



МОНИТОР ЭНЕРГИИ ПУЧКА КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-2000

Монитор Энергии Пучка (МЭП) коллайдера ВЭПП-2000 был запущен весной 2012 года. С тех пор он используется во всех экспериментах на детекторах СНД и КМД-3. МЭП предназначен для измерения абсолютного значения средней энергии электронов и их энергетического разброса. Целью создания настоящего документа является полное техническое описание МЭП.

Основные принципы и алгоритмы работы Монитора Энергии Пучка (МЭП) описаны в публикациях [1, 2, 3]. Для настройки системы необходимо знать формулу, определяющую максимальную энергию обратно-рассеянных лазерных фотонов с длиной волны λ_0 в зависимости от энергии электронов $\varepsilon_0 = \gamma mc^2$ и энергии лазерных фотонов $\omega_0 = hc/\lambda_0$:

$$\omega_{\max} = \varepsilon_0 \frac{\kappa}{1 + \kappa}, \text{ где } \kappa = \frac{4\omega_0\varepsilon_0}{(mc^2)^2}. \quad (1)$$

Оглавление

Глава 1. Оборудование

§ 1.1. Лазеры и оптическая система	5
1.1.1. Инфракрасный СО лазер PL-3	5
1.1.2. Волоконный лазер	10
§ 1.2. HPGe - детектор и криостат	11
§ 1.3. Спектрометрическая станция CAEN-DT5780	12
§ 1.4. Генератор импульсов точной амплитуды BNC PB-5	13
§ 1.5. Система шаговых двигателей	14
§ 1.6. Система контроля аналоговых параметров	14

Глава 2. Программное обеспечение

§ 2.1. Компьютерная среда системы управления	15
§ 2.2. Монитор состояния комплекса	16
§ 2.3. Набор данных	17
2.3.1. Вкладка «High Voltage»	19
2.3.2. Вкладка «Oscilloscope»	20
2.3.3. Вкладка «Acquisition»	21
2.3.4. Зачем нужны три порога?	23
§ 2.4. Управление нацеливанием	23
§ 2.5. Управление генератором импульсов	25
§ 2.6. Система сбора данных: резюме	26
§ 2.7. Обработка данных	27
2.7.1. Калибровка шкалы	28
2.7.2. Измерение энергии	29
2.7.3. Просмотр результатов измерений	30

Глава 3. Инструкции

§ 3.1. Поддержание системы в оптимальном состоянии	31
§ 3.2. Действия при смене энергии пучка	31

Литература	32
------------------	----

Глава 1. Оборудование

Приборы и оборудование МЭП физически локализованы в трех местах. В подвале коллайдера ВЭПП-2000 расположены основная часть лазерно-оптической системы и электроника системы сбора данных. В зале ВЭПП-2000 находятся: HPGe - детектор с криостатом, управляемый щелевой коллиматор из вольфрама и система ввода лазерного излучения в вакуумную камеру коллайдера. В пультной детектора СНД оборудован пульт управления. Схема размещения оборудования представлена на Рис. 1.1:

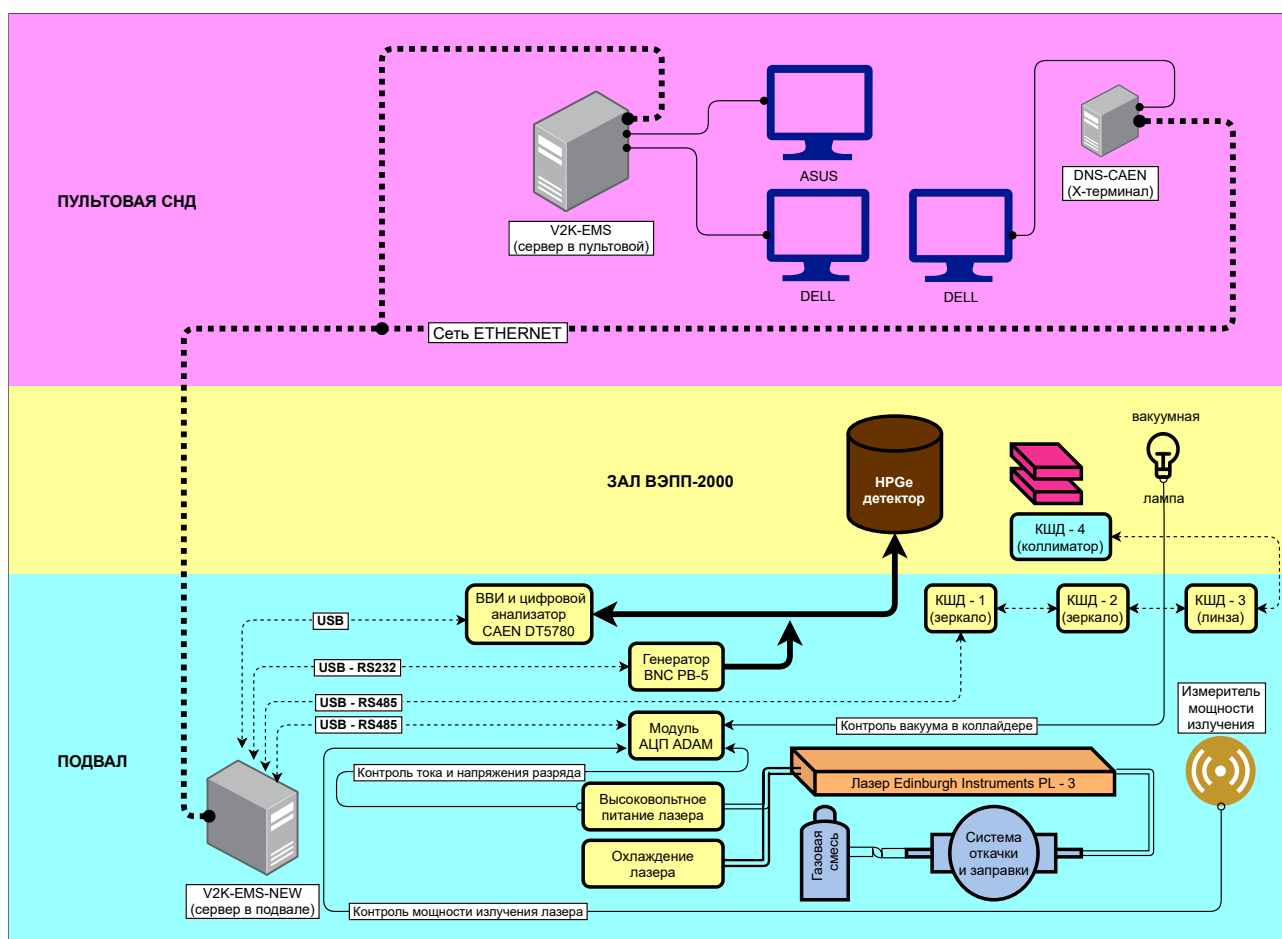


Рис. 1.1. Схема расположения оборудования. При работе коллайдера на энергии менее 500 МэВ перед (выключенным) лазером PL-3 устанавливается выходной коллиматор волоконного лазера.

§ 1.1. Лазеры и оптическая система

1.1.1 Инфракрасный СО лазер PL-3

Измерения длин волн лазерной генерации

Для работы с энергиями пучка выше 500 МэВ используется СО лазер. В январе 2013 года были проведены измерения длин волн с помощью измерителя длины волны WS IR-III. Фирма-изготовитель www.angstrom-ltd.ru находится в новосибирском техно-парке, ребята нам любезно помогли.

N	изм.	корр.	СПЛ	ТФВ	линия	переход	комментарий
150	5176,782	5176,809	5176,81	5176,806	P 20	6→5	
155	5188,440	5188,466	5188,48	5188,460	P 21	6→5	
169	5222,525	5222,555	5222,56	5222,555	P 18	7→6	
174	5234,110	5234,140	5234,20	5234,145	P 19	7→6	
177	5245,840		5245,90	5245,874	P 20	7→6	уширенная
181	5257,681		5257,76	5257,745	P 21	7→6	уширенная
187	5269,684	5269,713	5269,66	5269,659	P 16	8→7	уширенная
193	5281,145	5281,175	5281,18	5281,183	P 17	8→7	
198	5292,771	5292,802	5292,84	5292,846	P 18	8→7	уширенная
201	5304,613	5304,645	5304,67	5304,651	P 19	8→7	
206	5316,589	5316,613	5316,63	5316,600	P 20	8→7	
246	5413,760	5414,586	5413,85	5413,837	P 22	9→8	уширенная
250*	5426,434	5426,468	5426,48	5426,463	P 23	9→8	$\lambda_0 = 5426.47 \pm 0.01$ мкм
254	5439,197	5439,234	5439,26	5439,219	P 24	9→8	
304	5565,806		5565,03	5565,057	P 22	11→10	
309	5578,961	5578,999	5578,18	5578,179	P 23	11→10	уширенная
316	5591,496	5591,534	5591,47	5591,463	P 24	11→10	уширенная
320	5604,281	5604,317	5604,36	5604,325	P 19	12→11	
325	5617,178	5617,220	5617,25	5617,221	P 20	12→11	
331	5632,942	5632,982	5632,98	5632,975	P 21	13→12	

Таблица 1.1. Результаты измерения длин волн. Первый столбец - отсчет с рукоятки дифракционной решётки. Второй – результат до коррекции, здесь и далее длина волны приведена в микрометрах. Третий столбец – после коррекции. Четвёртый – данные из Справочника по Лазерам (1978). Пятый – данные из книги Физические Величины (1991).

В основном мы работаем на самой мощной линии этого лазера, которая помечена в таблице звёздочкой. В результате проведенных измерений мы считаем, что длина волны $\lambda_0 = 5426.47 \pm 0.01$ мкм известна с относительной точностью 2 ppm. Важно отметить, что максимум мощности генерации (около паспортного значения в 1.5 Вт), в зависимости от теплового режима установки, наблюдается при юстировке винта дифракционной решетки в пределах от 248 до 250 делений нониуса. Как видно из таблицы, выход за пределы этого диапазона может привести к нежелательной генерации другой спектральной линии. Также было замечено, что заводская калибровка решетки, приведенная в паспорте лазера, неверна и в среднем показания нониуса заводской калибровки оказывается на шесть делений шкалы выше результатов наших измерений.

Газовая смесь для заполнения лазера.

Газовую смесь для СО лазера мы заказывали в ООО «Чистые газы», расположенное в районе пединститута. В инструкции производителя к лазеру указаны требования на максимально допустимые уровни примесей, которым данный поставщик удовлетворяет. На Рис. 1.2 приведен счёт на смесь от последнего заказа в 2014 году.

ООО «Чистые газы»

Адрес: 630126, Новосибирск, Кленовая, д. 10/1, тел.: факс:(383) 244-07-02; Эл. адрес: inadeev@mail.ru

Образец заполнения платежного поручения

ИНН 5402453440	КПП 540501001		
Получатель		Сч. №	40702810400010654501
Общество с ограниченной ответственностью "Чистые газы"		БИК	045004839
Банк получателя		Сч. №	30101810550040000839
Новосибирский филиал "НОМОС-БАНКА" (ОАО)			
г.Новосибирск			

СЧЕТ № 289 от 20 Мая 2014 г.

Платательщик: ИЯФ СО РАН
Грузополучатель: ИЯФ СО РАН

№	Наименование товара	Единица измерения	Количество	Цена	Сумма
1	Газовая смесь СО-N ₂ -Хе-Не 2,5%-18,5%-3,5%-75,5% в алюмин. баллоне 2л.	шт	1	32600-00	32600-00
Итого:					32600-00
Итого НДС:					4972-88
Всего к оплате:					32600-00

Всего наименований 1, на сумму 32'600.00
Тридцать две тысячи шестьсот рублей 00 копеек

Руководитель предприятия _____ (Надеев И.В.)

Главный бухгалтер _____ (Ефремова Л.В.)



Рис. 1.2. Счёт на газовую смесь.

Подготовка лазера к работе

Система заполнения лазера газовой смесью была изготовлена усилиями лаб. 1-4, разработчик – Евгений Пята. С 2014 года используется второй вариант системы, так как первый не обладал достаточной герметичностью. По словам представителя производителей лазера (Edinburgh Instruments), в процессе длительной эксплуатации лазера необходимость замены смеси возникает все реже и реже. Так вот, с первым вариантом системы такой тенденции не наблюдалось и весьма вероятно, что в результате лазерная трубка была загрязнена нежелательными примесями.

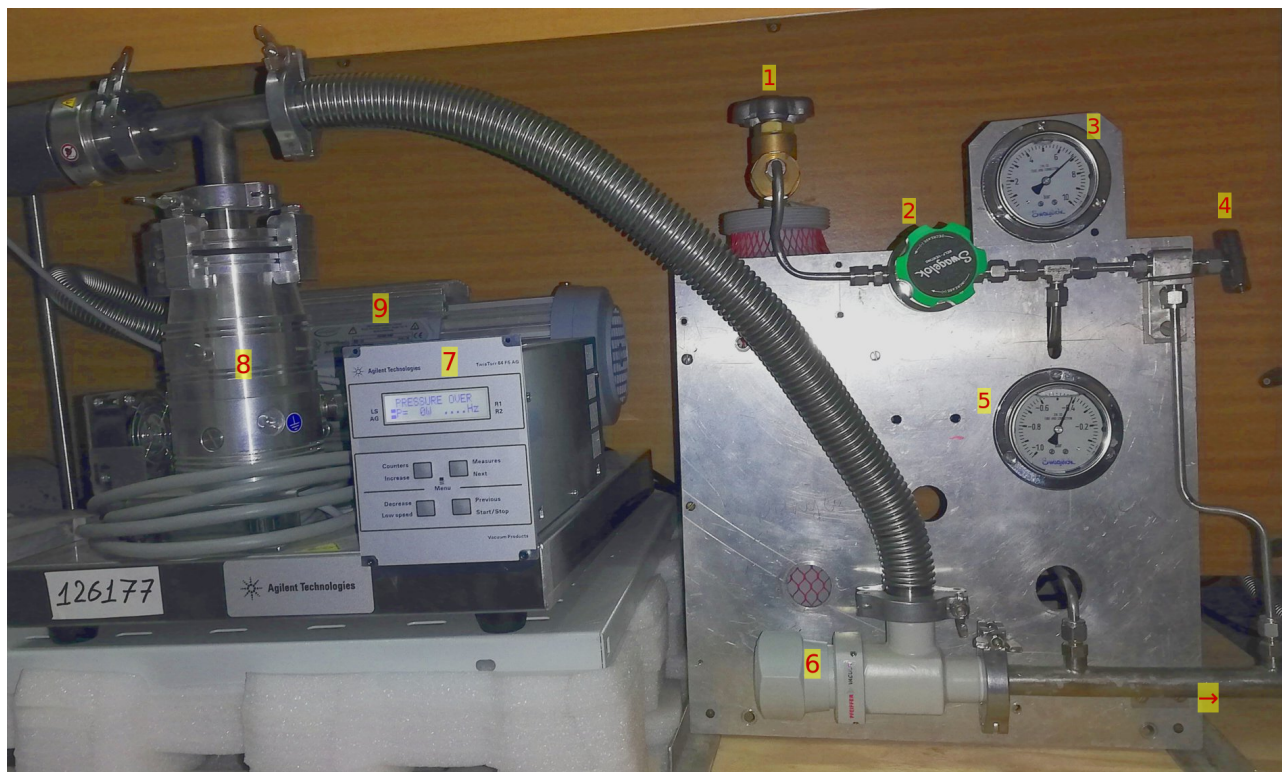


Рис. 1.3. Система для смены лазерной смеси. Цифрами обозначены:

- 1 – вентиль баллона с газовой смесью,
- 2 – понижающий давление редуктор,
- 3 – манометр давления после редуктора,
- 4 – игольчатый кран тонкой регулировки,
- 5 – манометр-вакууметр давления после крана,
- 6 – вакуумный кран к насосу,
- 7 – блок управления турбомолекулярным насосом,
- 8 – турбомолекулярный насос,
- 9 – форвакуумный насос.

Стрелкой указано направление вакуумного канала к лазеру.

Ниже приведена процедура подготовки к работе и включения лазера «с нуля» после длительной остановки.

- 1) В бак системы охлаждения залита смесь дистиллированной воды и автомобильного антифриза. Проверить наличие раствора, открутив крышку заливной горловины. При необходимости долить воды и антифриза (емкости стоят в железном шкафу).

- 2) Включить систему жидкостного охлаждения лазера. Рабочая температура -10°C , охлаждение до рабочей температуры занимает около получаса.
- 3) Включить форвакуумный насос (тумблер на задней стенке), затем турбомолекулярный с помощью блока № 7 на Рис. 1.3. Инструкция к блоку есть в шкафу, но управление в целом интуитивно понятно. Нужно выбрать режим индикации, в котором на экране отображается давление.
- 4) Включить источник питания лазера (Рис. 1.4), повернув ключ в положение ON. Через пару секунд на нем загорится зеленая лампочка INTERLOCK.
- 5) Установить измеритель мощности лазерного излучения прямо перед выходным окном лазерного резонатора.
- 6) Проверить, что охлаждающая жидкость охладилась до заданной температуры ($\simeq -10^{\circ}\text{C}$). Проверить, что барабан управления дифракционной решеткой находится в пределах 248-250 единиц шкалы.
- 7) Включить высокое напряжение, нажав кнопку «HV ON». Проверить (установить) ток разряда в 11 мА.



Рис. 1.4. Слева – источник питания лазера. Справа – вакуумный кран на корпусе лазера.

- 8) Измерить мощность лазерного излучения, при этом можно покрутить барабан управления дифракционной решёткой в пределах 248 – 250 делений шкалы. Торопиться не надо, выход на стабильный режим обычно занимает около часа.

Если максимальная мощность, которую удалось получить, менее 1.2 Вт, нужно провести **процедуру перезаправки газовой смеси** в газоразрядной трубке:

- 1) Выключить высокое напряжение, нажав кнопку «HV OFF».
- 2) Кран № 4 на Рис. 1.3 должен быть закрыт. Открыть (последовательно и медленно) вакуумный кран (№ 6 на Рис. 1.3) и кран на лазере (Рис. 1.4). Дождаться откачки до уровня 10^{-6} мбар (пойти погулять на пол-часа). Манометр № 5 на Рис. 1.3 должен показывать что-то около -1 атм, хотя иногда стрелка уходит ниже. На задней стенке манометра есть кнопка для выравнивания давления, которая, впрочем, работает довольно странно.
- 3) Установить измеритель мощности лазерного излучения прямо перед выходным окном лазерного резонатора.

- 4) Закрывать вакуумный кран № 6 на Рис. 1.3. Давление на манометре № 3 ограничено редуктором № 2 на уровне 5-6 атм. Без необходимости редуктор регулировать не надо. Если давление на манометре упало, необходимо открыть и закрыть вентиль на баллоне с газовой смесью (№ 1 на Рис. 1.3), т. е. добавить новую порцию смеси в объём между краном на баллоне № 1 и игольчатым краном № 4 на Рис. 1.3.
- 5) Паспортное рабочее давление газовой смеси в лазере – 12 мбар, т. е. около 1 деления шкалы манометра № 5 (Рис. 1.3). В связи с этим, манометр этот практически бесполезен. Поэтому процедура такая: вначале, коротким открытием крана № 4 (Рис. 1.3), нужно напустить в лазер небольшую порцию газовой смеси, так, чтобы давление было меньше рабочего. После этого нажать кнопку «HV ON» на источнике питания лазера, чтобы зажечь газовый разряд в трубке. Проверить ток разряда, должно быть 11 мА. Затем, слегка приоткрыв кран № 4 (Рис. 1.3), наблюдать за показаниями измерителя мощности лазерного излучения. В какой-то момент появится генерация и мощность начнёт возрастать. Продолжая медленно добавлять газ, нужно закрыть кран № 4 как только мощность расти перестанет.
- 6) Далее можно пошевелить барабан управления дифракционной решеткой в пределах 248 – 250 единиц шкалы с целью поиска максимума мощности излучения. Обычно это где-то в районе 1.2 – 1.4 Вт. Если всё получилось, закрываем кран на лазере. Если остановиться вовремя не удалось, можно скачать насосом давление, понизив мощность излучения, и попробовать еще раз найти максимум. После этого внутри лазера идёт процесс поиска внутреннего равновесия, и мощность излучения в течение примерно часа нарастает, при этом оптимальное положение решетки смещается в сторону меньших значений шкалы. Если перед процедурой заполнения лазер успешно функционировал, барабан решетки можно и вовсе не трогать, и где-то через час после наполнения система вернётся в стабильное состояние.
- 7) Для экономии ресурса турбомолекулярного насоса можно перевести его с максимальной мощности (1350 об./с) на пониженные обороты (1100 об./с) нажатием кнопки «Decrease Low Speed» на блоке управления (№ 7 на Рис. 1.3).

Ниже приведены общие рекомендации по эксплуатации СО лазера на основе опыта весеннего захода 2021 года.

- После процедуры перезарядки мощность излучения составляет около 1.5 Вт.
- С течением времени мощность падает, перезарядку газовой смесью мы делаем если мощность упала до уровня около 1 Вт.
- Для перезарядки выполняем вышеописанную процедуру.
- В среднем лазер не требует перезарядки в течение 2-х недель непрерывной работы, причём этот интервал имеет тенденцию увеличиваться.
- Иногда в лазере происходят какие-то загадочные быстрые процессы, приводящие к резкому падению мощности.
- Удаленный непрерывный контроль за работой лазера осуществляется путём измерения мощности газового разряда.

1.1.2 Волоконный лазер

В данном разделе приведены сведения о волоконном лазере, который используется с 2016 года при работе ВЭПП-2000 на энергиях ниже 500 МэВ. На Рис. 1.5 приведен спектр излучения лазера, измеренный производителем (ООО «Инверсия-Файбер», проспект Академика Коптюга 1а, тел. +7 (383) 332-82-54).

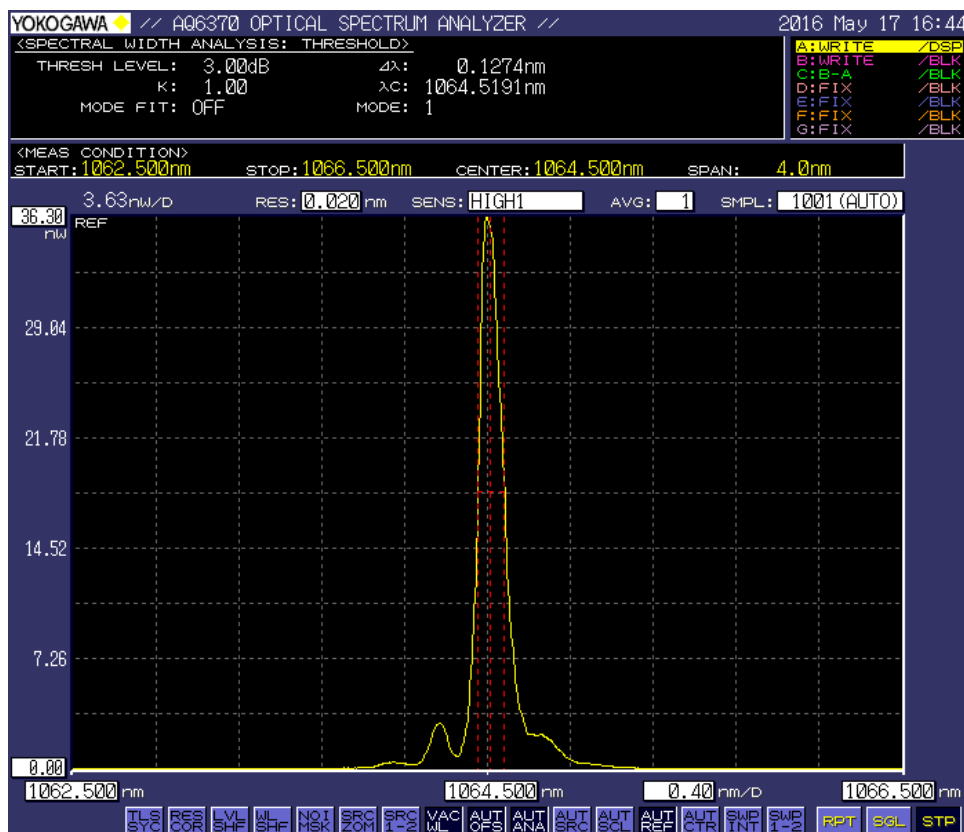


Рис. 1.5. Спектр, измеренный производителем 17 мая 2016 года. Прибор не калиброван.

В 2016 году мы провели собственные измерения средней длины волны генерации волоконного лазера с помощью прибора COHERENT WaveMaster (хранится в железном шкафу в подвале). Прибор имеет встроенную калибровку, которая была проверена на He-Ne лазере. Табличное значение длины волны в вакууме $\lambda_{\text{HeNe}} = 632.9908$ нм, WaveMaster измерил $\lambda_{\text{HeNe}} = 632.989$ нм. Для волоконного лазера длина волны генерации немного зависит от мощности излучения. Так, при мощности в 1 Вт измеренная длина волны в вакууме составила $\lambda_0 = 1064.642$ нм, а при максимальной мощности в 10 Вт $\lambda_0 = 1064.960$ нм.

Эффект объясняется так (цитируем производителя): «В волоконной брэгговской решётке так или иначе присутствуют потери, вызванные фотомодификацией, поэтому решётка греется. Хотя мы решётку и держим в термостате, от уплывания длины волны так просто не избавиться. Греется именно сердцевина 6 мкм, дальше стеклянная оболочка 125 мкм и полимер 250 мкм, т. е. до самой решётки почти 250 мкм материала с очень низкой теплопроводностью. Для оценки смещение на 1 нм соответствует нагреву на 100°C, т. е. в нашем случае решётка нагрелась на $\simeq 3^\circ\text{C}$ при увеличении мощности от 1 до 10 Вт. Такую разницу в температуре вполне можно допустить, если принять во внимание огромную разницу в размерах сердцевины и оболочки.»

§ 1.2. HPGe - детектор и криостат

В МЭП используется коаксиальный HPGe детектор n-типа (производитель ORTEC, США) в неразборном азотном криостате. Паспорт детектора хранится в шкафу в пультовой СНД. Детектор установлен в зале коллайдера ВЭПП-2000 (см. Рис. 1.1). Вокруг детектора установлена радиационная защита, в которой имеются отверстия для пучка гамма-квантов и для установки кассеты с калибровочными источниками. В качестве калибровочных источников используются изотопы ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{228}Th . В процессе работы МЭП кассета с источниками всегда установлена вблизи от детектора. В нерабочие периоды кассета хранится на нижней полке железного шкафа в подвале рядом с лазерами.

Для залива азота в 40-литровый дьюар криостата используется 50-литровый переносной дьюар. В переносной дьюар наливается жидкий азот, после чего вставляется трубка с фиксирующей пробкой системы перелива. Из-за естественного нагрева и испарения азота давление увеличивается до уровня порядка одной избыточной атмосферы, дальнейший рост давления предотвращается специальным клапаном. В системе перелива есть кран для слива жидкого азота со дна дьюара в рабочий дьюар, а также кран для сброса давления азотных паров, который нужно всегда открывать перед тем как вытаскивать из дьюара систему перелива. При первоначальной заправке пустого и теплого рабочего дьюара расходуется весь азот в переносном дьюаре. В процессе эксплуатации HPGe детектора доливка производится раз в неделю, переносного дьюара хватает на две-три заливки, таким образом набирать азот в переносной дьюар приходится раз в две-три недели.

Непосредственно под HPGe кристаллом расположен зарядо-чувствительный усилитель, транзисторы первого каскада усиления которого находятся внутри криостата для снижения уровня теплового шума. Из корпуса ЗЧУ выходят кабели с разъемами:

- два аналоговых выхода BNC «Output 1» и «Output 2»,
- вход с разъемом DB-15 низковольтного питания предусилителя,
- вход высокого напряжения BNC-HV (для детектора n-типа нужен источник положительной полярности),
- вход «Test» BNC для сигнала от генератора,
- выход «HV Inhibit» BNC для принудительного отключения высокого напряжения в случае нагрева детектора.

Разъемы имеют маркировку и подключены к соответствующим кабелям, которые уходят вниз в подвал и подключаются к оборудованию, расположенному там.

§ 1.3. Спектрометрическая станция CAEN-DT5780

Модуль DT5780 представляет собой компактную настольную систему, состоящую из двух независимых 16-разрядных цифровых анализаторов спектра и двух источников высокого напряжения. В нашем случае он подключен USB-кабелем к серверу V2K-ENS-NEW, расположенному в подвале (см. Рис. 1.1).



Рис. 1.6. Спектрометрическая станция CAEN-DT5780 (передняя панель).



Рис. 1.7. Спектрометрическая станция CAEN-DT5780 (задняя панель). При поступлении сигнала «HV Inhibit» высокое напряжение аппаратно выключается и светодиод «INHIBIT» загорается красным цветом.

§ 1.4. Генератор импульсов точной амплитуды BNC PB-5

Генератор импульсов точной амплитуды **PB-5** используется для калибровки интегральной нелинейности шкалы спектрометрического тракта. Выход генератора подключается ко входу «Test» HPGe-детектора. Управление генератором осуществляется программно через интерфейс RS-232 (см. Рис. 1.1). Генератор установлен в крейт стандарта NIM, питание подается при включении крейта. После включения генератора нужно нажать на рукоятку «PUSH TO SELECT», затем, вращая её, перейти в меню «OPERATING MODE» и выбрать опцию «REMOTE».



Рис. 1.8. Генератор импульсов точной амплитуды Berkeley Nucleonics PB-5.

§ 1.5. Система шаговых двигателей

В МЭП используются четыре шаговых двигателя (см. Рис. 1.1). Два двигателя (№ 1 и № 2) вращают зеркало для нацеливания лазерным лучом с целью попадания в электронный пучок. Двигатель № 3 отвечает за продольное перемещение одной из двух линз в системе фокусировки лазерного луча. Контроллеры КШД-485 первых трёх двигателей подключены к блоку питания, закрепленному на оптической скамье в подвале. Двигатель № 4 передвигает вверх-вниз щелевой коллиматор, установленный перед HPCe детектором в зале ВЭПП-2000. Питание на контроллер подается от отдельного блока, закрепленного на подставке под детектор. Все четыре двигателя подключены к одной шине управления с интерфейсом RS-485.

ВАЖНО! Если не включить любой из двух источников питания – система управления ШД не работает!

§ 1.6. Система контроля аналоговых параметров

Модуль ADAM-4018+ (см. Рис. 1.1) используется для

- измерения тока и напряжения газового разряда в лазерной трубке,
- измерения мощности лазерного излучения и
- контроля давления в вакуумной камере коллайдера ВЭПП-2000.

Модуль опрашивается по выделенному каналу интерфейса RS-485.

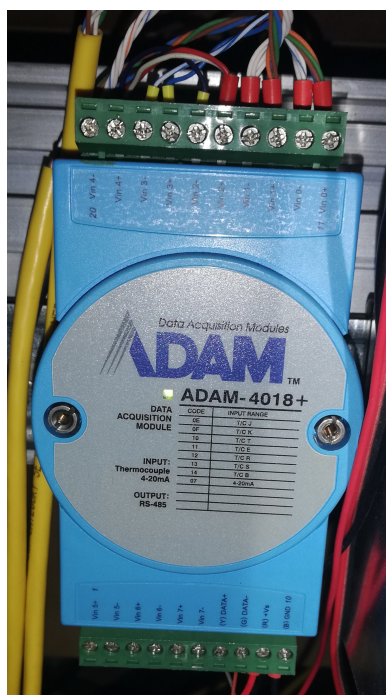


Рис. 1.9. Блок АЦП для контроля напряжений.

Глава 2. Программное обеспечение

§ 2.1. Компьютерная среда системы управления

Для автоматизации работы МЭП используются три компьютера, подключенные к локальной сети СНД. В Таблице 2.1 перечислены основные параметры этих компьютеров, их расположение показано на Рис. 1.1.

Имя	Процессор	ОЗУ	MAC-адрес	IPV4	bmips
V2K-EMS-NEW	i3-4170 @ 3.70GHz	4 GB	70:8B:CD:A8:06:C8	172.16.2.228	7382
V2K-EMS	i3-2100 @ 3.10GHz	4 GB	54:04:A6:A1:E9:A2	172.16.2.80	6186
DNS-CAEN	AMD E-350	6 GB	84:16:F9:1E:7D:F6	172.16.2.251	3200

Таблица 2.1. Компьютеры МЭП.

На компьютерах установлена ОС Linux Mint, которая поддерживается в актуальном состоянии последней стабильной версии этого дистрибутива путём установки всех рекомендуемых обновлений. На момент написания этого документа система работает на ядре 5.4.0-77-generic. Для входа используется логин **ems** с правами администратора.

Сервер V2K-EMS-NEW расположен в подвале (см. Рис. 1.1), к нему подключено всё «железо» МЭП. Генератор (Рис. 1.8), шаговые двигатели и АЦП медленного контроля (Рис. 1.9) подключены к серверу через интерфейсы USB→Serial. Для того, чтобы после перезагрузки компьютера соответствующие программы знали, к какому из интерфейсов следует обращаться, был создан файл `/etc/udev/rules.d/99-USB-SERIAL.rules` со следующим содержанием:

```
KERNEL=="ttyUSB[0-9]", KERNELS=="3-4:1.0", SYMLINK+="BNC-PB5"
KERNEL=="ttyUSB[0-9]", KERNELS=="3-9:1.0", SYMLINK+="Motors"
KERNEL=="ttyUSB[0-9]", KERNELS=="3-10:1.0", SYMLINK+="Adam"
```

Раздел `/home` файловой системы V2K-EMS-NEW монтируется по протоколу `nfs` в место назначения `/nfs/home` на сервере V2K-EMS и клиенте DNS-CAEN. И наоборот, раздел `/home` файловой системы V2K-EMS монтируется в место назначения `/nfs/home` на сервере V2K-EMS-NEW. Всё программное обеспечение МЭП написано на языке **Python** с использованием библиотек **ROOT** и **pyQt**. Далее мы приводим описание программного обеспечения МЭП в порядке разумного запуска программ при включении системы.

§ 2.2. Монитор состояния комплекса

Монитор состояния комплекса предназначен для контроля параметров установки и представляет из себя небольшой python-сценарий, текст которого (*) находится в директории `/home/ems/Acquisition` на сервере V2K-EMS-NEW. На X-терминале CAEN-DNS в пультовой СНД на рабочем столе пользователя `ems` сделана кнопка запуска «Статус ВЭПП-2000». Программа делает следующее:

- Считывает из базы данных СНД информацию о состоянии ВЭПП-2000.
- Записывает данные об энергии уставки и токе электронного пучка ВЭПП-2000 в файл `/home/ems/Acquisition/VEPP2K.status`.
- Опрашивает АЦП медленного контроля ADAM (Рис. 1.9), получая данные о токе и напряжении газового разряда в лазерной трубке, мощности лазерного излучения и уровне вакуума в камере ВЭПП-2000.
- Визуально представляет данные в виде текстовой таблицы (Рис. 2.1).
- Записывает в текстовый файл `/home/ems/Acquisition/laser.history` параметры работы лазера.

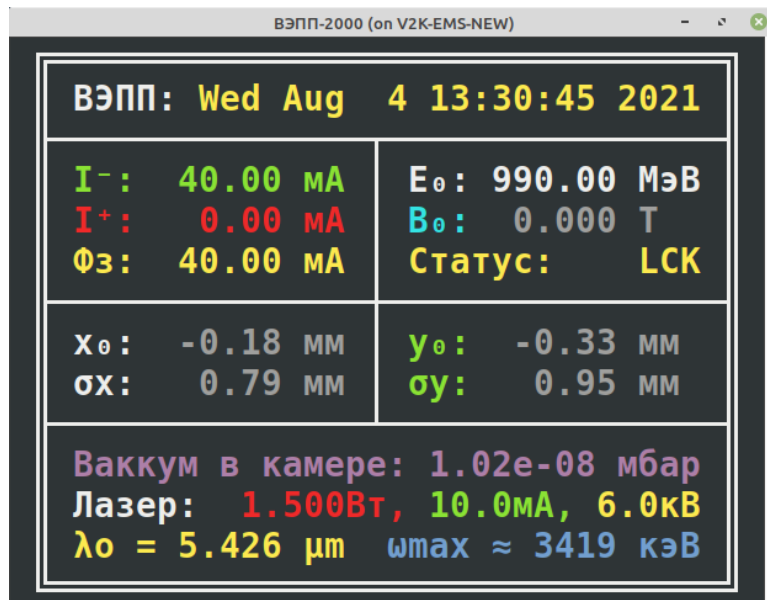


Рис. 2.1. Визуализация текущих параметров установки. Серый цвет чисел говорит о неактуальности параметров. $x_0, \sigma_x, y_0, \sigma_y$ – положения и размеры электронного пучка в магните МЗ. Параметры работы лазера появляются в таблице если он включен. λ_0 – прписанная в python-сценарии длина волны лазерного излучения. $\omega_{\max}$ – расчётная (ожидаемая) энергия края комптоновского спектра.

§ 2.3. Набор данных

Набор данных с HPGe детектора ведётся с помощью спектрометрической станции CAEN-DT5780 (Рис. 1.6, 1.7), которая подключена к серверу V2K-EMS-NEW по USB-интерфейсу (см. Рис. 1.1). ОС Linux для общения со станцией использует USB-драйвер, исходники которого находятся в `/home/ems/Acquisition/CAEN/CAENUSBdrvB-х.х.х`, где `х.х.х` – номер версии драйвера. Актуальную версию драйвера можно скачать с сайта www.caen.it. При обновлении ядра ОС драйвер необходимо пересобрать и переустановить, и это не сложно: в командной строке Linux нужно выполнить следующие команды:

- 1) `cd /home/ems/Acquisition/CAEN/CAENUSBdrvB-х.х.х`
- 2) `make clean`
- 3) `make`
- 4) `sudo make install`

Программа для работы со станцией хранится на github.com. Локальная копия репозитория находится на сервере V2K-EMS-NEW в `/home/muchnoi/GitHub/HPGe-Acquisition`. Для пользователя `ems` на эту директорию сделана и добавлена в переменную `PATH` символическая ссылка `/home/ems/bin/acquisition`. На рабочем столе X-терминала CAEN-DNS (расположен справа) сделана кнопка запуска «Acquisition», при нажатии на которую открывается `mate-terminal` в рабочей директории `/home/ems/Acquisition` на сервере DNS-CAEN-NEW. Для запуска программы в этом терминале нужно набрать команду `caen.py &`, после чего появится окно с графическим интерфейсом (Рис. 2.2).

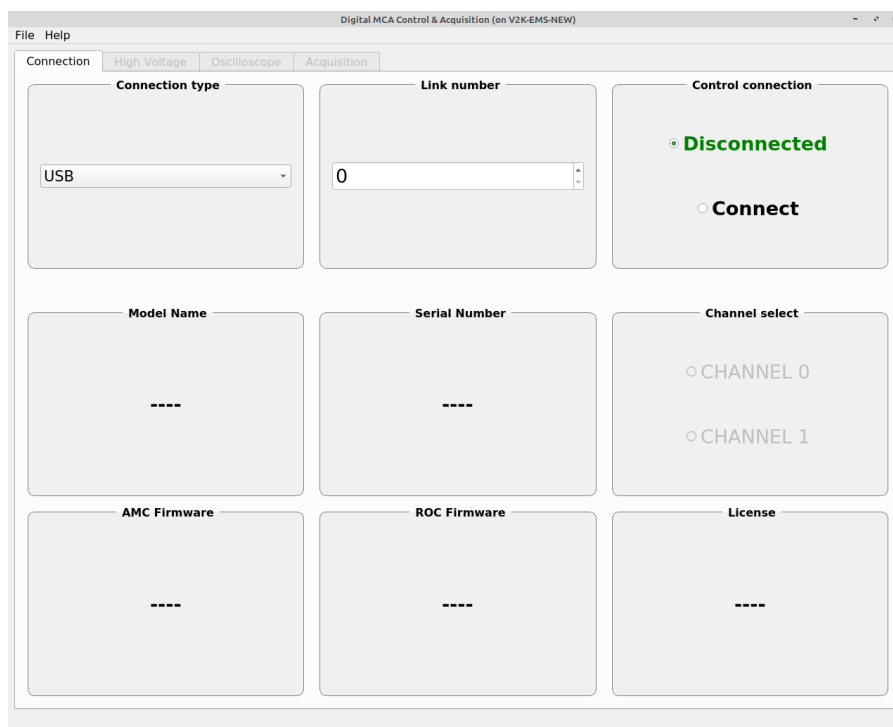


Рис. 2.2. Графический интерфейс после запуска программы.

Здесь нужно выбрать «Link Number» (обычно 1) и нажать кнопку «Connect». В случае удачного подключения и установления связи со станцией становятся доступными вкладки «High Voltage», «Oscilloscope» и «Acquisition».

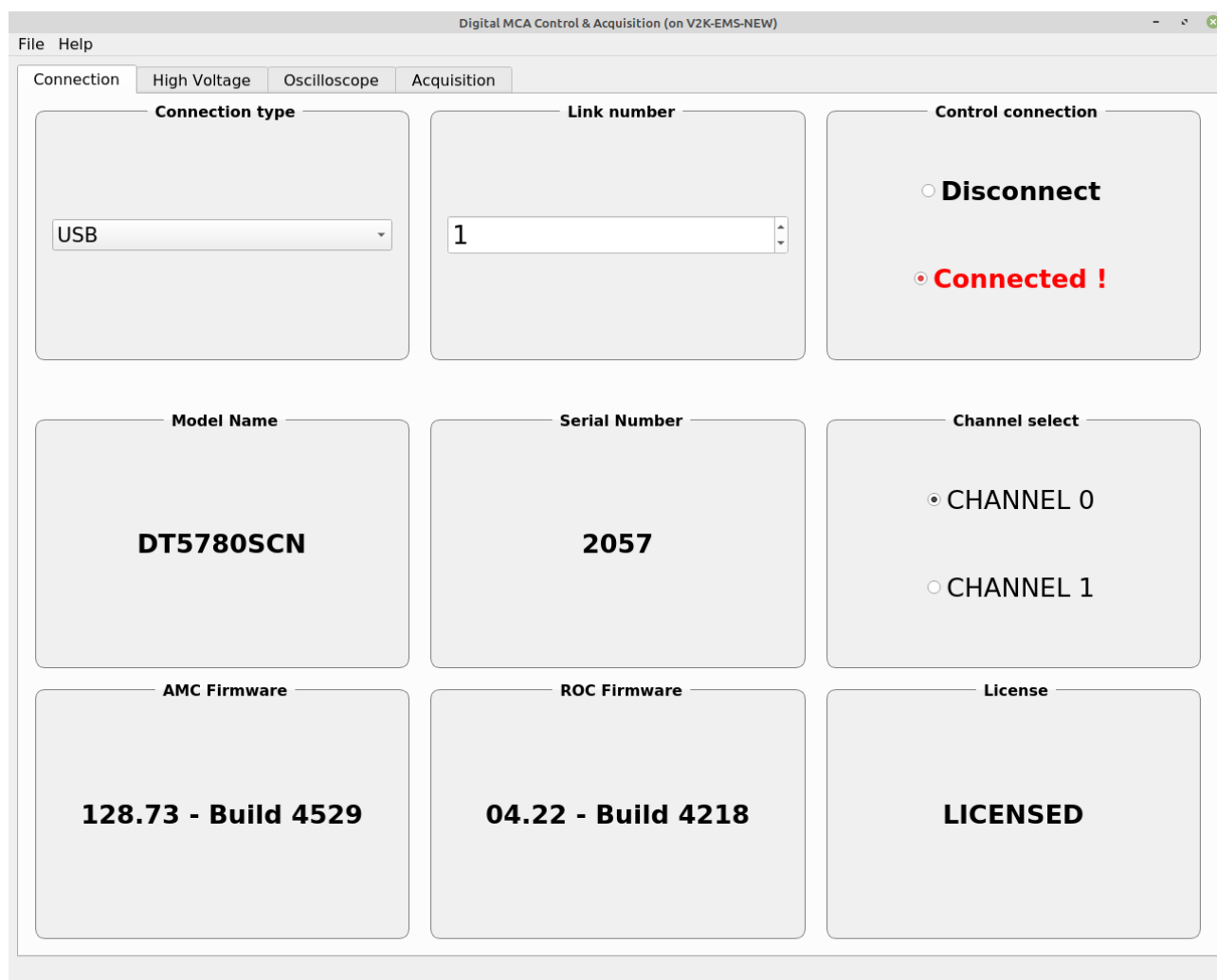


Рис. 2.3. Графический интерфейс после установления связи со станцией.

В рабочей директории `/home/ems/Acquisition` расположены три конфигурационных файла, в которых содержится информация, необходимая для работы программы.

- В текстовом файле `environment.cfg` прописаны пути для сохранения спектров.
- В бинарном файле `digitizer.pickle` хранятся настройки высоковольтного питания и сигнального процессора спектрометрической станции. Для записи (новых) параметров настройки используется меню «File -> Save digitizer settings».
- В бинарном файле `acquisition.pickle` хранятся настройки параметров набора спектров. Для записи (новых) параметров настройки используется меню «File -> Save acquisition settings».

2.3.1 Вкладка «High Voltage»

Во вкладке «High Voltage» (Рис. 2.4) устанавливаются следующие параметры:

- «Set Voltage» – выбор текущего рабочего напряжения (у нас это -3500 V),
- «Limit Maximum Voltage to» – ограничение на напряжение из предыдущего пункта, но не выше аппаратного предела $V_{\max}$,
- «Limit Maximum Current to» – ограничение на максимальный ток (не выше $I_{\max}$),
- «Set Ramp Up Speed to» – скорость подъема напряжения,
- «Set Ramp Down Speed to» – скорость снятия напряжения.

Включение и выключение напряжения осуществляется кнопками «ON» и «OFF». В случае, если включение напряжения заблокировано высокой температурой HPGe детектора, вместо «ON» появится «INH» (Inhibit) и программа не позволит включить источник. Текущие измеренные значения напряжения и тока показаны на цифровых индикаторах.



Рис. 2.4. Графический интерфейс управления высоким напряжением.

2.3.2 Вкладка «Oscilloscope»

Вкладка «Oscilloscope» (Рис. 2.5) предназначена для наблюдения сигналов и настройки параметров сигнального процессора. Интерфейс управления приближен к интерфейсу классического осциллографа. При запуске программы параметры считываются из файла `digitizer.pickle`, описание смысла параметров и процедуры настройки можно найти на сайте caen.it. В случае изменения параметров их необходимо сохранить (меню «File -> Save digitizer settings») перед тем как перейти в другую вкладку интерфейса программы. Это относится и к уровню триггера, который одновременно является программно управляемым энергетическим порогом в процедуре набора спектра.

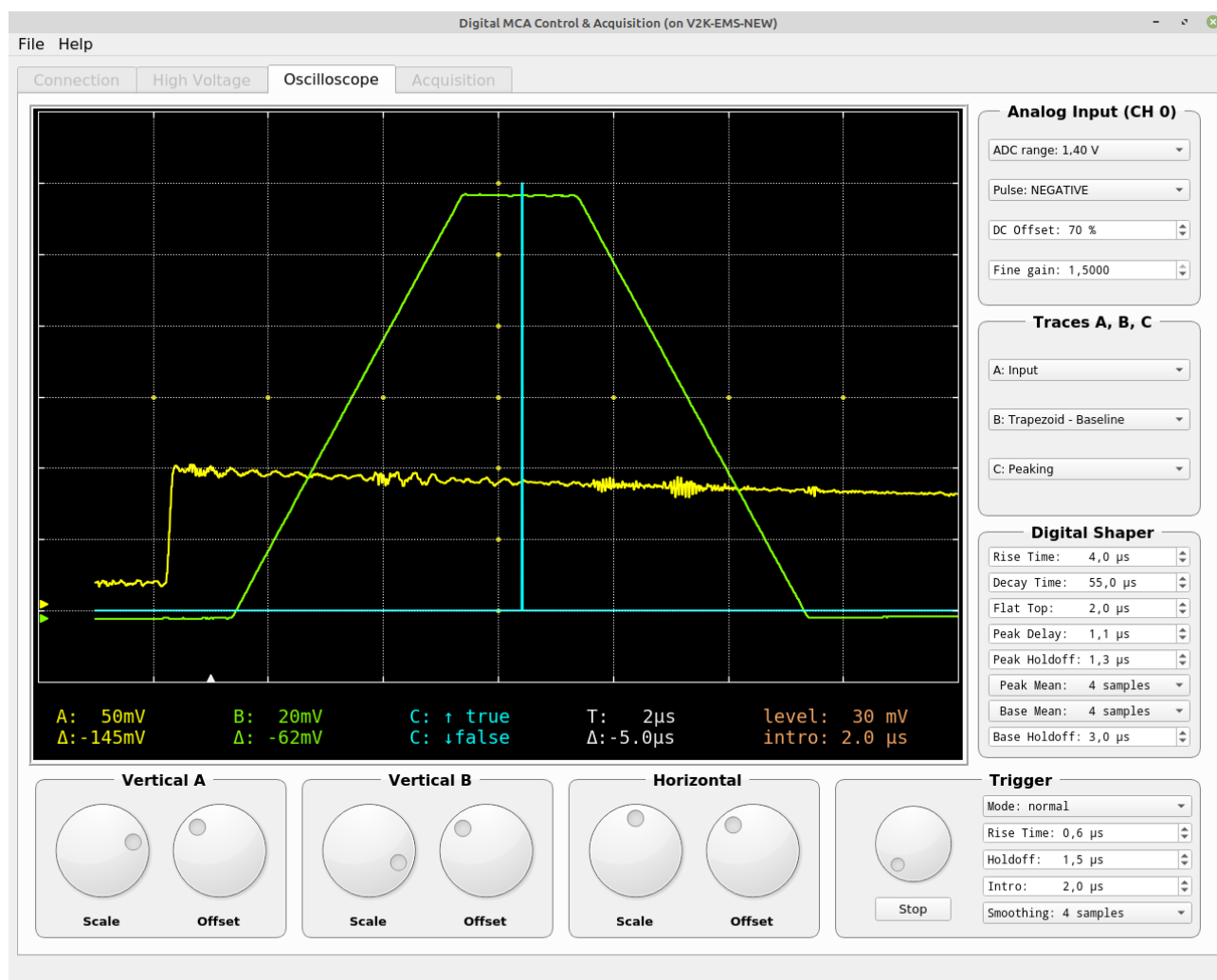


Рис. 2.5. Цифровой осциллограф и настройка сигнального процессора.

2.3.3 Вкладка «Acquisition»

Группой элементов «Acquisition Control» осуществляется управление и контроль процедуры набора спектров. Перечислим назначение элементов в порядке по рядам:

- 1) Кнопка «Start/Stop» для запуска/остановки сбора данных, кнопка «Clear» для очистки спектра (см. далее), кнопка «Save» для записи спектра на диск.
- 2) Выбор критерия автоматической остановки набора, выбор параметра остановки для выбранного критерия, интервал для считывания спектра из памяти спектрометрической станции.
- 3) Три последовательно увеличивающихся порога («А», «В», «С») для определения скоростей счёта в трёх разных диапазонах спектра.
- 4) Ключ, определяющий переход в автоматический режим последовательного набора и сохранения спектров. Ключ перевода каналов АЦП в кэВ и коэффициент перевода [кэВ/канал]. Выбор режима отображения информации: спектр или счётчик событий.

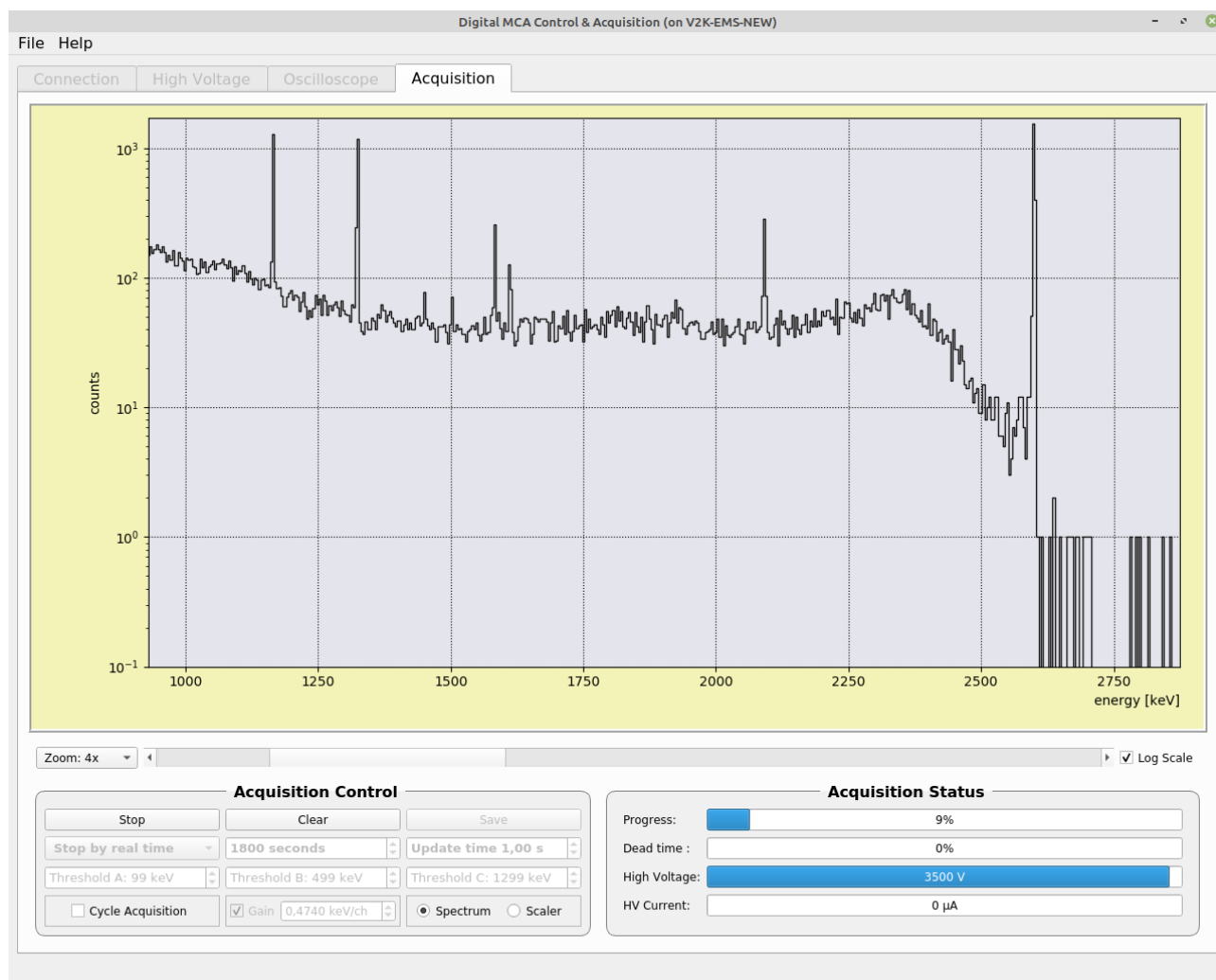


Рис. 2.6. Набор данных и визуализация в режиме «Spectrum».

В режиме «Scaler» вместо спектра на экран выводятся скорости набора событий в единицах [отсчёт/с] для трех диапазонов энергий: «А» [от порога А до порога В], «В» [от В до С] и «С» [от порога С до верхней границы АЦП]. График для каждого диапазона показывается тогда, когда он отмечен галочкой в поле под рисунком.

Нажатие кнопки «Clear» в режиме «Scaler» очищает все графики но не удаляет спектр из памяти. Нажатие кнопки «Clear» в режиме «Spectrum» удаляет спектр из памяти но не очищает графики скоростей счёта. Настройки режима набора данных сохраняются в файл `acquisition.pickle` через меню «File -> Save acquisition settings».

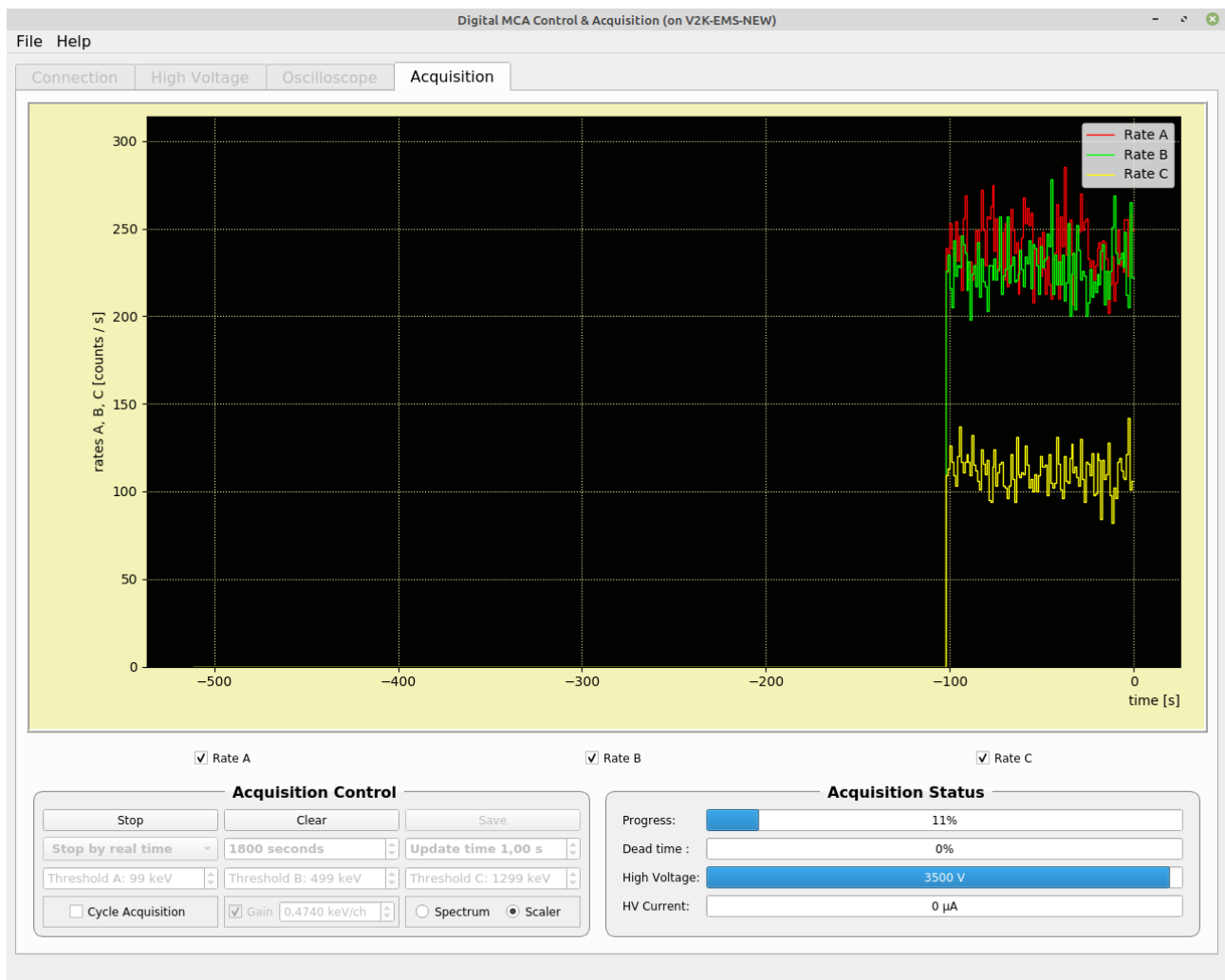


Рис. 2.7. Набор данных и визуализация в режиме «Scaler».

В файле `environment.cfg` определён путь для сохранения файлов `data_folder`. При нажатии на кнопку «Save» или же в автоматическом режиме «Cycle Acquisition» файлы сохраняются на диск, причем имя файла формируется автоматически из локального системного времени записи файла в виде `data_folder/YYYY/YYYYMMDD/HHMMSS.wall.gz`. Здесь YYYY – год (например 2021), MMDD – месяц и число (например 0106 – 6 января), HHMMDD – часы, минуты, секунды (например 123456 это 12:34:56). Директории YYYY и YYYYMMDD создаются автоматически, формат записи – сжатый (gzip) текстовый файл. В «шапке» файла содержится различная служебная информация, в том числе данные о текущих энергии и токе электронного пучка, прочитанные из файла `/home/ems/Acquisition/VEPP2K.status`,

записанного монитором состояния комплекса (Рис. 2.1). Данные о текущей таблице напряжений генератора импульсов считываются из файла `/home/ems/Acquisition/PB-5.dat`, записанного программой управления (Рис. 2.10). «Расширение» `wall` – дань исторически сложившейся традиции. В файле `environment.cfg` (может быть) определено два пути, что сделано для обеспечения возможности сохранения данных на два разных диска.

2.3.4 Зачем нужны три порога?

Раздельное мониторирование скоростей счёта в трёх спектральных интервалах помогает получать и настраивать лазер-электронную светимость. Максимальная энергия рассеянных фотонов $\omega_{\max}$ определяется формулой (1). Следовательно, скорость счёта выше этой энергии (диапазон «С») никак не может быть связана с рассеянием лазерного излучения. В реальных условиях скорость счёта в диапазоне «С» в основном определяется фоном от тормозного излучения электронов на остаточном газе. В диапазоне «А» (низшем по энергии) к пучковому фону добавляются отсчёты, связанные с калибровочными радионуклидными источниками и с событиями неполного поглощения энергии в HPGe кристалле. Средний диапазон «В» выбирается и настраивается приблизительно так: от $\simeq (0.8 - 0.9)\omega_{\max}$ до $\simeq 1.05\omega_{\max}$. В итоге в этом диапазоне существенно увеличивается отношение доли событий от рассеяния лазерного излучения к доле фоновых событий.

§ 2.4. Управление нацеливанием

Программа для работы с шаговыми двигателями хранится на github.com. Локальная копия находится на сервере V2K-EMS-NEW в `/home/muchnoi/GitHub/motor`. Для пользователя `ems` на эту директорию сделана и добавлена в переменную `PATH` символическая ссылка `/home/ems/bin/control`. Для запуска программы в терминале «Acquisition» набираем `mirror45.py &`, после чего появится окно с графическим интерфейсом (Рис. 2.8).

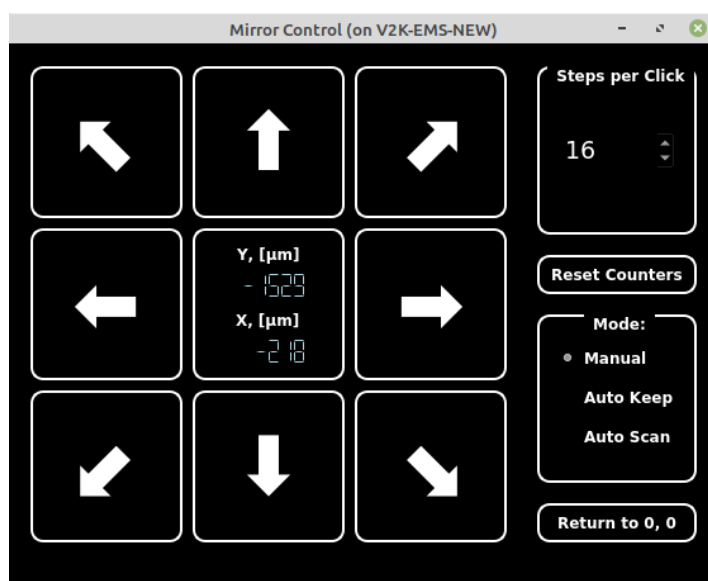


Рис. 2.8. Панель управления нацеливанием.

Кнопками-стрелками осуществляется поворот зеркала в соответствующую сторону. В поле «Steps per Click» задается квант поворота в шагах шагового двигателя.

Зеркало для нацеливания управляется двумя моторами. Если смотреть на зеркало сзади, со стороны моторов, то слева стоит мотор № 1 (КШД № 265), справа – мотор №2 (КШД № 267). Работаем в системе координат пучка с учётом зеркала, расположенного внутри вакуумной камеры. Если мотор № 1 толкает зеркало (положительное направление вращения по оси X') - луч идет влево и вниз, если тянет - вправо и вверх. Если мотор № 2 толкает зеркало (положительное направление вращения по оси Y') - луч идет влево и вверх, если тянет - вправо и вниз. Таким образом один шаг мотора поворачивает зеркало на $S = 1.5$ мкрад в системе координат, повернутой на 45° относительно выбранной системы пучковых координат X и Y . Переход в систему X, Y определяется формулами:

$$X = -X'/\sqrt{2} + Y'/\sqrt{2}, \quad Y = -X'/\sqrt{2} - Y'/\sqrt{2}. \quad (2.1)$$

Учитывая, что от расстояние зеркала до точки взаимодействия $D = 4120$ мм, смещение луча по X, Y вычисляется из счетчиков шагов моторов X', Y' так:

$$X [\text{мкм}] = -4.37(X' - Y'), \quad Y [\text{мкм}] = -4.37(X' + Y'). \quad (2.2)$$

Нажатие кнопки «Reset Counters» сбрасывает в нули показания счётчиков Y и X . Кнопка «Return to 0, 0» возвращает луч в исходное положение $Y = X = 0$. Группа переключателей «Mode» пока никак не работает.

Для конфигурации системы и управления отдельными шаговыми двигателями используется программа `testmotor.py`, интерфейс которой показан на Рис. 2.9. Двигатель № 3 осуществляет продольное перемещение фокусирующей линзы.

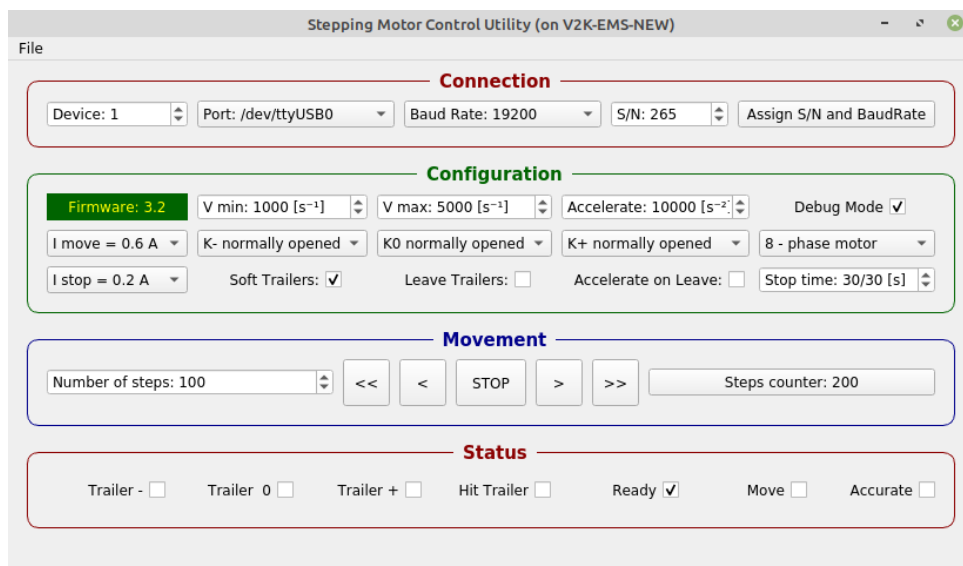


Рис. 2.9. Программа для конфигурации КШД-485 и управления шаговым двигателем.

Двигатель № 4 осуществляет вертикальное перемещение коллиматора, расположенного перед НРGe детектором. Координата «0» для этого двигателя соответствует убранному вниз коллиматору. Рабочему положению соответствует координата около -50000 шагов.

§ 2.5. Управление генератором импульсов

Генератор импульсов точной амплитуды (Рис. 1.8) используется для коррекции интегральной нелинейности спектрометрического тракта. Программа для управления генератором хранится на github.com. Локальная копия репозитория находится на сервере V2K-EMS-NEW в /home/muchnoi/GitHUB/motor/BNC-PB-5. Для пользователя `ems` на эту директорию сделана и добавлена в переменную `PATH` символическая ссылка /home/ems/bin/BNC. Для запуска программы в уже открытом терминале «Acquisition» нужно набрать команду `pb5.py &`, после чего появится окно с графическим интерфейсом (Рис. 2.10). Для управления генератором с помощью этой программы, после его включения нужно нажать на рукоятку «PUSH TO SELECT», затем, вращая её, перейти в меню «OPERATING MODE» и выбрать опцию «REMOTE».

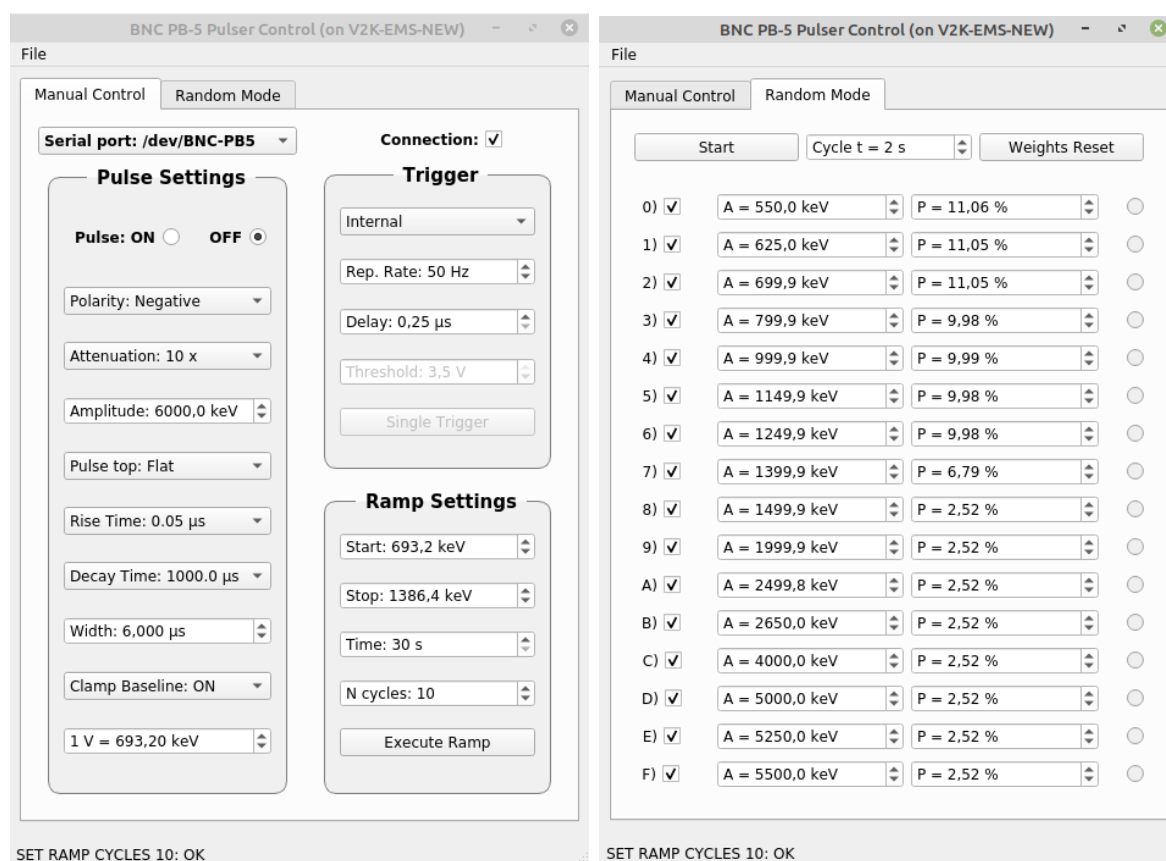


Рис. 2.10. Программа управления генератором импульсов.

Вкладка «Manual Control» используется для настройки параметров и ручного управления генератором. Вкладка «Random Mode» используется для осуществления случайного переключения амплитуд в соответствии с таблицей. Все настройки генератора сохраняются в бинарный файл `PB-5.pickle` в директории /home/ems/Acquisition на сервере V2K-EMS-NEW. В текстовый файл `PB-5.dat` программа сохраняет текущую таблицу напряжений.

§ 2.6. Система сбора данных: резюме

На рабочем столе X-терминала CAEN-DNS (расположен справа на месте оператора в пультовой СНД) сделана кнопка запуска «Acquisition», при нажатии на которую открывается `mate-terminal` в директории `/home/ems/Acquisition` на сервере DNS-CAEN-NEW.

```
ems@V2K-EMS-NEW:~/Acquisition$ ls
acquisition.pickle  digitizer.pickle  laser.20210530  laser.history  PB-5.pickle  temdbR0.py  VEPP2K.status
CAEN                environment.cfg    laser.20210610  Other_Settings  power.gpl     temdbR0.pyc
CCD.py              laser.20210524    laser.20210621  PB-5.dat       __pycache__   V2K.py
```

Рис. 2.11. Директория `/home/ems/Acquisition` на сервере V2K-EMS-NEW.

В этой директории должны находиться файлы:

- `V2K.py`, `temdbR0.py`, `VEPP2K.status`, `laser.history` – программа слежения за статусом установки и текстовые файлы, которые она порождает.
- `acquisition.pickle`, `digitizer.pickle`, `environment.cfg` – конфигурационные файлы для работы со спектрометрической станцией DT5780.
- `PB-5.pickle`, `PB-5.dat` – конфигурационный файл для работы программы управления генератором импульсов и текстовая таблица актуальных напряжений.
- Директория `CAEN` с библиотеками, драйверами и прошивками с сайта caen.it.

Для запуска программ от имени пользователя `ems` сделаны и добавлены в переменную `PATH` символические ссылки на git-репозитории.

```
ems@V2K-EMS-NEW:~/Acquisition/CAEN$ ls -l /home/ems/bin/
total 0
lrwxrwxrwx 1 ems ems 38 Nov  5  2020 acquisition -> /home/muchnoi/GitHub/HPGe-Acquisition/
lrwxrwxrwx 1 ems ems 30 Nov  5  2020 BNC -> /home/muchnoi/GitHub/BNC-PB-5/
lrwxrwxrwx 1 ems ems 38 Nov  5  2020 calibration -> /home/muchnoi/GitHub/HPGe-Calibration/
lrwxrwxrwx 1 ems ems 27 Jan 28 17:23 control -> /home/muchnoi/GitHub/motor/
ems@V2K-EMS-NEW:~/Acquisition/CAEN$ which caen.py
/home/ems/bin/acquisition/caen.py
ems@V2K-EMS-NEW:~/Acquisition/CAEN$ which mirror45.py
/home/ems/bin/control/mirror45.py
ems@V2K-EMS-NEW:~/Acquisition/CAEN$ which pb5.py
/home/ems/bin/BNC/pb5.py
ems@V2K-EMS-NEW:~/Acquisition/CAEN$
```

Рис. 2.12. Расположение программ системы сбора данных.

§ 2.7. Обработка данных

Обработка измеренного спектра состоит из двух этапов:

- 1) Абсолютная калибровка энергетической шкалы по линиям известных изотопов, с коррекцией нелинейности по линиям от генератора импульсов.
- 2) Подгонка края спектра и определение средней энергии и энергетического разброса электронов пучка.

Для выполнения этих задач используется компьютер V2K-EMS, среда для обработки данных **ROOT** и написанная на языке **Python** программа **hpge.py**. Сервер V2K-EMS с двумя мониторами расположен в пультовой СНД (см. Рис. 1.1). На рабочем столе пользователя **ems** сделана кнопка запуска «Analysis», которая открывает терминал в рабочей директории **/home/ems/Analysis** с тремя вкладками: «Калибровка шкалы», «Измерение энергии» и «Контроль». В этой директории расположены два текстовых конфигурационных файла: в файле **_globals_.cfg** прописан путь доступа к записанным спектрам, в файле **online.cfg** прописаны различные параметры (с подробными комментариями), используемые при обработке спектра. Список ключей выводится командой **hpge.py --help**:

```
ems@V2K-EMS:~/Analysis$ hpge.py --help

Python script to process HPGe spectra. © 2005-2020 Nickolai Muchnoi

Usage:      hpge.py [options]

List of options:
-h,          --help                : print this help message and exit.
-i,          --interactive          : if set, script will prompt to proceed.
-k,          --keV                  : use channels not keV.
-l,          --list                  : just show the list of files.
            --toi                   : show the table of known isotopes.
-f expr,     --file = expr          : filename(s) under specified folder(s).
-n N,        --nf = N               : put several files into one spectrum.
-d YYYYMMDD, --folder = YYYYMMDD   : date to start from (year, month, day).
-e YYYYMMDD, --efolder = YYYYMMDD  : date to end with (year, month, day).
            --time = HHMMSS         : time from which to start (hour, min, sec).
-c filename, --cfg = filename       : file to read various parameters,
                                     otherwise "online.cfg" is used.
-s filename, --scale = filename     : file to store/get calibration results,
                                     otherwise "escale.pickle" is used.
-j,          --joint                : show joint calibration results.
-v energy,   --verify = energy      : calibration results for an energy [keV].
            --bncpb5 = energy       : check volt-to-keV conversion coefficients.
-g,          --generate              : generate subfolders with 'success.list'
                                     and 'failure.list' file containers.
-p folder,   --point = folder        : subfolder under the working folder,
                                     where there is the 'success.list' file.
            --edge                   : try to get beam energy from Compton edge.
            --escan                   : deal with beam energy scan experiment.
```

Рис. 2.13. Команда **hpge.py --help**.

2.7.1 Калибровка шкалы

В онлайн режиме во вкладке «Калибровка шкалы» нужно набрать команду `hpge.py`. Программа производит калибровку шкалы по последнему записанному файлу и ждёт появления следующего файла. Результаты калибровки выводятся в виде текстовой таблицы в терминале, в виде графиков в графическом окне (как на Рис. 2.14) и записываются в файл `scale.pickle` (имя файла прописано в разделе `[scale]` конфигурационного файла `online.cfg`).

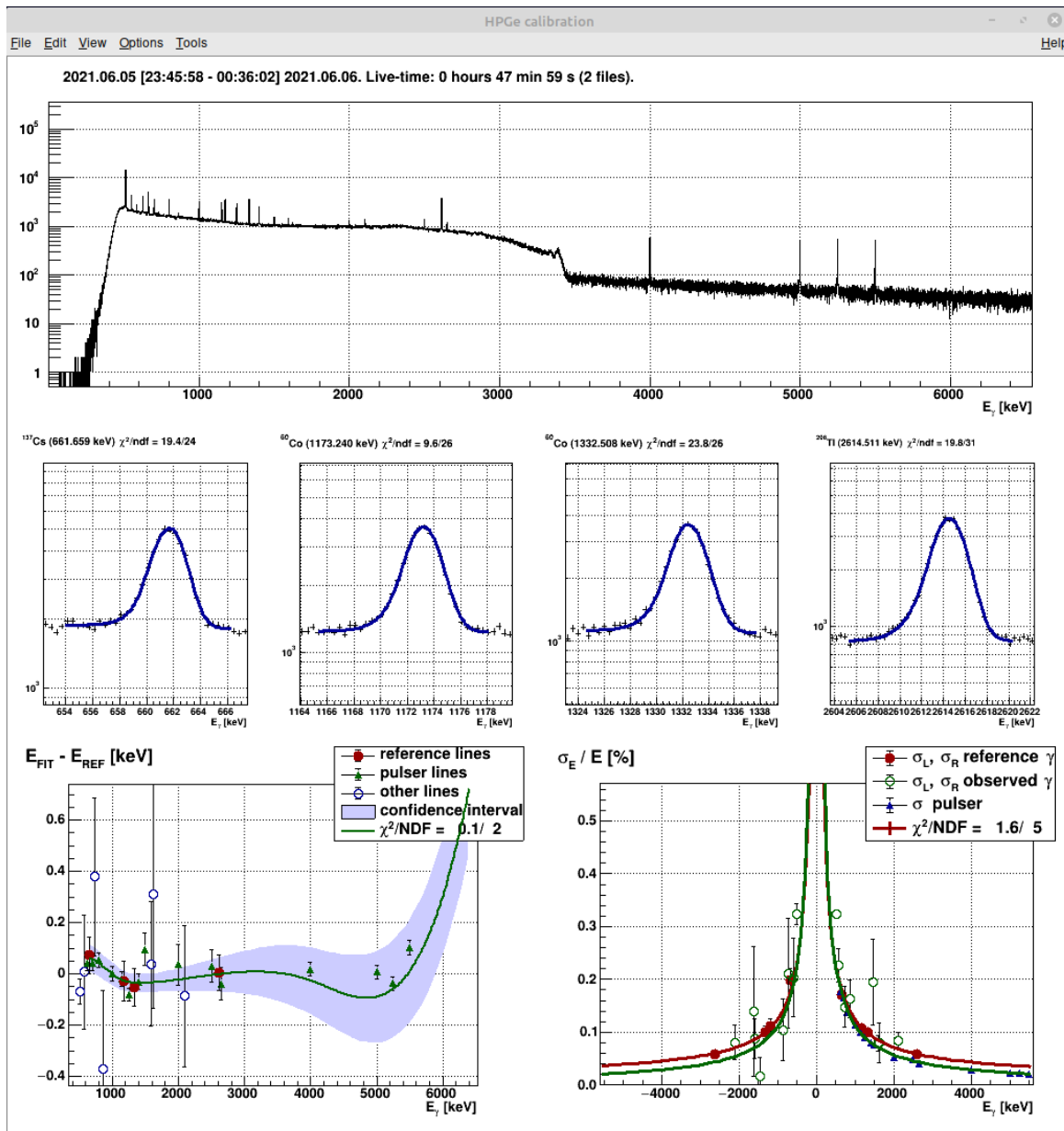


Рис. 2.14. Результат калибровки энергетической шкалы.

2.7.2 Измерение энергии

Во вкладке «Измерение энергии» набираем команду `hpge.py --edge`. Программа проверит, сделана ли уже калибровка шкалы для последнего записанного файла, если да, то производит подгонку края комптоновского спектра, далее – ждёт появления следующего файла. Результаты подгонки выводятся в виде текстовой таблицы в терминале, в виде графиков в графическом окне (как на Рис. 2.15) и записываются в файл, имя которого определено в разделе [edge] конфигурационного файла `online.cfg`. При наличии ключа записи в разделе [edge] конфигурационного файла `online.cfg` результат также записывается в базу данных СНД.

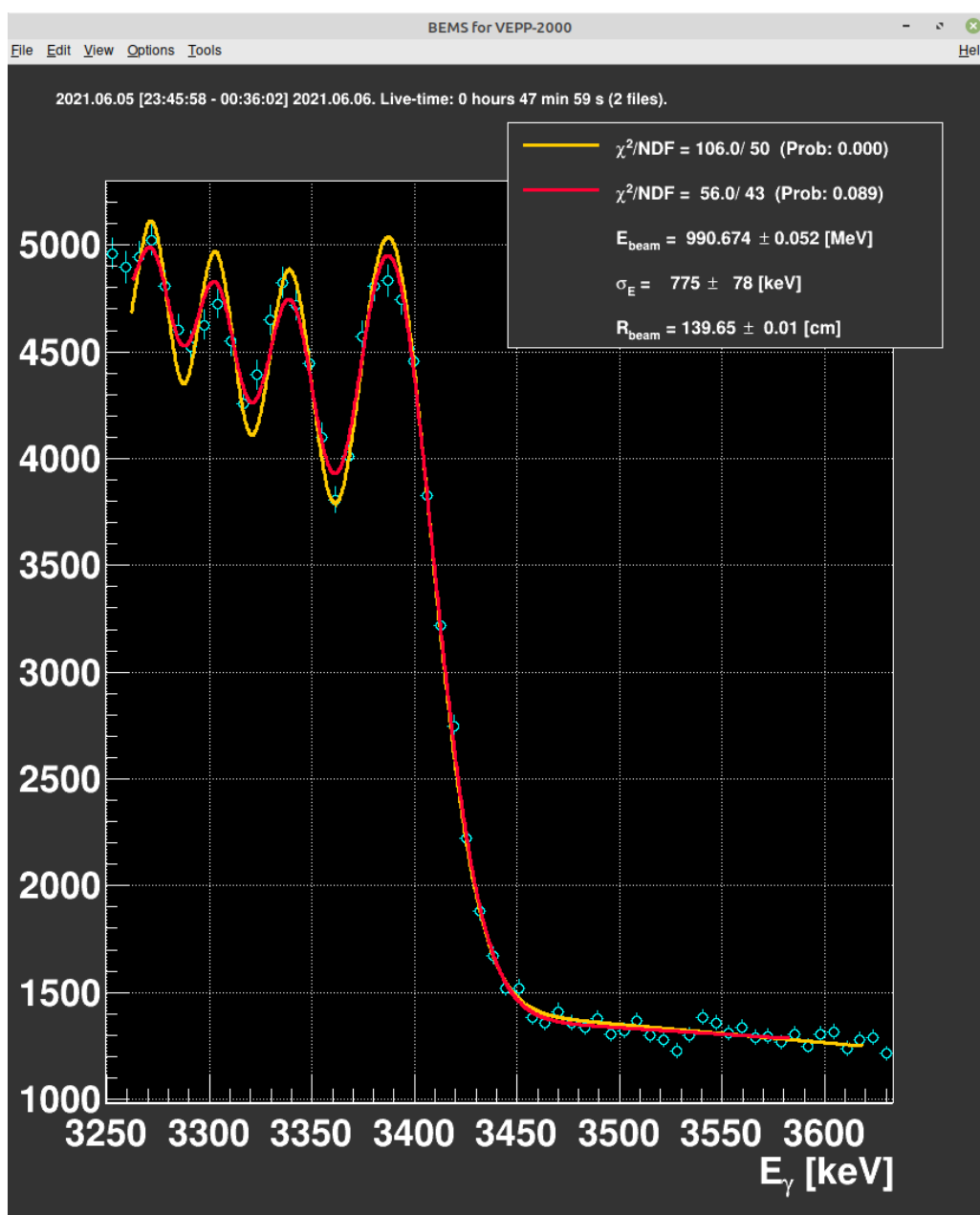


Рис. 2.15. Результат измерения энергии пучка.

2.7.3 Просмотр результатов измерений

Для просмотра результатов работы МЭП за определенный промежуток времени используются различные ключи программы `hpge.py`. Для удобства работы, как было отмечено выше, для этого в терминале есть отдельная вкладка «Контроль». Например:

- `hpge.py -v 1234` выводит результаты калибровки энергетической шкалы для энергии 1234 кэВ. Строятся графики временных зависимостей для параметров энергетического разрешения, а также для преобразования каналов АЦП в кэВ. Данные берутся из файла `scale.pickle`. Имя этого файла прописано в конфигурационном файле `online.cfg`, но с дополнительным ключом `-s filename` может использоваться и другой файл.
- `hpge.py -joint` производит базовый статистический анализ качества калибровки шкалы. Доступ к данным такой же, как и в предыдущем пункте.
- `hpge.py -escan` берёт данные из файла, имя которого определено в разделе `[edge]` конфигурационного файла `online.cfg`, и строит графики временных зависимостей результатов измерений энергии и энергетического разброса пучка.

Тут важно отметить следующее: когда файл `scale.pickle` становится слишком «длинным», обработка записанных в нём данных начинает занимать слишком много времени, а на графиках рисуется слишком много информации, что не очень удобно. Поэтому раз в одну-две недели оператор МЭП переименовывает файл `scale.pickle` в `scale.YYYYMMDD`, где `YYYYMMDD` – год, месяц и день, в который производится переименование. После переименования результаты новых калибровок записываются в новый (автоматически созданный) файл `scale.pickle`. С помощью этого нехитрого приёма просмотр данных за различные периоды работы становится более комфортным.

Глава 3. Инструкции

§ 3.1. Поддержание системы в оптимальном состоянии

В стационарном режиме МЭП работает так: фотоны из лазерного луча рассеиваются на электронном пучке ВЭПП-2000, в результате чего в энергетическом спектре, измеряемом HPGe детектором, наблюдается «край комптоновского спектра». Энергия этого края определяется формулой (1) и его видно в спектре «невооружённым глазом» (как на Рис. 2.14 около энергии 3200 кэВ). Ожидаемая энергия края для текущей энергии электронного пучка выводится в окне монитора состояния комплекса (Рис. 2.1). Если идёт эксперимент, в коллайдере есть электронный пучок, лазер включен и при этом лазерный луч попадает в электронный пучок, край спектра должен быть виден и в процессе набора спектра, то есть в окне программы набора данных (Рис. 2.6).

Чем больше поток рассеянных фотонов, тем быстрее и точнее измеряется энергия пучка. Наиболее частой причиной уменьшения точности измерений является умеренное геометрическое расхождение лазерного луча с электронным пучком. В настоящее время контроль и поддержание максимальной фотон-электронной светимости осуществляется вручную. Практически это означает, что оператор МЭП или дежурный СНД раз в несколько часов «шевелит» лазерный луч с помощью программы управления зеркалом нацеливания (Рис. 2.8), проверяя или добиваясь того, чтобы скорость счёта «Rate В» (зелёный график на Рис. 2.7) была максимальной.

Ситуация, в которой скорость счёта «Rate В» не изменяется при «шевелении» лазерным лучом может быть вызвана различными причинами. Если лазер включен и в коллайдере есть электронный пучок, то этими причинами могут быть:

- 1) отсутствие или сильно упавшая мощность лазерного излучения,
- 2) сильное геометрическое расхождение, т. е. тотальное непопадание лазерного луча в электронный пучок.

§ 3.2. Действия при смене энергии пучка

Литература

- [1] E. V. Abakumova, M. N. Achasov, D. E. Berkaev, V. V. Kaminsky, N. Yu. Muchnoi, E. A. Perevedentsev, E. E. Pyata, and Yu. M. Shatunov. Backscattering of Laser Radiation on Ultrarelativistic Electrons in a Transverse Magnetic Field: Evidence of MeV-Scale Photon Interference. *Phys. Rev. Lett.*, 110(14):140402, 2013.
- [2] E. V. Abakumova et al. A system of beam energy measurement based on the Compton backscattered laser photons for the VEPP-2000 electron–positron collider. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 744:35–40, 2014.
- [3] M. N. Achasov and N. Yu. Muchnoi. C.M.S. energy calibration in BES-III and VEPP-2000 experiments. *JINST*, 15(07):C07005, 2020.