

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

УДК 53-05

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ДЕТЕКТОРА
sTGC

Научный руководитель:

к.ф.-м.н.

_____ П. Е. Тетерин

Выполнил:

_____ А. И. Дуров

Москва 2019

Содержание

Содержание	1
1 Обзор литературы	2
1.1 Принцип работы sTGC	2
1.2 Взаимодействие мюонов с sTGC	4
1.3 Изготовление sTGC	6
1.4 Тестирование sTGC	7
1.5 Аналоговый тест sTGC	11
2 Ход работы. Подготовительная часть	15
2.1 Начало работы с NI LabView 2018	15
2.2 Первый этап - сокращение лишних операций	15
2.3 Установка дополнительных функций	16
3 Проверка программы	19
4 Дальнейшая работа	20
4.1 Симуляция сигнала	20
4.2 Попытка соединения LabView и ROOT	22
5 Вывод	24

Цель работы

Целью моей работы является выявление дефектов sTGC аналоговым тестом и распространение этого теста на стрипы и проволоочки.

1 Обзор литературы

1.1 Принцип работы sTGC

Впервые идея TGC (Thin Gap Chambers - что буквально "камера с тонким зазором") была воплощена в жизнь в 1983 году [1], которая нашла применение в системе поиска мюонов в OPAL и ATLAS. Для повышения устойчивости детектора для режима HL-LHC разработан узкостриповый вариант TGC — sTGC (small TGC), который заменит своего предшественника на Малых Мюонных Колесах по окончании Фазы-1 модернизации эксперимента ATLAS [2]. Структура sTGC изображена на рис. 1:

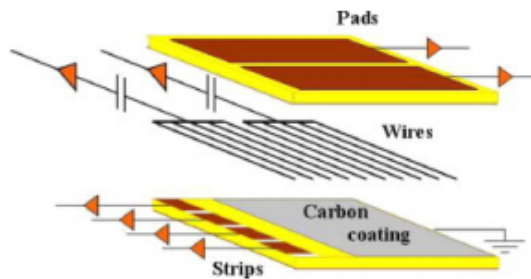


Рисунок 1 – Структура sTGC

Состоит он из сетки вольфрамовых нитей (wires) толщиной 50 мкм с золотым напылением, расположенных с шагом в 1.8 мм. Находятся они между двумя катодными платами на расстоянии 1.4 мм друг от друга. Катодные платы сделаны из G-10 платы, покрытой графит-эпоксидной смесью с поверхностным сопротивлением в 100-200 кОм на единицу площади (такое покрытие было выбрано из-за того, что вследствие высокой облучаемости, которая имела место в HL-LHC, иные резистивные покрытия понижали бы эффективное напряжение вблизи контактов элементов электрических цепей, даже имея ввиду тот факт, что свободные заряды не оказывают большого влияния на детектор). Таким образом, с помощью графит-эпоксидного покрытия удалось добиться хорошего взаимодействия между стрипами (strips) и падами (pads), сохраняя при этом возможность быстрой

передачи сигнала). С одной стороны от неё располагаются прецизионные стрипы, направленные перпендикулярно вольфрамовым нитям, а с другой стороны накрываются падами - большими прямоугольными плоскостями. Стрипы имеют шаг в 3.2 мм, что гораздо меньше соответствующего показателя в TGC - отсюда и появилось название sTGC (small TGC). Пады используются в принципе "3 из 4 совпадений" (квадруплетную структуру можно увидеть на рис.2) для обнаружения примерного трека мюона, а значит и примерной области его взаимодействия.

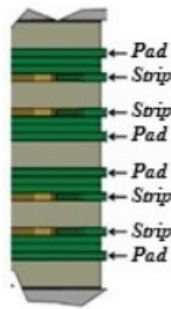


Рисунок 2 – Квадруплетная структура sTGC

Также, что не менее важно, пады нужны для того, чтобы определить, с каких именно стрипов нужно снимать показания, чтобы получить более точное измерение плоскостных координат. Азимутальные же координаты получают с помощью вольфрамовых нитей. Рабочим газом является смесь, состоящая из 55% CO_2 и 45% n-пентана [3]. Также стоит отметить, что детектор sTGC обладает хорошим пространственным разрешением в 100 мкм.

Итого, можно выделить следующие особенности детектора sTGC:

1. sTGC может работать в штатном режиме при излучении вплоть до 20 кГц/см^2 с повышенной эффективностью для минимального количества ионизирующих частиц [4] ;
2. 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° ;

3. Детектирование космических мюонов при излучении до 17 кГц/см^2 не вызывает ухудшения работы ни единой части детектора sTGC .

1.2 Взаимодействие мюонов с sTGC

Когда мюоны пролетают сквозь рабочую плоскость sTGC, они вызывают ионизацию газа, который находится внутри sTGC, и образовавшиеся ионы под действием электрического поля "плывут" до ближайшего стрипа и вызывают электрический импульс, который и регистрируется экспериментатором. Именно благодаря тому, что шаг стрипов 3.2 мм ионы быстро достигают нужного ближайшего стрипа, в результате чего и получается хорошая точность измерения плоскостных координат точки взаимодействия заряженной частицы с молекулой газа.

Примером регистрации мюонов детектором sTGC может послужить эксперимент по обнаружению космических частиц. При проведении такого эксперимента система триггеров срабатывала, когда сигналы с проволочек, поступавшие из обеих камер, совпадали в окне в 30 нс. Такие сигналы суммарно за 100 нс оцифровывались и записывались в результат эксперимента. Электронная лавина, которая возникала вследствие ионизации газа из-за прохождения детектора заряженной частицей, собиралась на проволочках и индуцировалась на стрипах. Индуцированный заряд распределялся по соседним стрипам около места прохождения частицей детектора, учитывая искажение траектории после прохождения графитового слоя. Координата прохождения частицы вычислялась фитированием по Гауссу. Результаты такого фитирования можно увидеть на рис. 3.

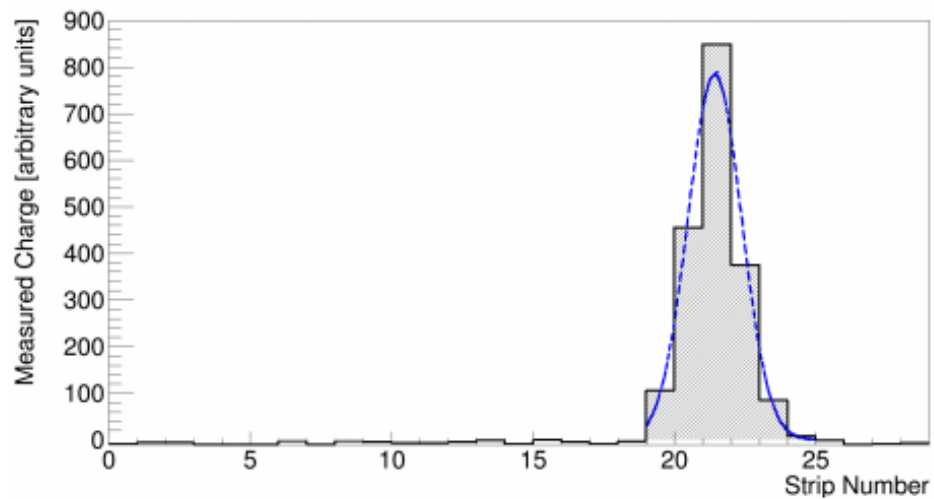


Рисунок 3 – Фитирование сигнала

Следует отметить, что все вышеперечисленные измерения были проведены согласно источнику [5], и этот эксперимент проводился на sTGC, размеры и строение которого можно увидеть на рис. 4.

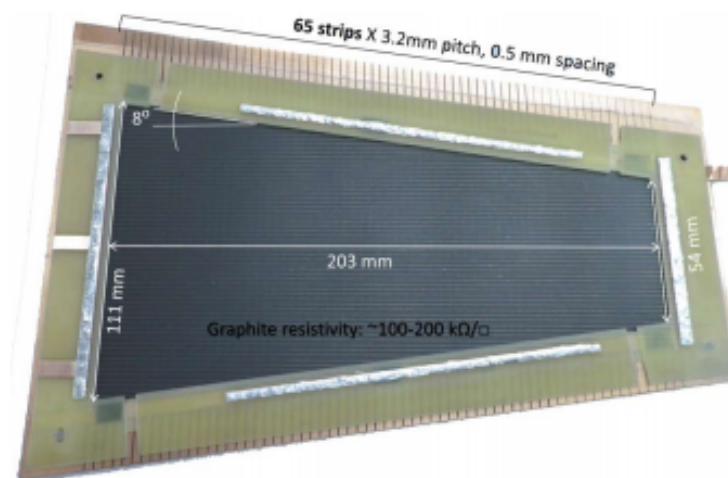


Рисунок 4 – используемый sTGC

1.3 Изготовление sTGC

Весьма непросто изготовить детектор частиц с мультислойными детектирующими плоскостями - для этого необходимо достичь высокой точности при выравнивании стрипов, выводящих сигнал из каждого слоя. Требуемая точность позиций параллельных плоскостей - 40 мкм. Данная точность достигается, конечно, не руками человека, а роботизированной сборкой. Все стрипы вывода для каждой из плоскостей изготавливаются вместе за одну операцию с помощью латунных вставок, с которыми может быть установлена внешняя связь. Далее склеиваются между собой катодные платы, разделенные стенами камеры на периферии плат. Аналогично располагаются Т-образные проволочные опоры шириной в 7 мм и распорные заклепки с интервалами в 20 см. Итак, уже получившиеся отдельные камеры склеиваются еще и между собой, разделяясь специально обработанной рамой с "сотовой" структурой по всей поверхности каждой из камер, каждая из которых на 100 мкм меньше зазора между ними. Клей в нашем случае выступает в качестве "фильтра" для компенсации небольших отклонений в толщине материала печатной платы (PCB - printed circuit board). Процедура склеивания использует тот небольшой факт, что различные слои sTGC располагаются относительно друг друга с высокой точностью, если использовать те самые латунные вставки, прикрепленные к внешнему прецизионному джигу (jig) на мраморной поверхности.

Таким образом был построен первый полноразмерный квадруплетный sTGC детектор в Институте Вайцмана в Израиле весной 2014 года [6], размеры получившегося детектора - $1.2 \times 1.0 \text{ м}^2$. Тот прототип состоял из четырех слоев, содержащих стрипы и пады, и был изготовлен под тщательным контролем, чтобы быть использованным в New Small Wheel upgrade, в частности - в середине малого сектора.

1.4 Тестирование sTGC

Детекторы sTGC будут работать в суровых радиационных условиях, и будут практически недоступны для внешнего взаимодействия во время измерений. А это подразумевает требование очень строгих процедур контроля качества во время их производства и установки. Новоизготовленные детекторы sTGC (а особенно - если они еще и больших размеров) могут содержать разнообразные технологические дефекты, например: отсутствие некоторых проволочек, провисшие проволочки, дефекты толщины катодной полосы и зазора, частицы пыли внутри зазора и на проводах, дефекты при склеивании и т.д.. Все это может привести к неравномерности распределения газа, к потери зарядов или к неправильной интерпретации результатов измерений.

Для проверки качества изготовления детекторов sTGC используется множество различных методов (следует отметить, что контролем качества являются не только методы, позволяющие обнаружить технические дефекты при изготовлении, но и некоторые параметры, свойственные персонально каждому детектору sTGC - например, величина порогового заряда, выделение стрипов, которых не стоит учитывать при подведении результатов экспериментов или различные математические параметры, которые должны быть применены к данному детектору; Иными словами - один sTGC может иметь лучше пространственное разрешение, но хуже величину порогового заряда, а другой - с точностью, да наоборот). Один из таких тестов - высоковольтных тест, позволяющий удостовериться в устойчивости новоизготовленных детекторов к потери заряда и устойчивости к высокому напряжению. Например, такой тест проводился для одного из прототипов sTGC, чтобы проверить вышеизложенные факторы [5]. 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, и тем самым было получено, что такие эффективности оказываются выше 99% при рабочем напряжении в 2.93 кВ для одной камеры и 2.9 кВ - для другой.

Еще один тест, которому было уделено немало внимания - радиационный тест [7]. Он состоит в том, что поверхность каждой из камер квад-

руплета sTGC облучается точечным пучком рентгеновских лучей. (3 см в диаметре, с шагом в 2.5 см). После такого "сканирования" было выявлено множество дефектных зон, для более детального изучения которых требуются более точные измерения - уже тонким лучом с диаметром в 1 мм. На рис. 5 приведены результаты детального "сканирования" дефектной области, соответствующей одной из анодных проволок в первой камере квадруплета sTGC). "Горячая" (hot) зона показывает дефектную зону.

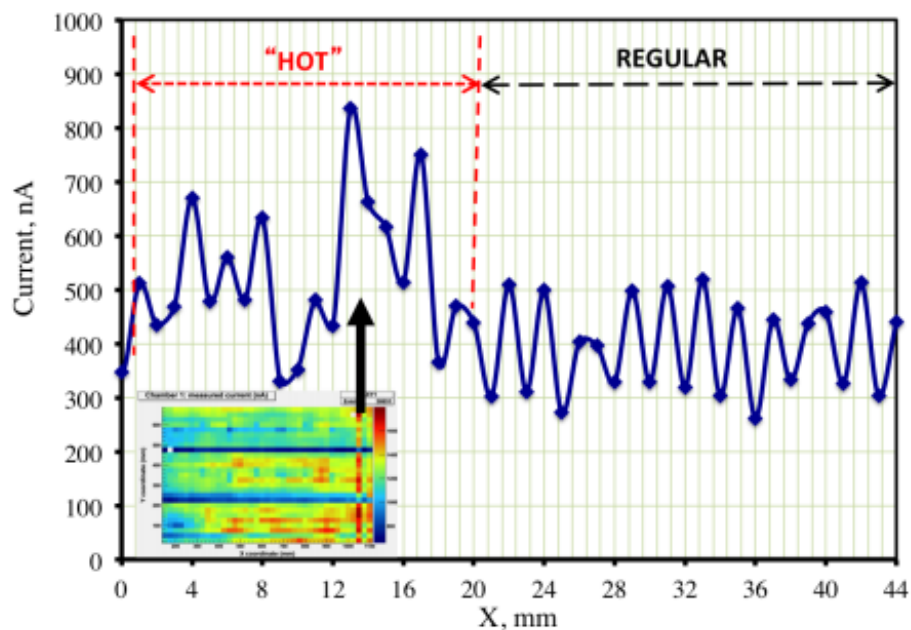


Рисунок 5 – График, показывающий вертикальную дефектную зону одной первой камеры sTGC (прим.: точки соединены линиями только для наглядности)

Недостатком такого сканирования, безусловно, являются размеры рентгеновского сканера, использованного в вышеизложенном методе обнаружения дефектов детектора sTGC - наглядно размеры вы можете увидеть на рис. 6. Существует еще один тест, использующий рентгеновское излучение, позволяющий определять некоторые параметры конкретного sTGC, например, пространственное разрешение. Такой тест описан в [8].



Рисунок 6 – Прототип рентгеновского сканера в натуральную величину

Следующий тест, который тоже может быть использован для выявления дефектов детектора sTGC - космический тест. Важно отметить, что данный тест позволяет определить параметры конкретного детектора, которые должны быть учтены при проведении экспериментов на нем, а также вытекающей из этих экспериментов обработки результатов, а не выявлять технические дефекты. Его проведение я уже описывал выше в пункте 1.2. Результаты такого теста дали следующие особенности, которые должны быть учтены для последующих экспериментов:

1. Амплитуда событий (т.е. максимальный заряд, собранный со стрипа), должна быть выше определенного порога для подавления шума;
2. Стрипы, в которых собранный заряд является максимальным, не должны быть первым или вторым стрипом (пояснение: если в детекторе 65 стрипов, то не следует учитывать максимальный заряд, снятый с 1-го или 65-го стрипа);
3. События, вызвавшие переполнение заряда на стрипе не должны быть включены в результат эксперимента;
4. Фитирование по Гауссу должно сходиться с результатом, используя небольшой параметр χ^2 , чтобы обеспечить хорошее согласование;

5. Стандартное отклонение σ при фитировании по Гауссу должно быть не больше ширины в два стрипа - для удаления из рассмотрения дельта-электронов и других ненужных частиц.

И наконец, еще один тест, который следует тут упомянуть - импульсный тест. Этот тест позволяет при подаче электрического импульса в простейшую цепь, содержащую sTGC (а точнее - конкретные проверяемые части sTGC) определить дефектные области, если обнаруживается сопротивление в 10 кОм и более. Однако сразу очевидно несовершенство данного теста - невозможно определить дефект, если он вызывает сопротивление в цепи меньшее, чем 10 кОм. Конечно, подобные дефекты могут быть обнаружены и другими способами, описанными мною выше - однако они все имеют свои недостатки (например в рентгеновском тесте - сложность и громоздкость установки). Однако далее я хочу описать (а впоследствии и повторить, распространяя его на стрипы и проволоочки) аналоговый метод, который позволяет находить дефекты не только при обнаружении сопротивления свыше 10 кОм, но и при сопротивлениях, меньших 10 кОм. И этот метод будет проще в исполнении, чем большинство вышеизложенных методов.

1.5 Аналоговый тест sTGC

Данный метод основан на введении ступенчатого импульса [9] в место контакта падов и одновременном измерении ответного сигнала по схеме, изображенной на рис. 7.

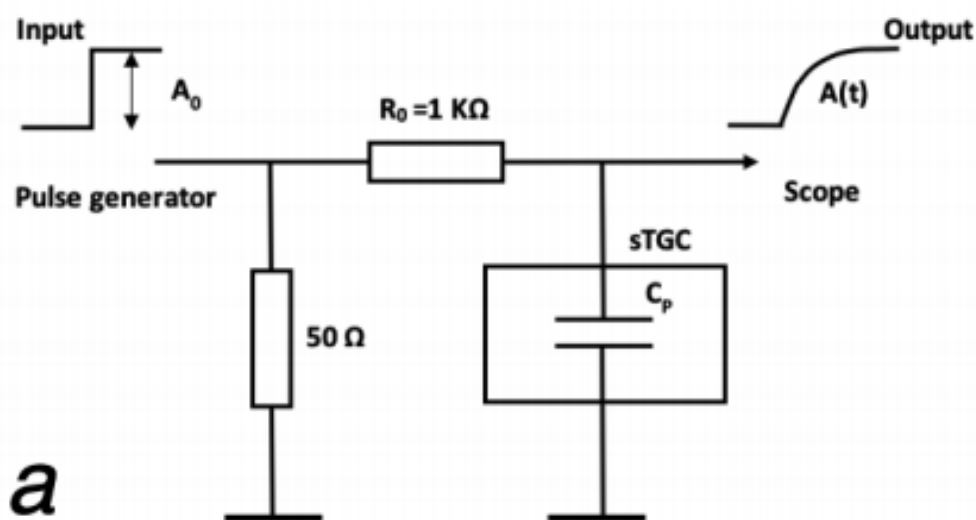


Рисунок 7 – Электрическая схема установки, где C_p отвечает за емкость пада sTGC

Типичное сопротивление измеряемых линий трассировки лежит в диапазоне от 0.5 Ом до 2.7 Ом (пропорционально длине этой линии). В случае возникновения проблем, линия трассировки может содержать "паразитическую" эквивалентную емкость, которая может помочь в локализации дефекта. Чтобы быть чувствительным к значениям сопротивления выше распространенных значений - резистор R_0 должен быть 1 кОм. Как я говорил ранее, возникающие сопротивления свыше 10 кОм можно автоматически пометить как "отключенные" пады. Также важно отметить, что резистор нужно припаять как можно ближе к наконечнику измерительного аппарата (который служит источником вводимого ступенчатого импульса), чтобы уменьшить перекрытия падов.

Итак, если в нашей линии сопротивление меньше R_0 (т.е. как и должно быть), то выходной сигнал для катодной платы без графитового покрытия можно описать формулой:

$$A(t) = A_0 * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

где $\tau = R_0 C_p$. Такой сигнал можно увидеть на рис. 8

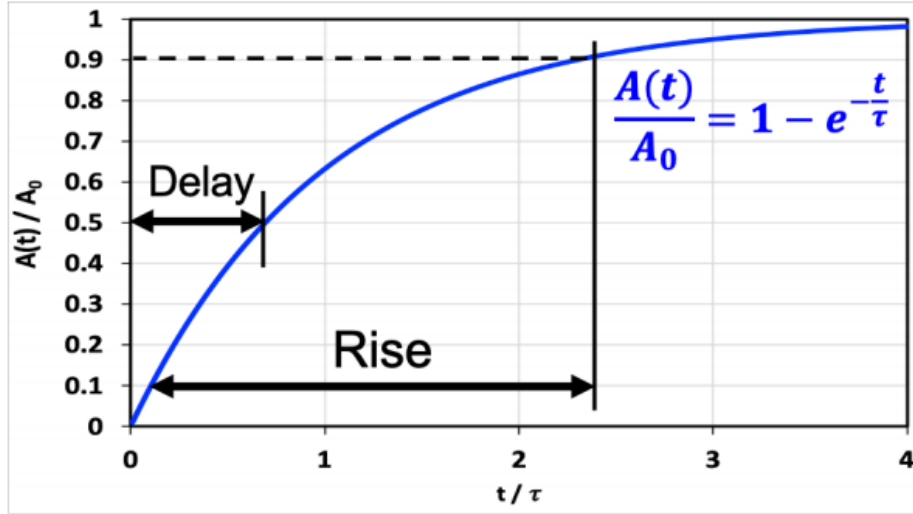


Рисунок 8 – Функция ответного сигнала после введения ступенчатого импульса

Реальный вид функции немного отличается от вышепоказанной экспоненты вследствие искажения сигнала из-за графитового покрытия и сопротивлений краев падов. Для последующих описаний нам понадобятся два выведенных с помощью функций осциллографа Rise Time и Delay параметра:

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

$$C(RiseTime) = \frac{RiseTime}{R_0 * \ln 9} \quad (3)$$

где параметры Delay и Rise Time - временные параметры, измеряемые в нс, а $R_0 = 1k\Omega$, тогда сами параметры $C(Delay)$ и $C(RiseTime)$ будут измеряться в пФ.

Дефектные пады можно обнаружить с помощью корреляционного графика (см. рис. 9). В упрощенном случае дефекты могут быть выявлены путем поиска "выпавших" точек на графике в сочетании с измерениями амплитуды. Измерения амплитуды подезны для выявления заземленных падов. Наиболее сложными для обнаружения являются перекрытые пады.

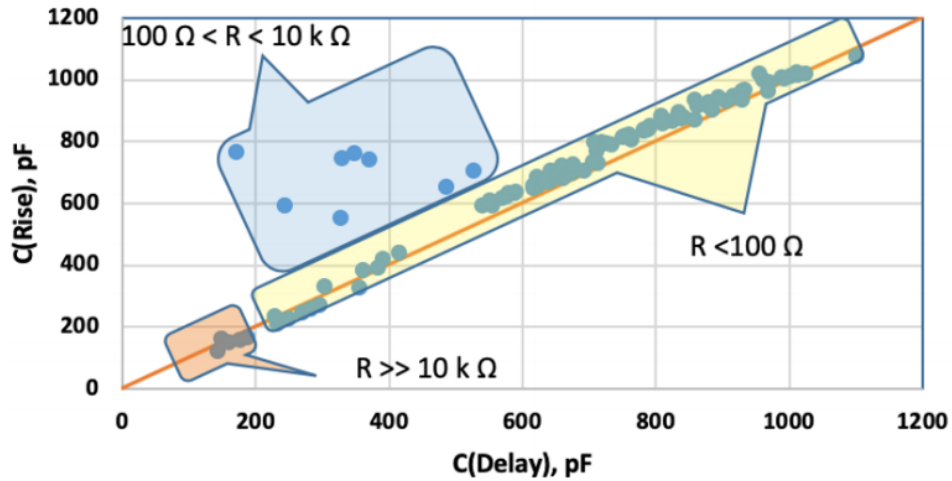


Рисунок 9 – Корреляционный график для поиска дефектов sTGC

В этом случае два пада покажут равные значения параметров Rise Time и Delay, и эти значения не будут резко отличаться от ожидаемого значения. А их нельзя не учитывать, так как они тоже дефектным образом влияют на результаты измерений. Для более точной локализации дефектов (локализации разрыва цепи) с каждой из определенных выше дефектных областей должно быть снято защитное покрытие рядом с via и измерения должны быть повторены как со стороны via, так и со стороны катодной платы. Эквивалентная схема локализации дефекта показана на рис. 10. Результаты измерений ответного и входного сигналов с каждой из сторон показаны на рис. 11. При соответствующей калибровке дефект может быть локализован с точностью ± 1 см.

В заключение стоит отметить, что вышеизложенный метод достаточно прост в реализации, и он подходит для проверки детектора на каждом этапе его производства: перед сборкой, после изготовления целого слоя, после склеивания одиночных слоев в дублеты, после сборки окончательного квадруплета, и после финальной сборки. Более того, данная методика подходит не только для ее реализации во время установки детекторов на New Small Wheel, но и для других проволочных детекторов, например для предшественника sTGC - TGC, которые, кстати говоря, планируются к замене в результате апгрейда ATLAS Upgrade Phase-2, производство которых уже планируется в Институте Вайцмана.

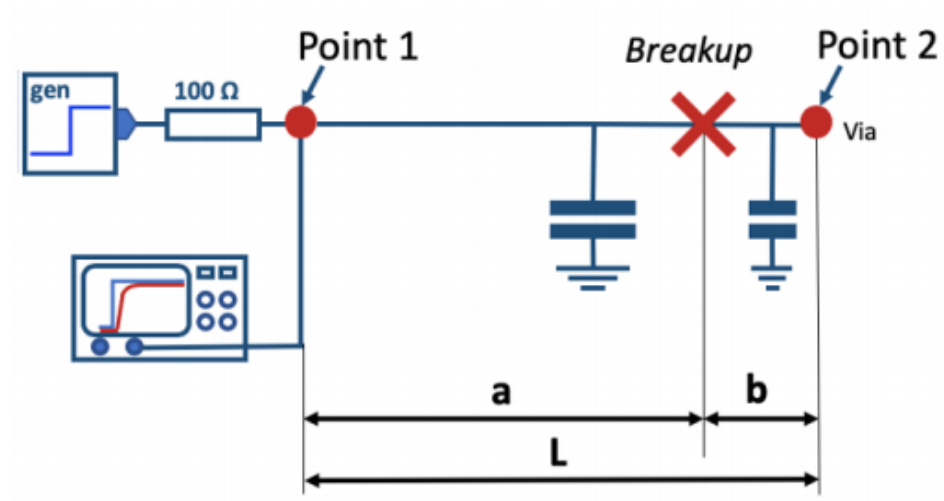


Рисунок 10 – Эквивалентная схема локализации дефекта

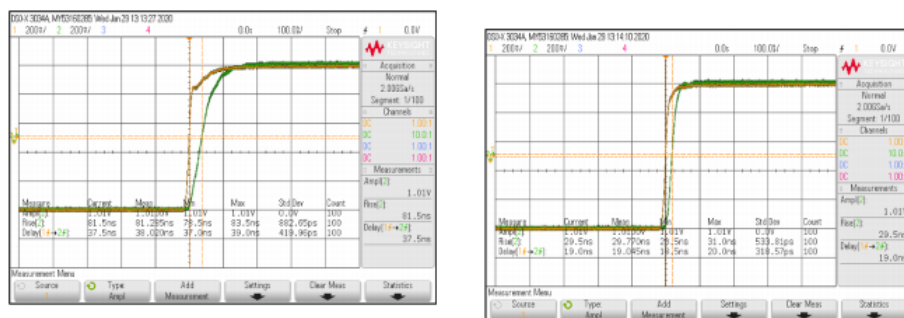


Рисунок 11 – Эквивалентная схема локализации дефекта

Итак, данный метод способен распознавать:

1. Заземленные пады;
2. Отключенные (disconnected) пады (с сопротивлением >10 кОМ);
3. Дефекты линий трассировки (с сопротивлением <10 кОМ);
4. Перекрытые пады.

Более того, этот метод демонстрирует возможность локализации разрыва цепи и успешного устранения этого дефекта, а также может быть распространен на диагностику стрипов и проволочек, что и является целью моей работы.

2 Ход работы. Подготовительная часть

2.1 Начало работы с NI LabView 2018

В первую очередь для реализации аналогового метода требуется разобратся с некоторым программным обеспечением и приборами, которые будут пользоваться в данной работе в будущем. Для необходимых измерений помимо самого детектора sTGC использовался осциллограф Tektronix MDO4032 и программа, необходимая для обработки и анализа данных, снимаемых с осциллографа - NI LabView 2018. Данная среда разработки мне была не знакома до того самого момента, поэтому потребовалось немало времени для подготовки к работе с ней. Было изучено множество сайтов, как на английском, так и на русском языках посвященных введению в LabView.

2.2 Первый этап - сокращение лишних операций

После предварительных тренировок на различных примерах готовых программ, уже заложенных в первоначальную библиотеку LabView была выбрана там программа, предназначенная специально для осциллографа Tektronix MDO4032. Однако первая проблема, с которой пришлось столкнуться уже на этом этапе, состояла в том, что эта программа содержала много не нужных для нашего эксперимента деталей (см. рис.12).

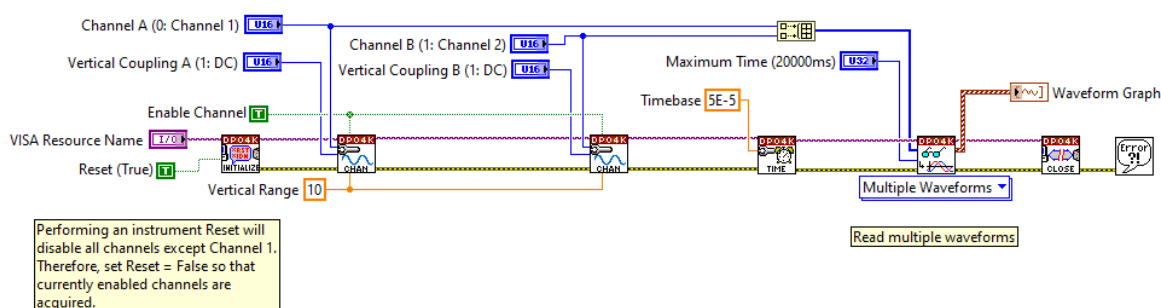


Рисунок 12 – Block Diagram (example)

Например, первый этап работы программы состоял в проверке версии осциллографа. Проверялось LabView более 60 версий осциллографов, но уже заранее известно, что работа проводится только с одной (см. рис.13).

ме (из-за конфликта типа данных первого и второго примеров программы также пришлось переработать типы обрабатываемых данных).

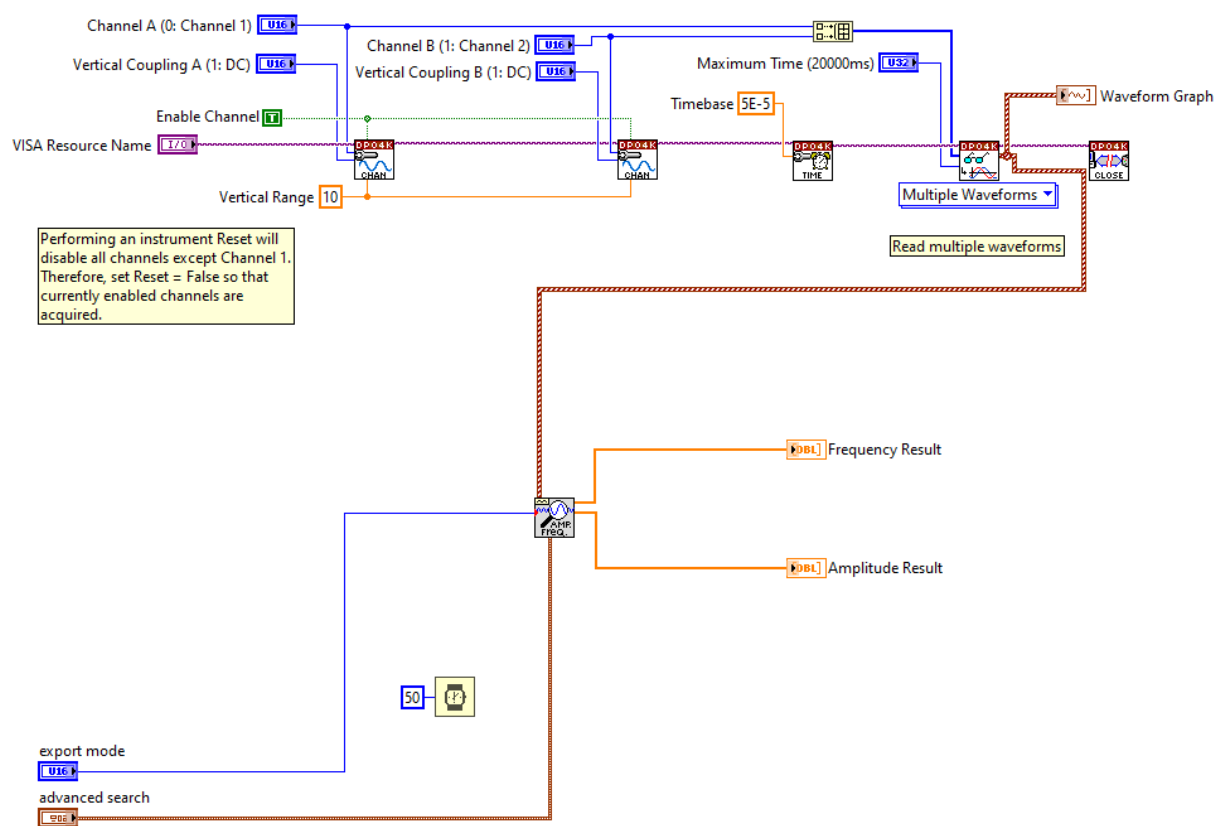


Рисунок 15 – Финальная версия программы - блок-схема

Финальный вид моей программы после добавления вышеуказанных функций (а также идущие вместе с ними дополнительные функции, позволяющие определить среднюю частоту), готовой к проведению эксперимента показан на рис. 15 (блок-схема) и на рис. 16 (лицевая панель).

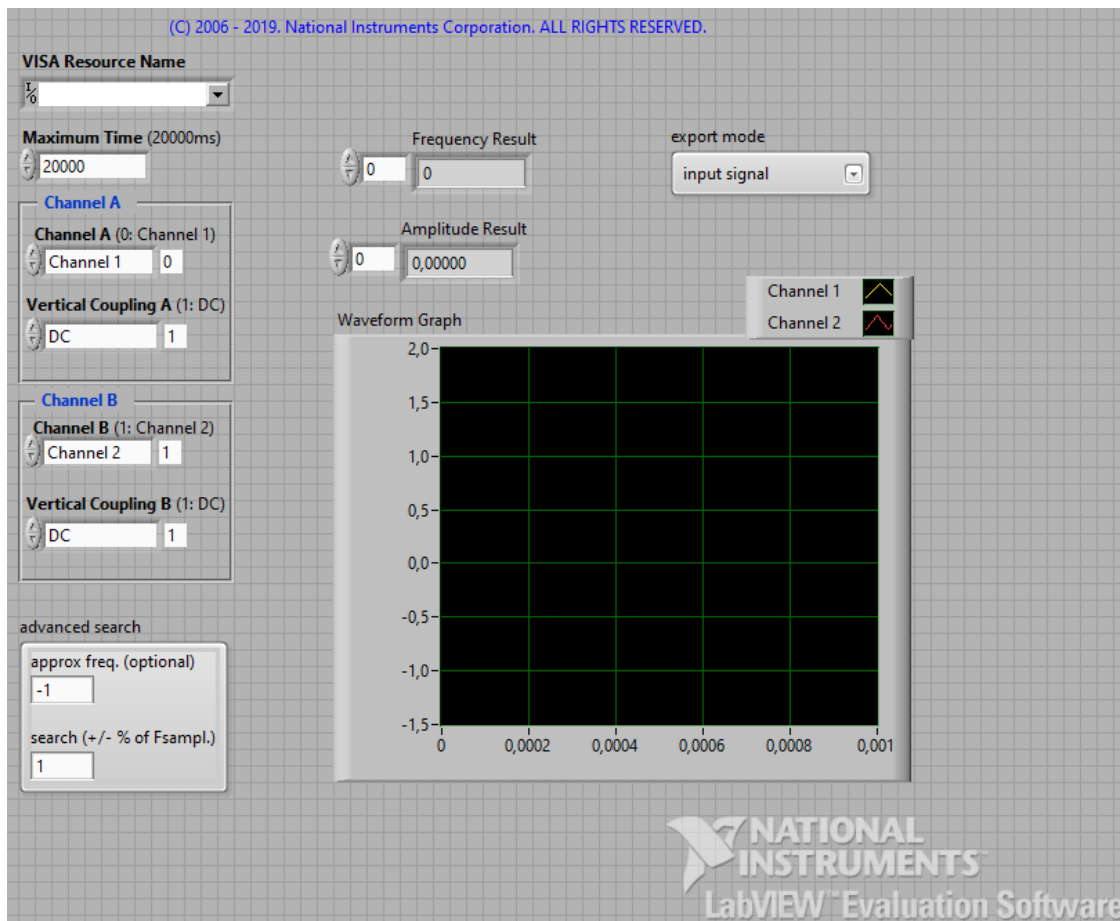


Рисунок 16 – Финальная версия программы - лицевая панель

3 Проверка программы

Теперь стояла задача проверить правильность работы программы. Для этого была собрана простейшая электрическая цепь, состоящая из источника напряжения, самого детектора sTGC и осциллографа. Вывод данных с осциллографа в мою программу LabView осуществлялся путем подключения осциллографа к компьютеру USB-кабелем. В идеале должны были получиться одинаковые картинки как на самом экране осциллографа, так и внутри программы в LabView (см. рис. 17).

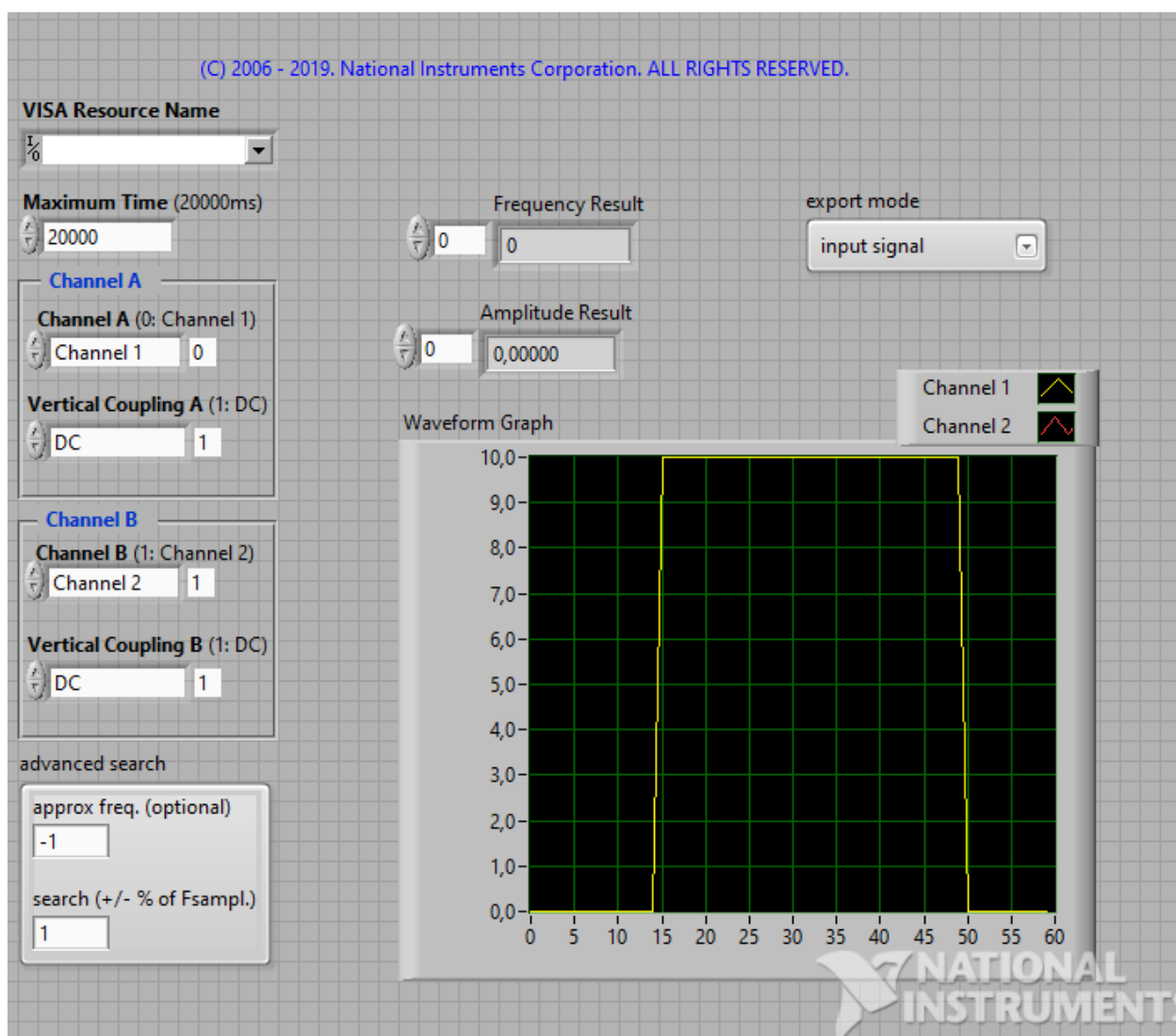


Рисунок 17 – Снятие показаний с sTGC

4 Дальнейшая работа

4.1 Симуляция сигнала

К сожалению, дальнейшую работу по обнаружению дефектов продолжить не удалось вследствие пандемии коронавируса. Соответственно доступа к детектору sTGC и осциллографу был прекращен, и пришлось модернизировать свою программу, чтобы симулировать входной сигнал в программу с осциллографа. Для этого с помощью различных встроенных в LabView элементов был сделан ручной ввод четырех параметров симулированного сигнала: количества точек графика, амплитуды, фазы (задержки) и длину сигнала. Блок-схему программы можно увидеть на рис. 18, а получившийся симулированный сигнал - на рис. 19 (можно заметить сходство симулированного сигнала с реальным на рис.16).

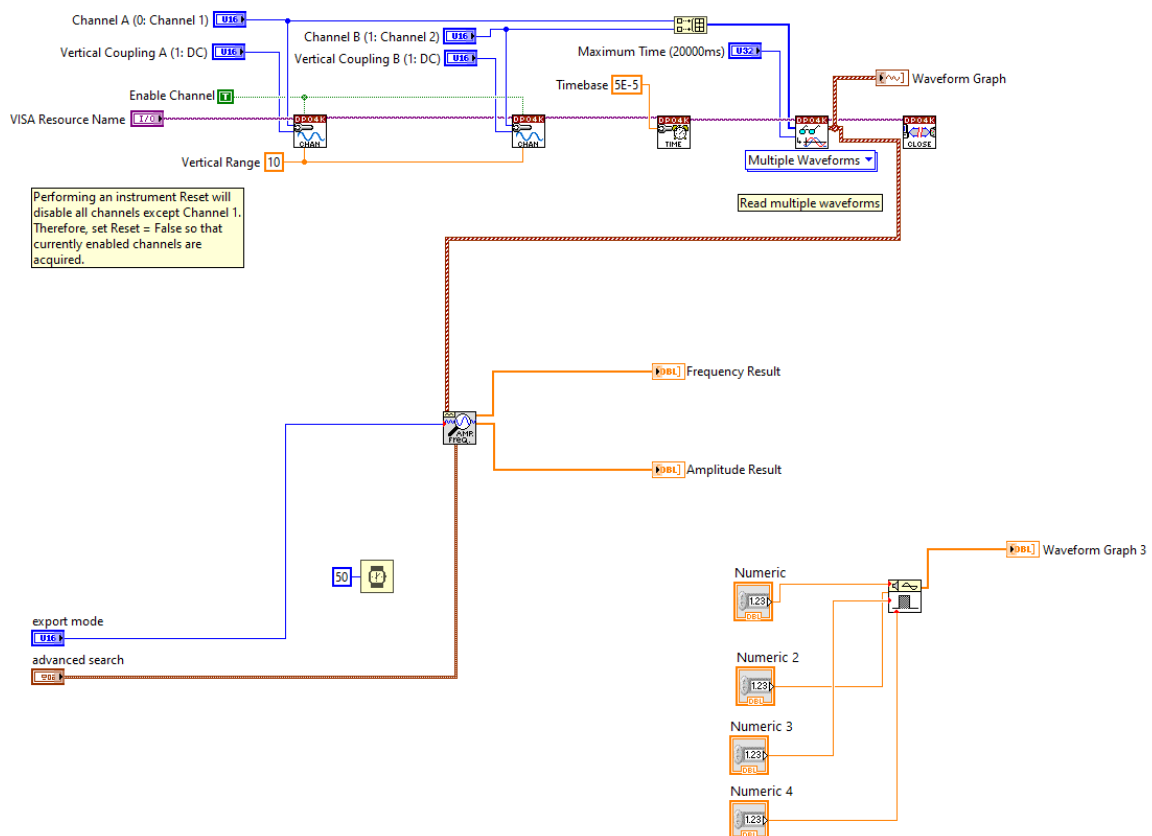


Рисунок 18 – Блок-схема с симулированным сигналом

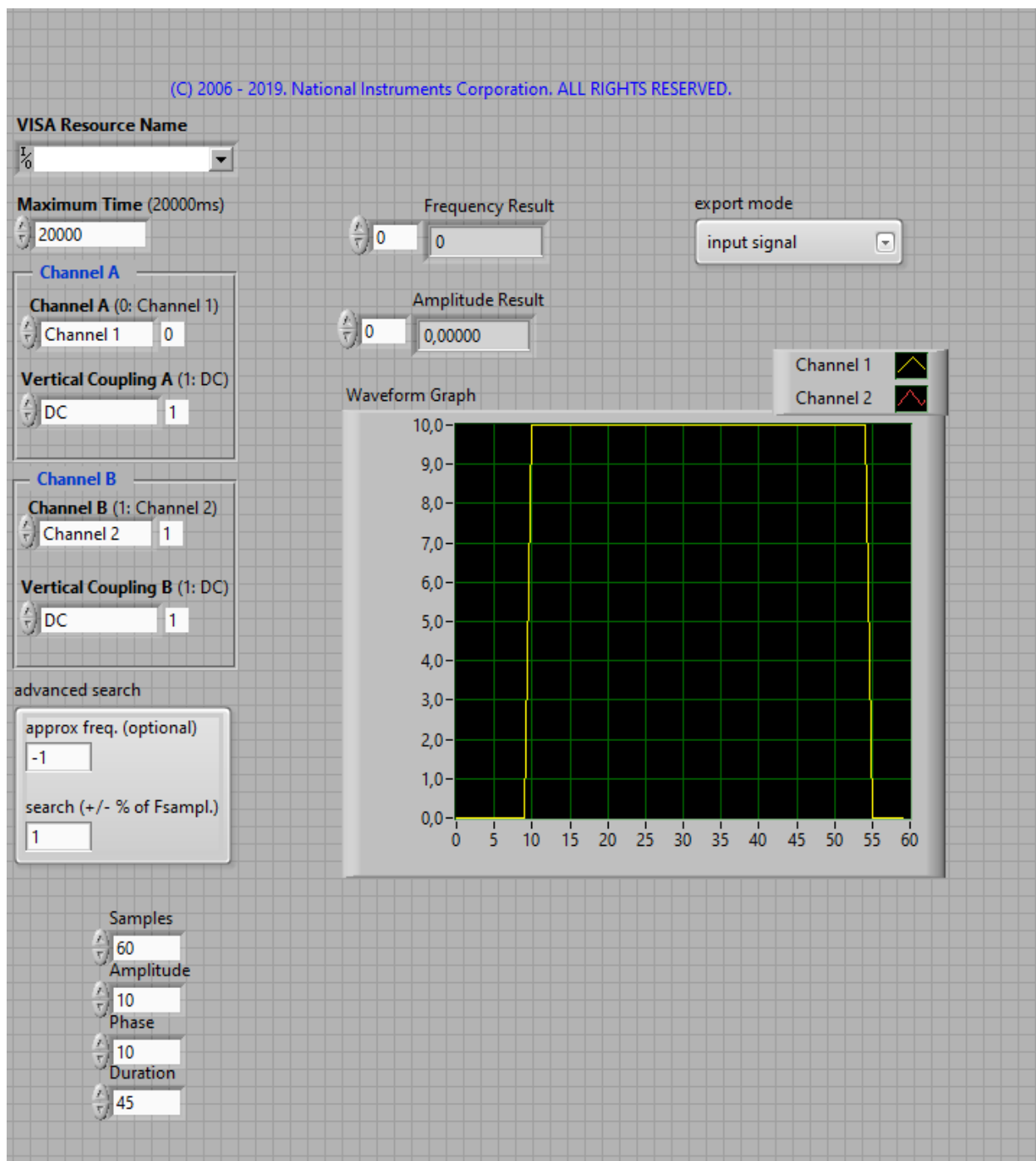


Рисунок 19 – Лицевая панель с симулированным сигналом

4.2 Попытка соединения LabView и ROOT

Вследствие того факта, что дальнейшая работа по поиску дефектов детектора sTGC невозможна без доступа к нему, мною было взято следующее задание, которое тоже должно помочь в поиске дефектов. Это задание заключалось в том, что было необходимо автоматизировать вывод выходных данных из LabView (имеется ввиду после ввода данных с осциллографа в LabView (или с аналогичного симулированного сигнала)) в ROOT. Вся работа изначально производилась на ОС Windows, однако вследствие технических особенностей программы ROOT было принято решение перенести дальнейшую работу на Mac OS.

Прежде всего был произведен поиск решения похожей задачи на различных форумах и сайтах, посвященных LabView и ROOT. Таким образом были найдены некоторые разработчики, которые уже приступали к решению данной задачи, но, судя по всему, не дошли до окончательного решения. Соответственно, было решено разбираться в вопросе собственноручно.

Прежде всего была найдена информация, как можно делать вывод данных, например, точек на графике, в сторонний файл в папку с названием "LabView output". Это было сделать несложно, результат выполнения можно увидеть на рис. 21 (блок-схема моей программы с использованием вывода данных в сторонний файл) и на рис. 20 (выведенная информация о точках графика в блокнот).

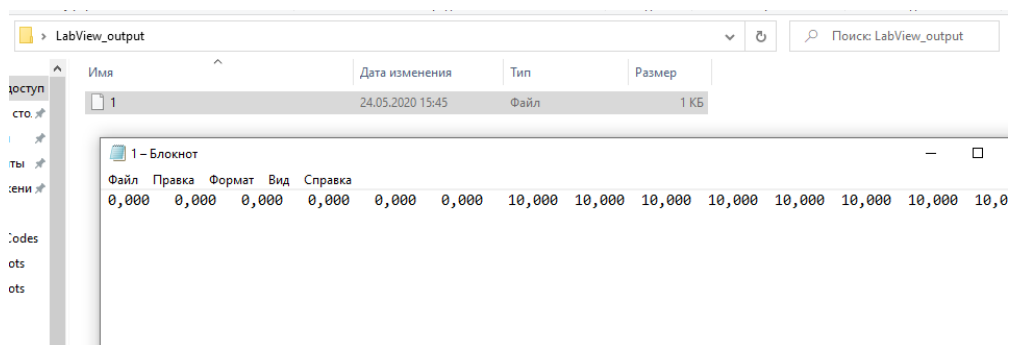


Рисунок 20 – Вывод данных в блокнот

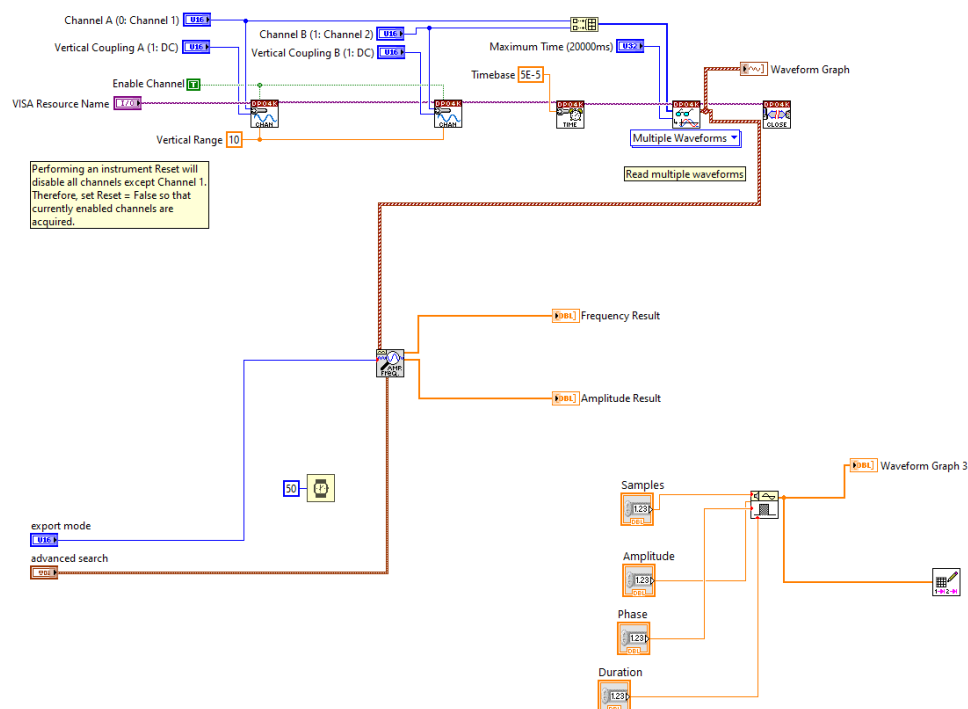


Рисунок 21 – Блок-схема вывода в сторонний файл

Как видно из рис. 20 работа пока еще проводится на ОС Windows. Это было сделано из-за того, что на текущий момент удобнее работать на Windows, т.к. стоит цель вывода файла в нужном формате. Только потом надо будет пытаться считать этот файл ROOT'ом. Иными словами, пока не рассматривается вопрос автоматизации процесса.

Спустя некоторое время удалось .txt-файл с числами, выведенными LabView подать в ROOT и с помощью ROOT-скрипта построить график, который полностью совпал с тем графиком, что рисовал сам Labview (см. рис. 22).

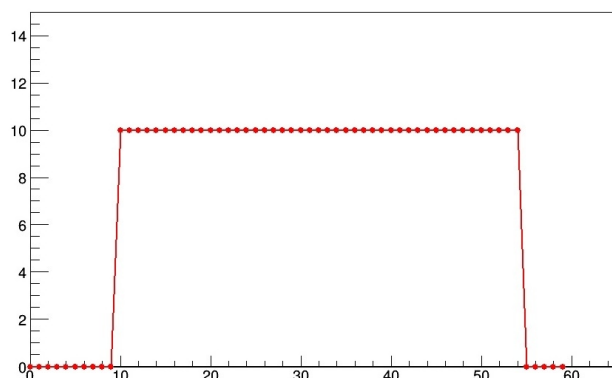


Рисунок 22 – Построение выходного импульса в ROOT

5 Вывод

Итак, была создана программа на NI LabView 2018, считывающая данные с осциллографа Tektronix MDO3024 и имеющая возможность расширения функционала, превышающий функционал осциллографа. Также была создана симуляция входного в программу сигнала, однако сам аналоговый тест не был завершен вследствие пандемии. Написан скрипт на ROOT, который считывает данные из текстового файла, который пишется программой, написанной с помощью LabView, а также строится соответствующий график, но автоматизация этого процесса еще не завершена.

Список литературы

1. *Majewski S., Charpak G.* EP Internal Report 82-02 : tech. rep. / CERN. — 1982.
2. A thin multiwire chamber operating in the high multiplication mode / S. Majewski [и др.] // 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. Roth, I., Klier, A. and Duchovni, E. "*Testing sTGC with small angle wire edges for the ATLAS new small wheel Muon detector upgrade*" 2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA). т. 6. — ANIMMA, 2015.
6. *Sekhniaidze G.* Construction and performance of the sTGC and MicroMegas chambers for ATLAS NSW upgrade // JINST. — 2016. — с. 13.
7. Development of scanning technique for sTGC detectors production quality control / P. Teterin [и др.] // Conf. Ser. 675(1). т. 012015. — Journal of Physics, 2016.
8. The X-ray scanning technique application for sTGC detectors quality control / P. Teterin [и др.] // JINST. — 2020. — с. 10.
9. *Teterin P., Smakhtin V.* Cathode boards defects detection method for sTGC chambers // JINST. — 2020. — с. 8.