g.SetLineWidth(2)
```

```

20 g.GetAxis().SetTitle("Y")
21 g.GetAxis().SetTitle("X")
22 g.GetAxis().SetRangeUser(82000,105000)
23 g.GetAxis().SetRangeUser(0,200)
24 g.SetTitle(" ")
25 g.Draw("ALP")
26 MyC.Draw()

```

Данные были взяты с случайной лабораторной работы и использованы тут лишь в качестве примера Рис.16.

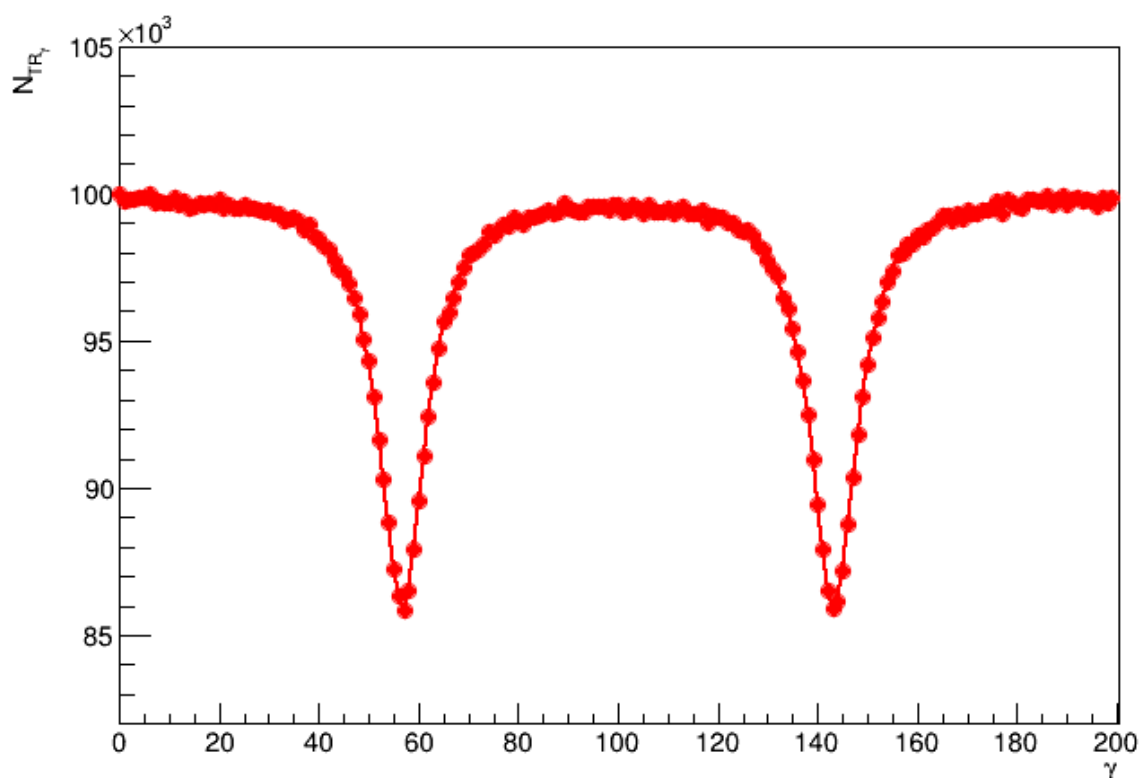


Рисунок 16 – Получившийся график

Теперь наша программа готова к тестированию. Однако, в связи с невозможностью присутствовать в лаборатории, чтоб подключиться к Tektronix MSO4032 и sTGC (в следствии пандемии коронавируса), провести полную проверку не получится.

Дальнейшие доработки и развитие метода

В дальнейшем, будет написана вторая часть программы, отвечающая, за данные, что будут управлять характеристиками сигнала источника (генератора). Зная, какой формы сигнал был отправлен и строение электронной цепи можно рассчитать, какой сигнал ожидается на выходе. Таким образом можно будет достаточно точно определять места дефектов, а то и, более того, контролировать состояние каждого стрипа, пада или провода сетки на протяжении всего периода эксплуатации.

Так же, на данный момент, мы можем лишь определять наличие дефекта. В будущем, имея большую базу данных о дефектах и формах искажений сигнала отклика от расчётного появится возможность с помощью машинного обучения научить программу самостоятельно определять типы дефектов и их возможные причины, что так же даст толчок в модифицировании детекторов.

Заключение

Мы рассмотрели различные методики дефектоскопии и рассмотрели один из самых перспективных - метод исследования отклика, возникающего при переходном процессе, вызванного внешним сигналом (сигналом генератора). Этот метод эффективен и удобен для проверки качества на всём протяжении жизненного цикла детектора. Причём, потенциально, данный метод можно использовать и на других детекторах (помимо sTGC), например на MicroMegas или различного рода пропорциональных камерах. В целях развития метода был предложен код для считывания отклика, а также предоставлена вся необходимая информация для подготовки оборудования к исследованию такого рода сигнала и пример кода анализа данных с помощью пакета библиотек ROOT (а конкретнее с использованием pyROOT). В ходе разработки было найдено несколько тонкостей вопроса технических характеристик оборудования, знания о которых облегчат жизнь начинающим в этой области. Развитие написанного софта с помощью технологий машинного обучения станет новым толчком в понимании дефектообразования и поможет отрасли найти новые решения в детекторостроении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Majewski S., Charpak G.* EP Internal Report 82-02 : tech. rep. / CERN. — 1982.
2. *Majewski S., al et.* A thin multiwire chamber operating in the high multiplication mode // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. — 1986. — т. A 817 (1). — с. 265.
3. *ATLAS C.* Technical Design Report New Small Wheel : tech. rep. / CERN - LHCC. — 2013.
4. *ATLAS C.* The New Small Wheel Upgrade Project of the ATLAS Experiment : tech. rep. / Simon Fraser University, University Dr. Burnaby. — 2014.
5. *Nagai K.* Thin gap chambers in ATLAS // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. — 1996. — т. A 384. — с. 219—221.
6. *Sekhniaidze G.* Construction and performance of the sTGC and MicroMegas chambers for ATLAS NSW upgrade // JINST. — 2016. — т. 1. — с. 13.
7. Performance of a full-size small-strip thin gap chamber prototype for the ATLAS new small wheel muon upgrade / A. Abusleme [и др.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. — 2016. — т. A 217. — с. 85—89.
8. *Григорьев В.* Газоразрядные детекторы элементарных частиц. — М. : НИЯУ МИФИ, 2012.
9. *Teterin P., al et.* The X-ray scanning technique application for sTGC detectors quality control // JINST. — 2020.
10. Teterin, P. and et al. *Development of scanning technique for sTGC detectors production quality control.* т. 012015. — Journal of Physics, 2016.

11. Proc. ANIMMA 2015 Conference proceedings, 20-24 April 2015, Lisbon, Portugal. т. 6. — ANIMMA, 2015.
12. *Teterin P., Smakhtin V.* Cathode boards defects detection method for sTGC chambers // JINST. — 2020. — т. 1. — с. 8.
13. *Tektronix, Inc.* Серия MDO4000C Комбинированный осциллограф, Руководство пользователя : тех. отч. — <https://download.tek.com/manual/MDO4Series-Oscilloscope-User-Manual-RU-RU-077117301.pdf>.
14. *Clade P.* PyTektronixScope 0.2. — <https://pypi.org/project/PyTektronixScope/>, 2017.
15. Pyroot import failed (DLL load failed) on new Windows installation. — <https://root-forum.cern.ch/t/pyroot-import-failed-dll-load-failed-on-new-windows-installation/32373>, 2019.
16. conda-forge / packages / root 6.20.4. — <https://anaconda.org/conda-forge/root>, 2019.