

# Разработка программного обеспечения для систем управления и мониторинга экспериментальных установок SPI и APoL

Заседание Ускорительной секции НТС ЛФВЭ

Подготовил Дунин Никита Владимирович  
Инженер Ускорительного отделения №1 НЭОИKN Сектора №4

27.08.2025

# Цель

- Создание комплексной программно-аппаратной платформы для удаленного управления, мониторинга и автоматизации ключевых систем физических установок.

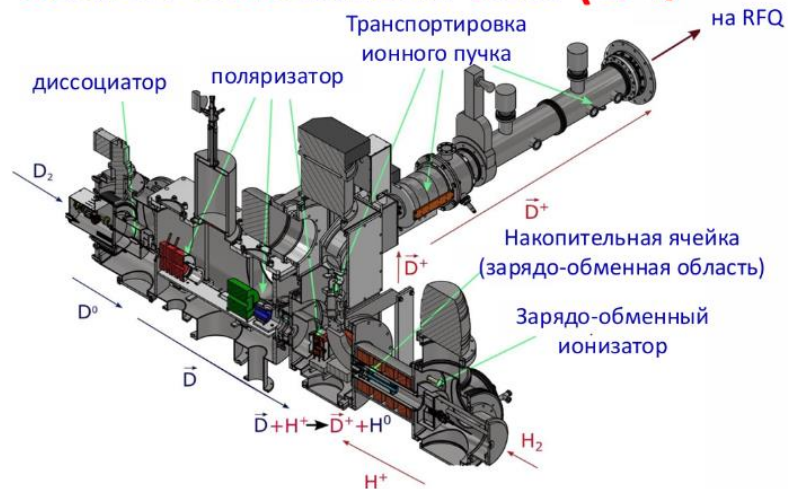
## **Ключевые задачи:**

- Управление источниками питания поляризационных ячеек.
- Контроль генераторов сигналов для блоков поджига, разряда и уск. напряжения
- Мониторинг параметров давления и температуры через ПЛК.
- Интеграция управления криогенной системой.
- Измерение степени поляризации (измерение гамма квантов около 3.5 мЭв двух плечах)

# Задачи автоматизации физических установок

SPI (Source of Polarized Ions) и APoL (Absolute Polarimeter for SPD NICA)

## Source of Polarized Ions (SPI)



## 1) Насосы/компрессоры для криогеники



## 2) Лабораторное оборудование с протоколом SCPI

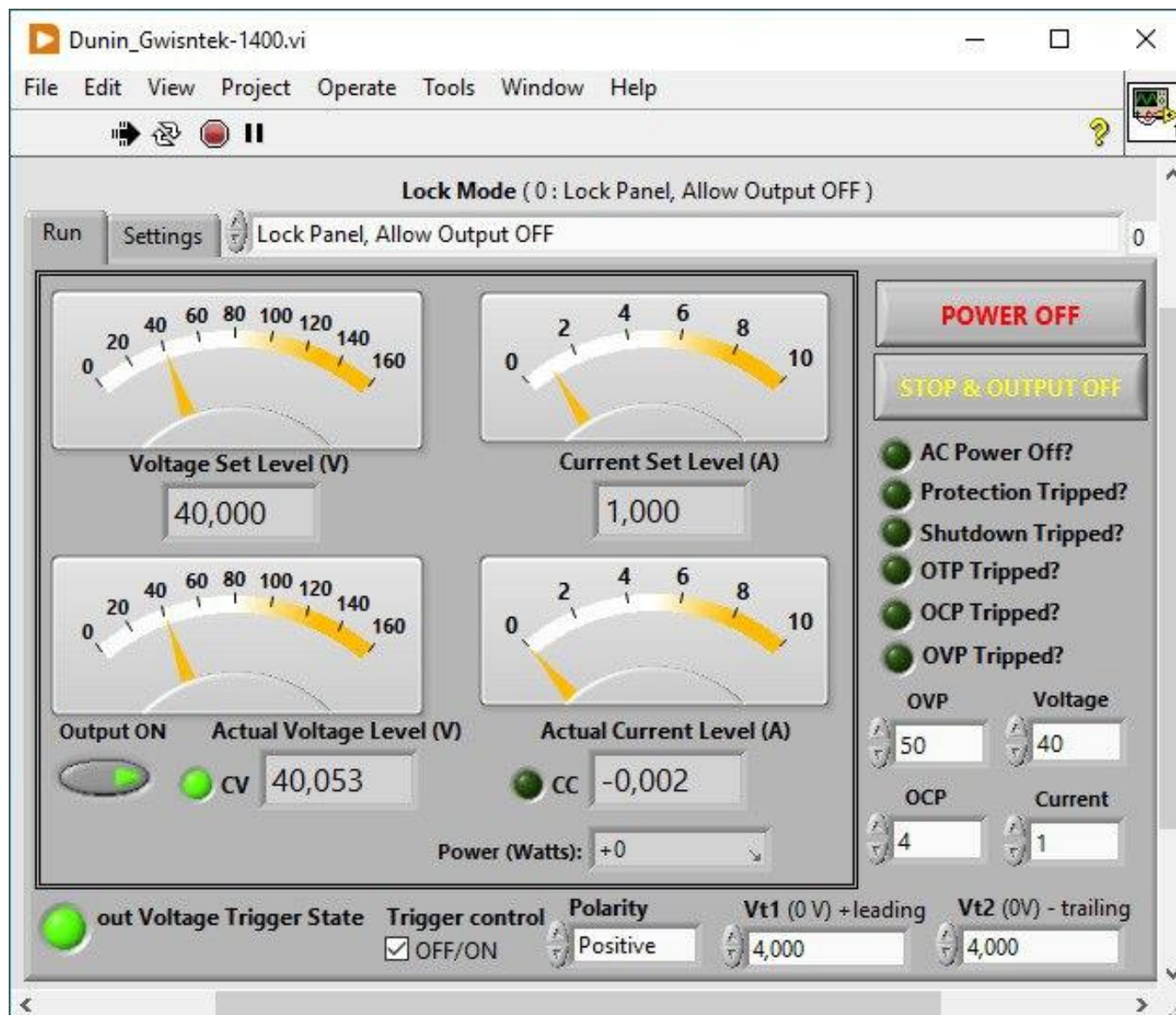
(источники питания, генераторы импульсов, частотомеры)



## 3) Измерение напряжения или тока



## Созданный пользовательский интерфейс источника питания GW Instek 1400M (0-160 V, 0 -10 A, 400W)



Источник питания используется для обеспечения работы следующих поляризационных ячеек:

- SFT
- MFT
- WFT





# Созданный пользовательский интерфейс цифрового генератора сигналов Quantum Composer 9520

Control panel Settings

Autostart? ☐ OFF/ON address 169.254.109.80 Set Global Period : 0,000005

|                    | Wait | 1ch mode                  | Delay     | Width  | Amp   | DC ON | DC OFF | SAVE               | 1 channel                                  | External input clock                                                                                                                   |
|--------------------|------|---------------------------|-----------|--------|-------|-------|--------|--------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +                  | 0    | SINGLE<br>DCYCLE<br>BURST | 1 Ch 0,09 | 4,9902 | 4,35  | 5     | 1      | Write to 1 channel | <input type="checkbox"/> Off/On            | System trigger<br>External trig 10 Mhz<br>External trig 20 Mhz<br>External trig 30 Mhz<br>External trig 40 Mhz<br>External trig 50 Mhz |
| 0                  | 10   | SINGLE<br>DCYCLE<br>BURST | 2 Ch 1    | 2      | 2,95  | 3     | 1      | Write to 2 channel | <input checked="" type="checkbox"/> Off/On | Trigger mode<br><input type="radio"/> Disabled/Triggered                                                                               |
| RF SFT             | 1000 | SINGLE<br>DCYCLE<br>BURST | 3 Ch 1    | 2      | 2,95  | 3     | 1      | Write to 3 channel | <input checked="" type="checkbox"/> Off/On | Trigger Edge<br><input checked="" type="radio"/> Falling<br><input type="radio"/> Rising                                               |
| -                  | 5000 | SINGLE<br>DCYCLE<br>BURST | 4 Ch 1    | 2      | 2,95  | 3     | 1      | Write to 4 channel | <input checked="" type="checkbox"/> Off/On | Trigger Level<br>0,9                                                                                                                   |
| SFT 0.5<br>(2->6)  | 2    | SINGLE<br>DCYCLE<br>BURST | 5 Ch 5    | 4      | 3,05  | 1     | 2      | Write to 5 channel | <input type="checkbox"/> Off/On            | RUN/STOP<br><input checked="" type="radio"/> RUN                                                                                       |
| SFT 1.75<br>(3->5) | 0    | SINGLE<br>DCYCLE<br>BURST | 6 Ch 5    | 4      | 3,05  | 1     | 2      | Write to 6 channel | <input type="checkbox"/> Off/On            | Gate mode disable<br><input checked="" type="radio"/> OFF                                                                              |
|                    | 1    | SINGLE<br>DCYCLE<br>BURST | 7 Ch 4,25 | 6,12   | 11,35 | 2     | 3      | Write to 7 channel | <input type="checkbox"/> Off/On            | Pulse Inhibit enable<br><input type="radio"/> OFF/ON                                                                                   |
|                    | 1    | SINGLE<br>DCYCLE<br>BURST | 8 Ch 4,25 | 6,12   | 11,35 | 2     | 3      | Write to 8 channel | <input type="checkbox"/> Off/On            | Output inhibit enable<br><input type="radio"/> OFF/ON                                                                                  |

Channel 5: SFT 0.5 (2->6), Channel 6: SFT 1.75 (3->5), Channel 7: 1, Channel 8: 1

Реализованные функции:  
1) Настройка амплитуды, длительности и задержки;

2) Выбор режима работы (Single, Dcycle, Busrt);

3) Настройка запуска от внутреннего или внешнего триггера;

4) Работа по SCPI через TCP/IP Ethernet.



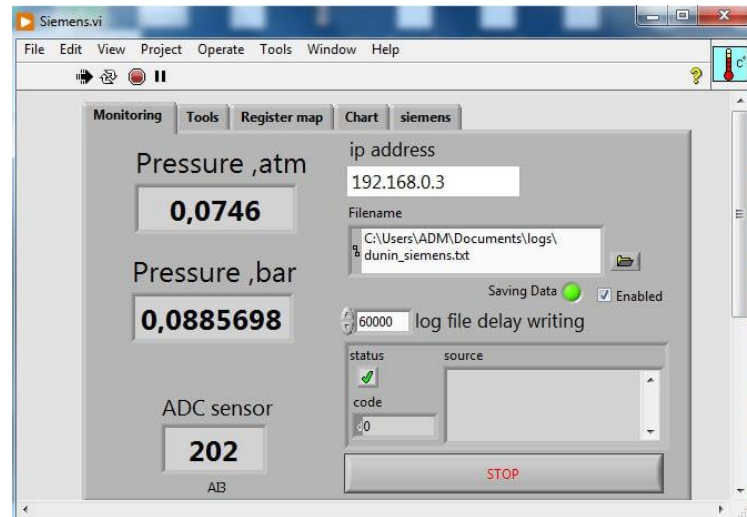
Используется для управления блоками поджига, разряда и ускор. напряжения, клапанами H2/D2 и D2/H2  
Установки SPI (Source of Polarized Ions)



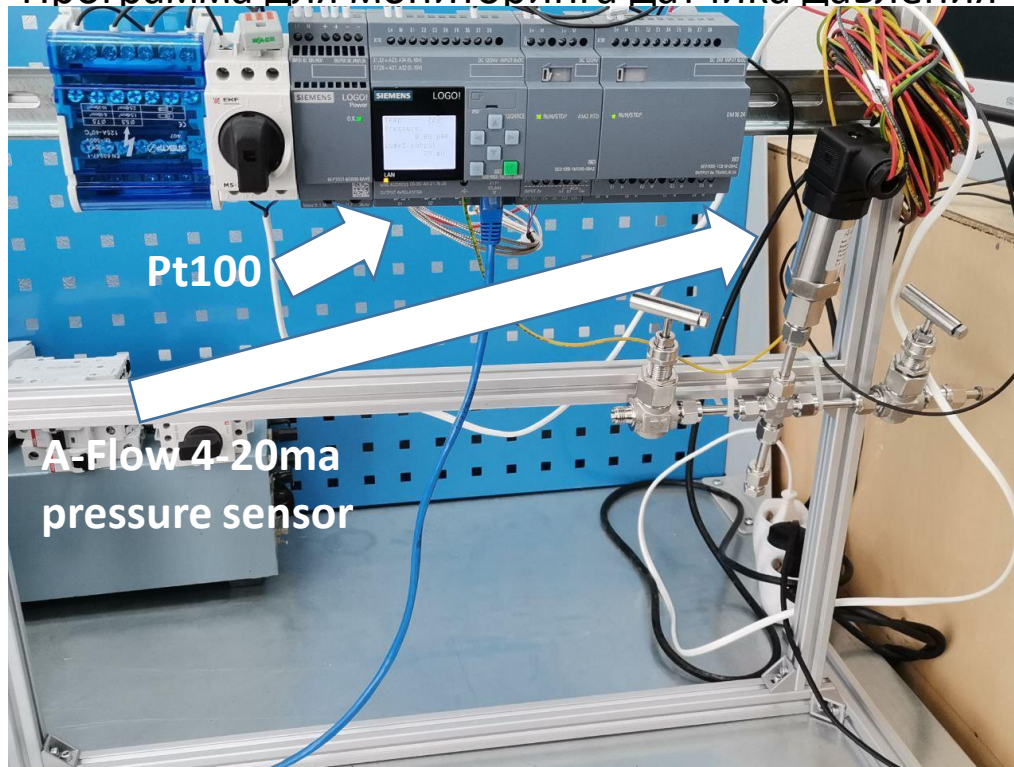


# Автоматизация измерений калибровочного объёма

Siemens LOGO controller



Программа для мониторинга датчика давления



## Система измерения интенсивности и профиля атомного пучка

$$\frac{\partial N_{D_2}}{\partial t} = \frac{V_{cal} \cdot \mu_{D_2}}{m_{D_2} \cdot R \cdot T_{cal}} \cdot \frac{\partial P_{cal}}{\partial t}$$

Формула для расчета



Двухосевой манипулятор



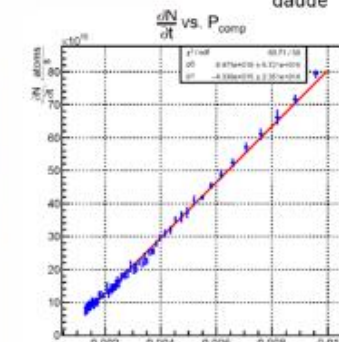
Контроллер B-RAX 3400



ВА 601



Калибровочный объем



Пример калибровочной кривой

Для измерения абсолютного значения и знаков поляризации пучков протонов или нейтронов на коллайдере NICA создается абсолютный поляриметр (APol) с внутренней поляризованной мишенью для струи атомарного водорода/дейтерия.

## Абсолютный поляриметр (APol)



**Абсолютный поляриметр используется для**

- Измерения поляризации пучка на установке NICA
- определения влияния шума на поляризацию любого оборудования NICA
- контроля степени поляризации пучка во время работы коллайдера



## Part of Apol parameters that we need to control and monitor

Параметры для мониторинга

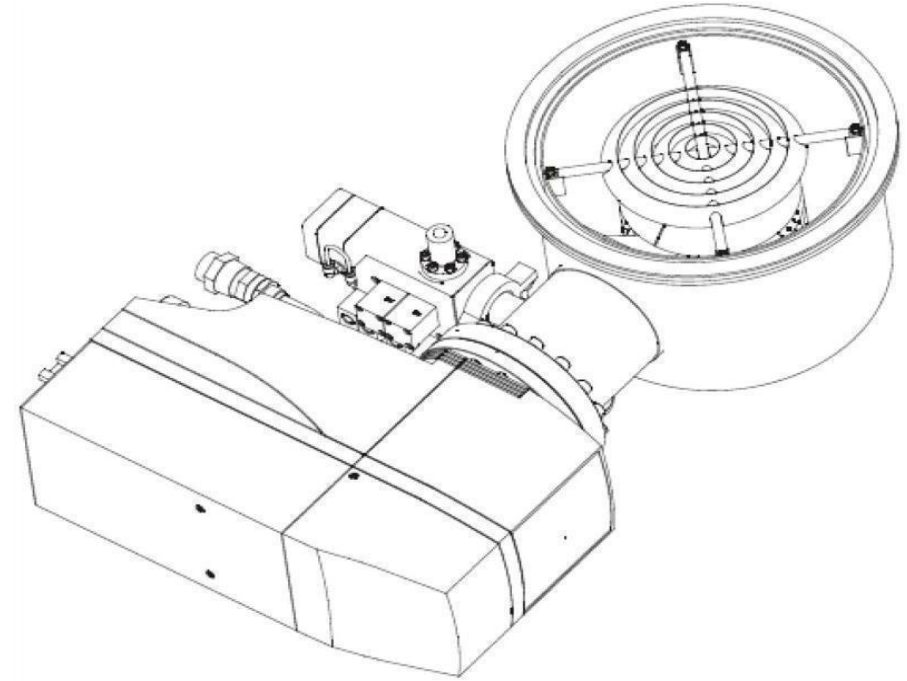
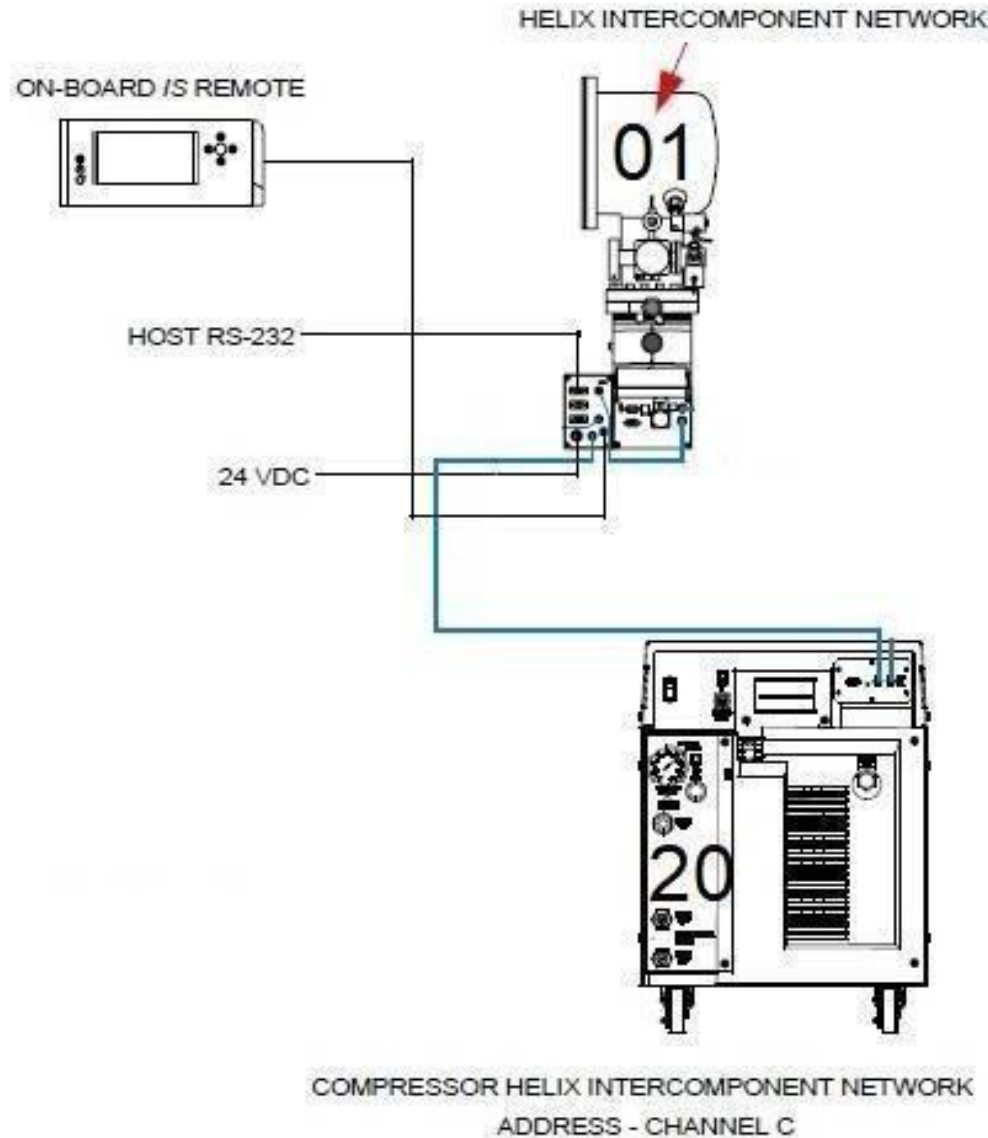
- **Водяной контур охлаждения (10 датчиков)**
- Компрессор **скорость расхода воды**
- Compressor **Давление компрессора на подаче/возврате**
- Cryosystem **Температуры первой и второй криогенной ступени (К)**
- Клапана (Сброс, Продувочный, Форвакуумный)

Параметры для управления

- **Режим Крионасоса (ВКЛ,ВЫКЛ)**
- **Режим Компрессора (ВКЛ,ВЫКЛ)**
- Процесс **Регенерации** криосистемы **(Старт,Отмена,Выключение)**
- Клапана (Сброс, Продувочный, Форвакуумный)



## 1) Brooks Cryosystem diagram for APoL



### Постановка задачи:

Требуется удаленный мониторинг и управление через программное обеспечение на ПК. Необходима возможность будущей интеграции с SCADA-системой.

### Структура команды запросов и ответа

Full regeneration start:

2450 3031 4E31 600D (HEX)

\$P01N1` (ASCII)

Compressor ON:

2450 3230 4131 540D (HEX)

\$P20A1T (ASCII)

Get supply pressure:

2450 3230 4F3F 310D (HEX)

\$P20O?1 (ASCII) ,

### Структура коммуникационного пакета системы On-Board IS Controller:

- A starting flag character: \$ for ASCII (24 hex)
- P and a cryopump or compressor address, when communicating with a cryopump or compressor on the network
- (examples: P00=cryopump #0; P20 = compressor #0) Or N when communicating directly to the Controller
- Message dependent Data Field Characters
- Message Checksum Character
- An ASCII carriage return (CR) code (0D hex)



# Алгоритм расчёта контрольной суммы для Brooks Cryosystem

## Checksum calculation algorithm

- 1) Sum all bytes from an array of ASCII characters to each other
- 2) logically multiply the sum from step 1 by the mask **11,000,000** (192 in decimal)
- 3) divide the number from step 2 by mask **100 00 00** ( 64 in DEC)
- 4) The resulting number from step 3 **XOR** the number from step 3
- 5) Result from step 4 logically multiply (**AND**) by mask **111 111** in HEX (63 DEC)
- 6) **48 (DEC)** + result from step 5 = CRC

## Check sum calculation (C#)

```
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    var a = Convert.ToInt32(textBox2.Text, 16);
    var b = Convert.ToInt32(textBox3.Text, 16);
    var c = Convert.ToInt32(textBox5.Text, 16);
    var d = Convert.ToInt32(textBox4.Text, 16);
    var f = Convert.ToInt32(textBox11.Text, 16);
    var s = Convert.ToInt32(textBox12.Text, 16);
    var ss = Convert.ToInt32(textBox13.Text, 16);
    // var f = Convert.ToInt32(textBox11.Text, 16);
    var result = a + b + c + d + f + s + ss;
    // textBox1.Text = (Convert.ToString(result, 2).PadLeft(8, '0'));
    // 0b11111111 ^ 0b100= 0b11110111
    int h = 192; //maska
    int z = 63; //maska
    int mask76d_bin = result & h;
    textBox6.Text = (Convert.ToString(mask76d_bin, 2).PadLeft(8, '0'));
    int realmask = mask76d_bin / 64;
    textBox7.Text = (Convert.ToString(realmask, 2).PadLeft(8, '0'));
    int xor_result = realmask ^ result;
    textBox8.Text = (Convert.ToString(xor_result, 2).PadLeft(8, '0'));
    int maskd5d0 = xor_result & z;
    textBox9.Text = (Convert.ToString(maskd5d0, 2).PadLeft(8, '0'));
    int addend0 = 48 + maskd5d0;
    textBox10.Text = (Convert.ToString(addend0, 2).PadLeft(8, '0'));
    //hex representation of checksum
    string shex = Convert.ToString(addend0, 16);
    textBox1.Text = shex;
}
```

# LabVIEW control software for cryopump system

## Features:

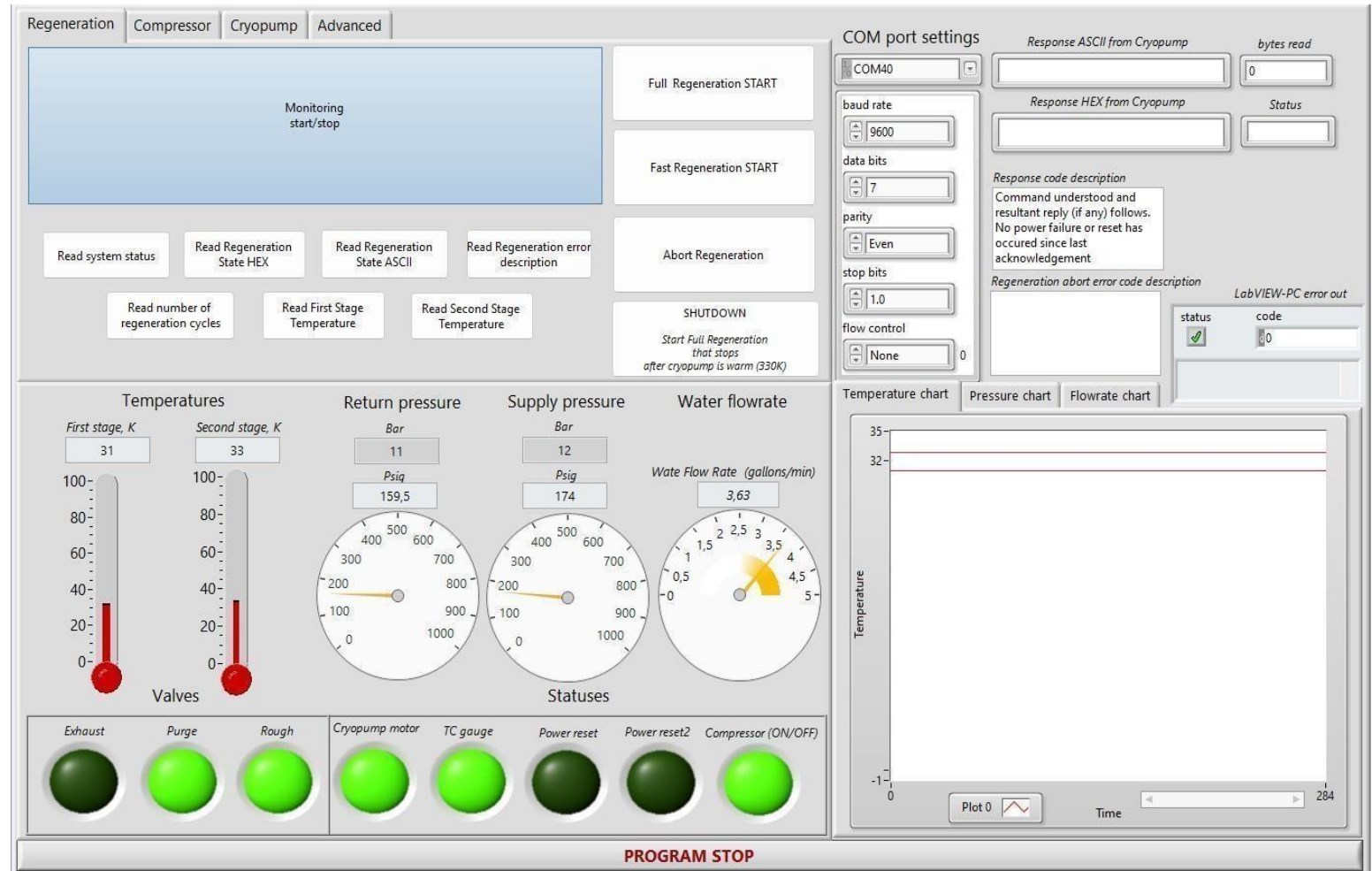
- Direct control for cryopump and/or compressor

(2 types of regeneration, supply/return pressure monitoring, water flowrate

- Valves status and control (Purge, Exhaust, Rough)

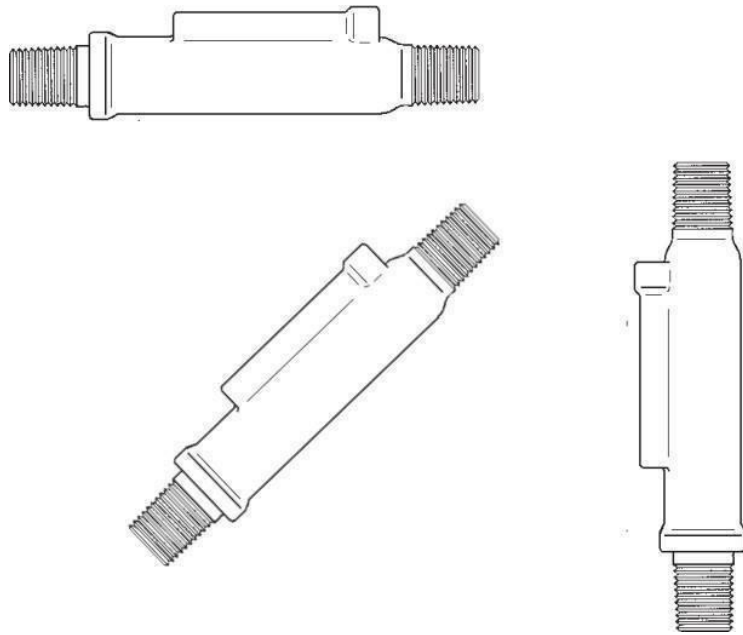
- Event driven
- First and second stage temperatures

## User interface (LabVIEW project)



## Water monitoring for Apol

Coolant loop monitoring (water)



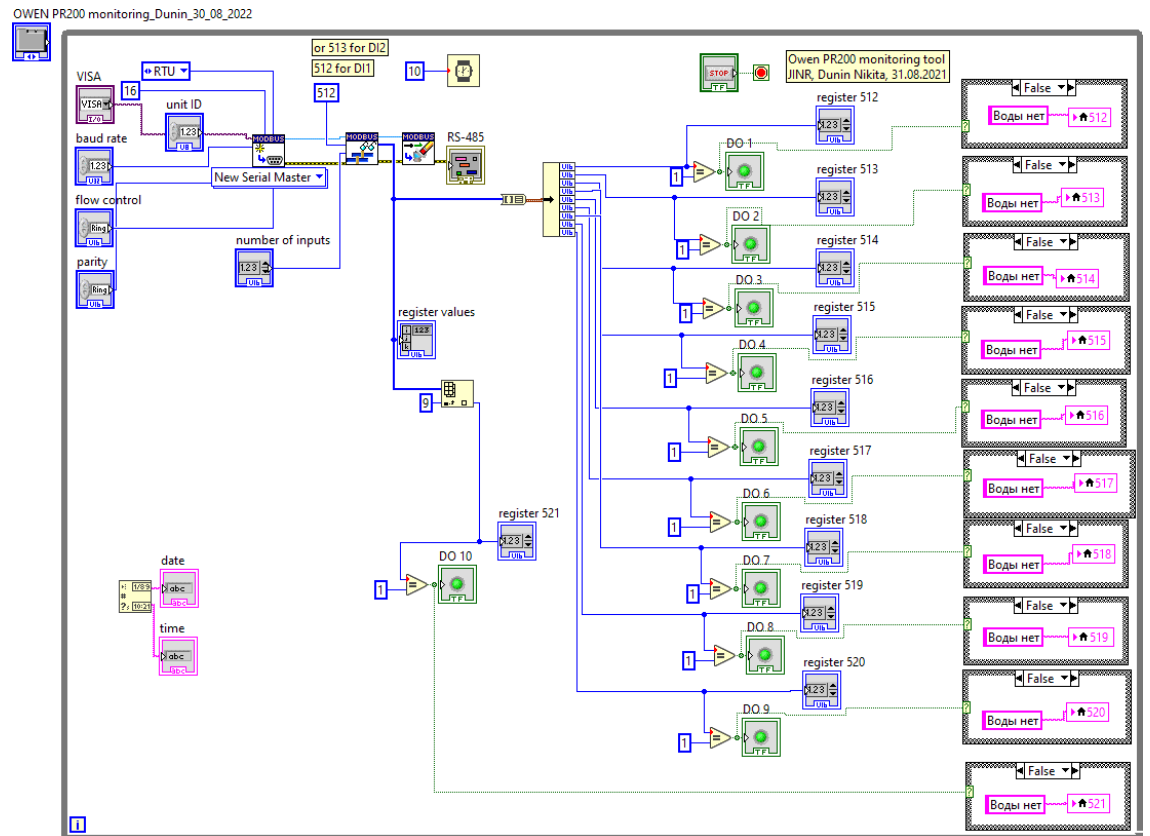
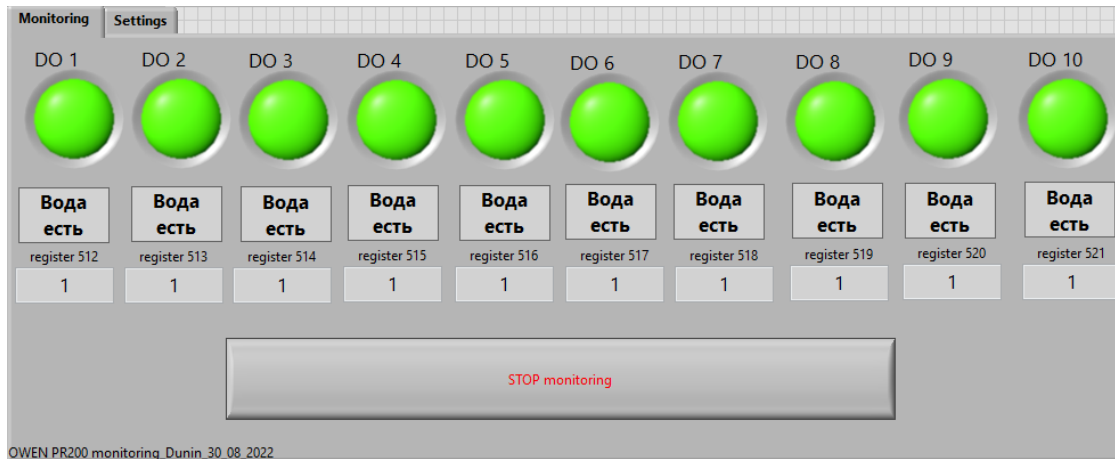
Dwyer P2 flow switches  
(8 DI, 2 AI -voltage)



10 channels

# 10 channels water monitoring for APol

## Features:



- Modbus protocol implementation
- Possibility to control different electrical loads with Owen PR200 PLC



# Применение ФЭУ для измерения поляризации (SPD)

В рамках проекта NICA по программе поляризационных исследований в физике высоких энергий используется источник поляризованных ионов SPI для получения поляризованных пучков протонов и дейтронов

Для **измерения и контроля степени поляризации ускоренных пучков** предполагается разработка поляриметров низких и высоких энергий.

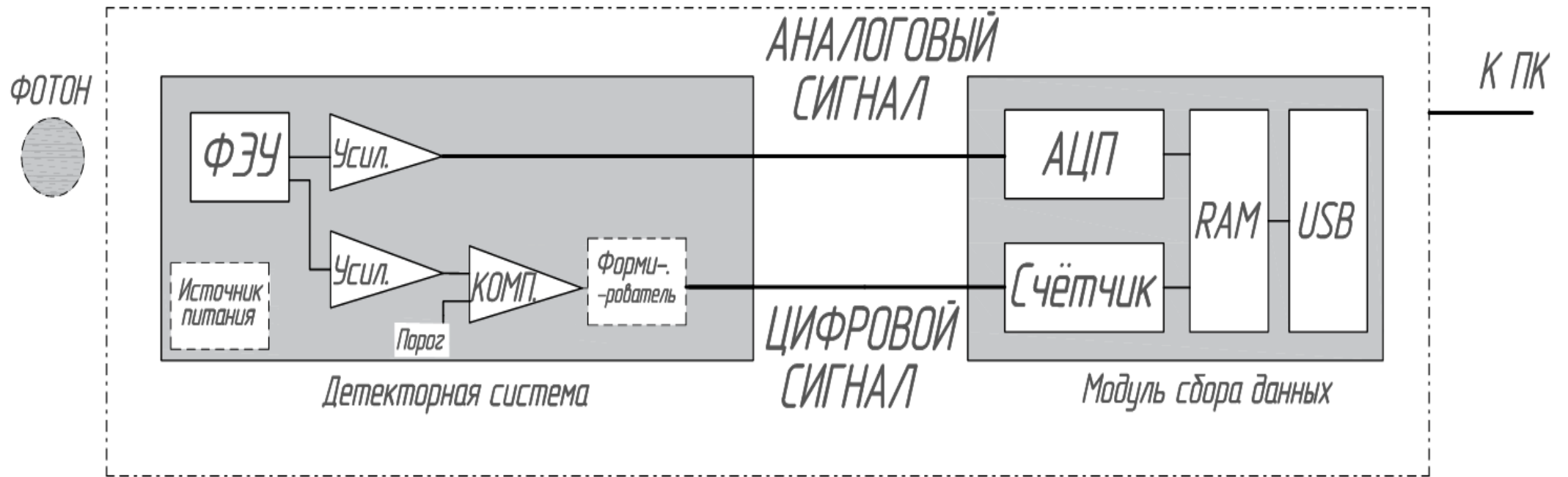
Для измерения поляризации пучка протонов на выходе из SPI (при низких энергиях в диапазоне 100-125 кэВ) будет использоваться поляриметр с использованием реакции слияния  $D(p, \gamma)^3\text{He}$ , где в качестве мишени выбран твердый дейтированный полиэтилен.

В данном случае потребуются измерение гамма квантов около 3.5 мЭв двух плечах, поэтому необходимо одновременно считать два и более канала или анализировать данные с двух и более устройств.

Известно, что ионизирующее излучение (гамма и бета излучения) при взаимодействии со сцинтилирующим веществом порождает излучение в оптическом диапазоне в виде фотонов.

В физике сцинтилляторов первым и широко используемым фотодетектором стал фотоэлектронный умножитель. Соответственно, для регистрации фотонов была разработана детекторная система на основе ФЭУ.

## Структурная схема детекторов на основе ФЭУ



# Детекторная система на основе ФЭУ с BGO сцинтиллятором

Dimensions of BGO crystal is 20\*20\*40

Power supply – 5 V.

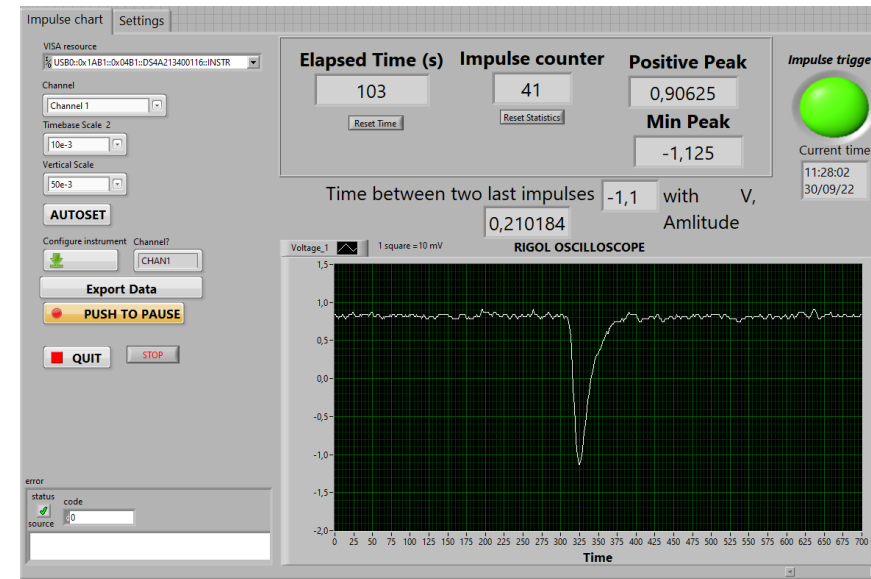
Internal high-voltage power supply circuit



Photon counting module  
with 32bit ARM controller Milandr



LV User interface for RIGOL DS4024



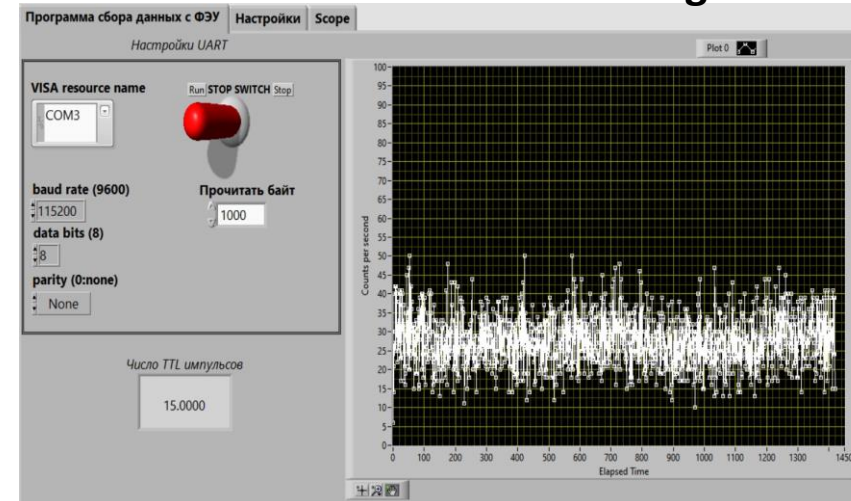
Single photoelectron

Amplitude 30-45mV, length 15-18 ns

BGO cosmic shower

Amplitude 160-250mV, length 500-600 ns

LV User interface for H7155 Counting module



# Одноканальные детекторы на основе ФЭУ для гамма спектроскопии

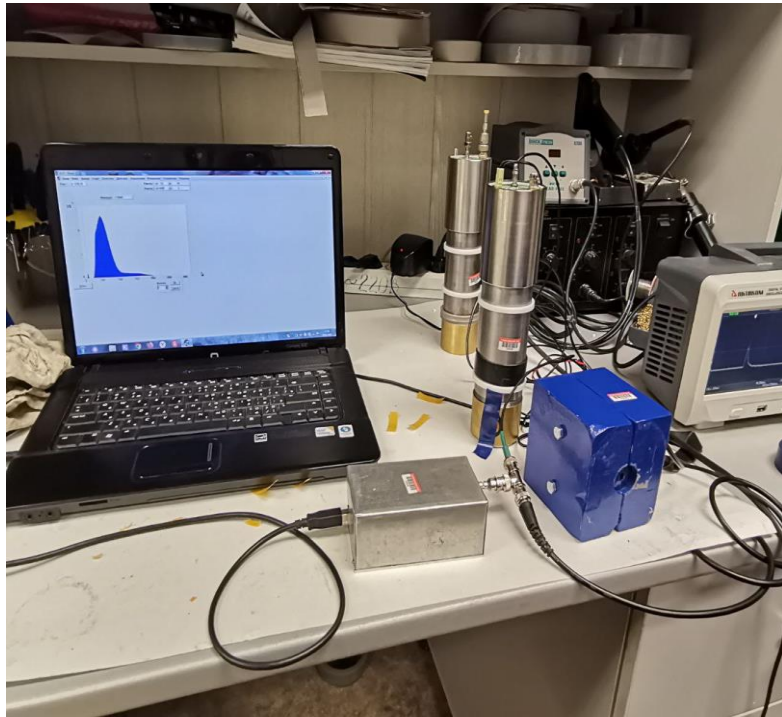


Рисунок 1. Общий вид детекторной системы.

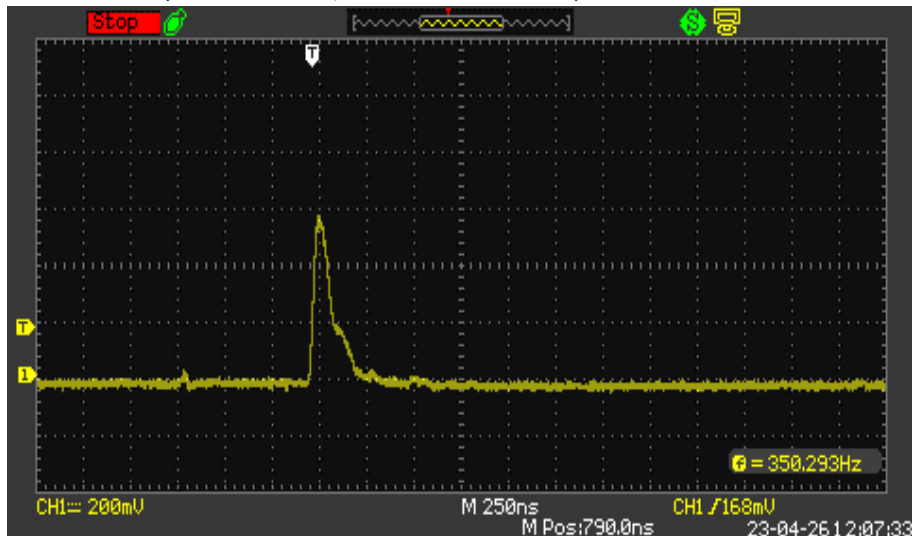


Рисунок 2. Аналоговый сигнал от Со60.

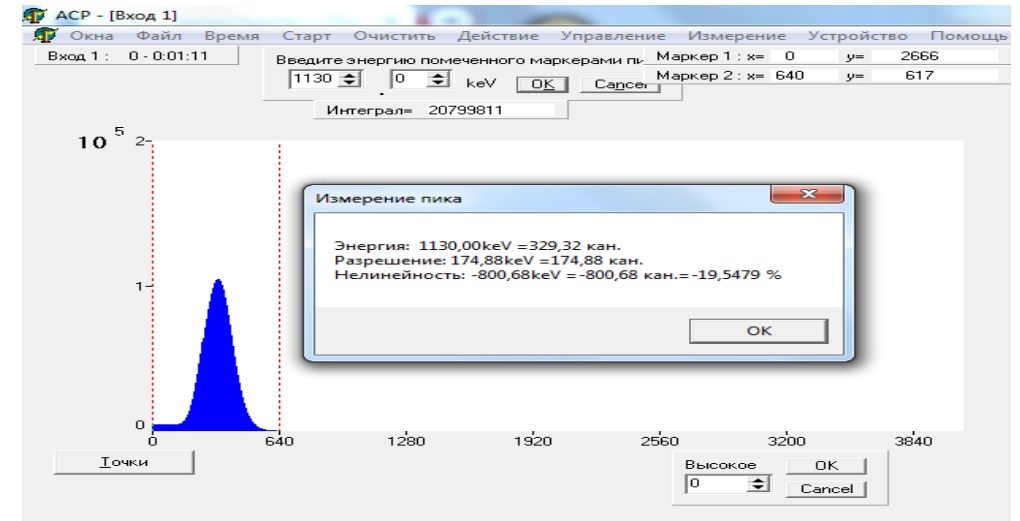


Рисунок 3 Спектр Cs137 в свинцовом коллиматоре  
Детектор 23505

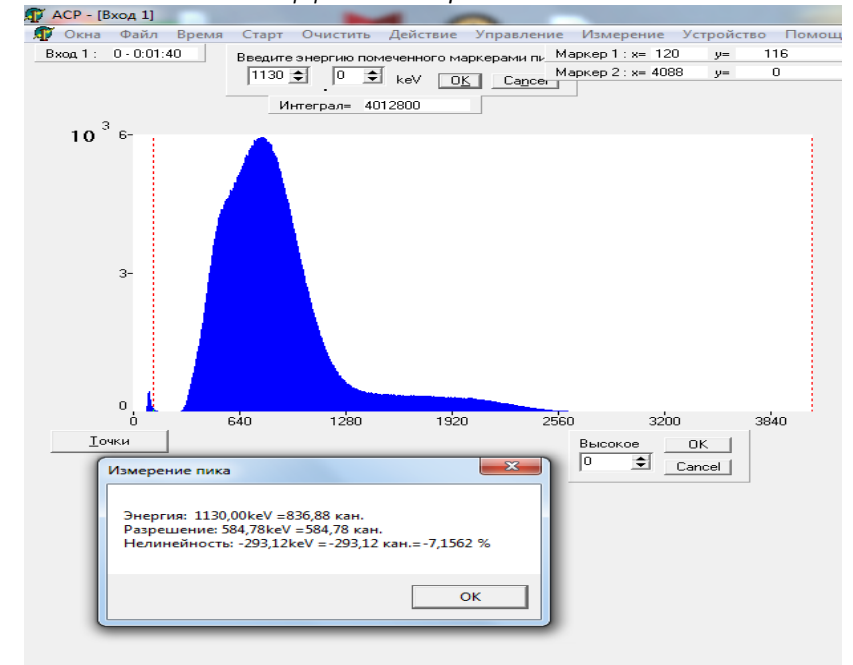


Рисунок 4.

Гамма спектр Со60. Детектор 23506 (Источник находится сбоку без свинцового кожуха)



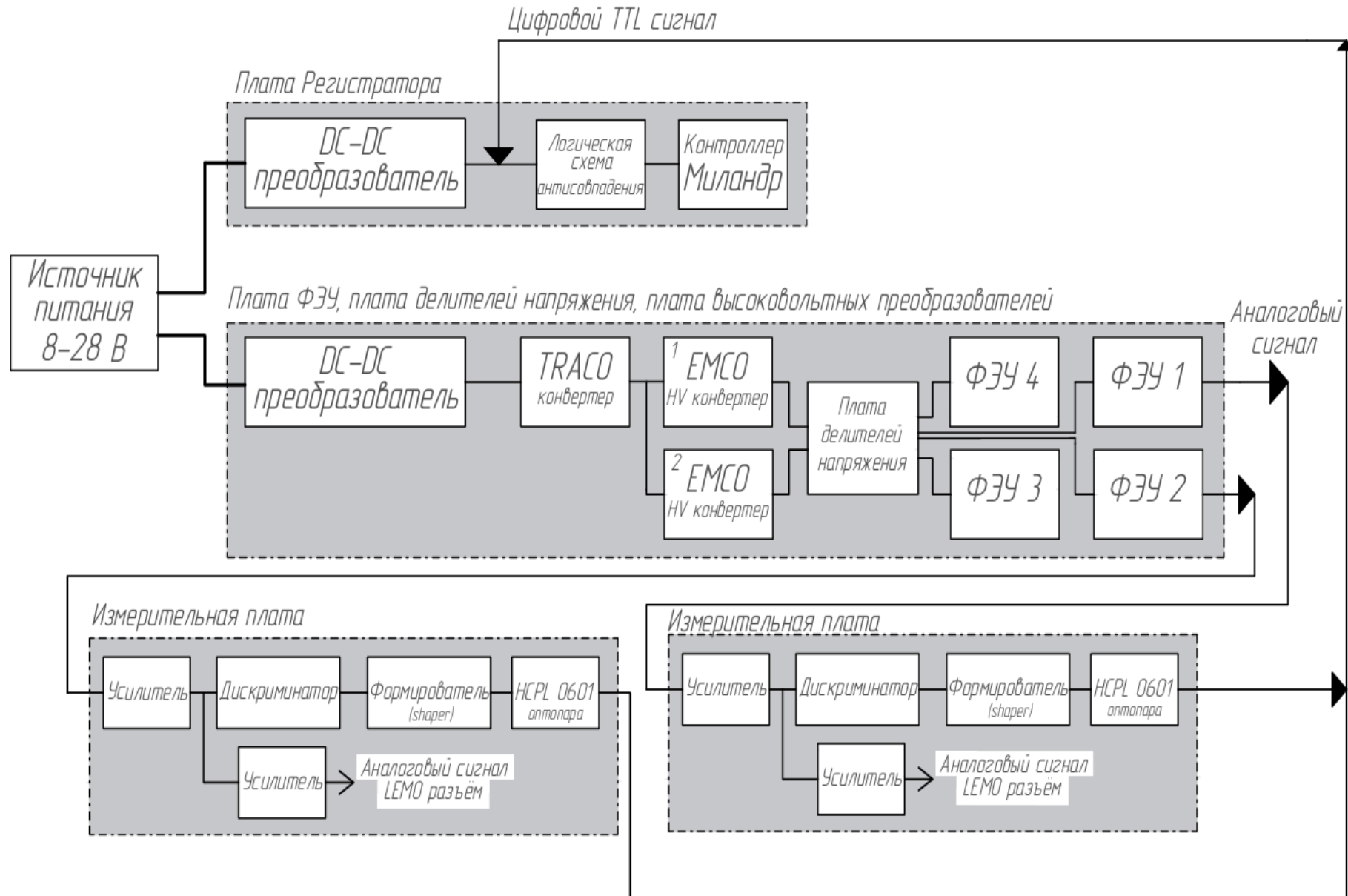
# Результаты:

- Разработан комплекс программных модулей в среде LabVIEW 2020 для полного цикла управления и мониторинга экспериментальной установки.
- Обеспечена интеграция с разнородным оборудованием через стандартные интерфейсы (UART, TCP/IP, Modbus TCP IP).
- Применена событийно-ориентированная архитектура для повышения надежности.

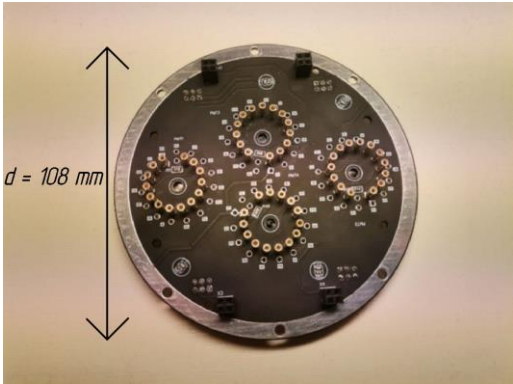
## Применение:

- Настоящее время:  
Эксплуатация в установке SPI (Source of Polarized Ions).
- Перспектива:  
Будущее применение в новой установке ApOL.  
(Absolute Polarimeter for SPD)

# Методика создания измерительной многоканальной системы



# Принцип модульности детекторной системы



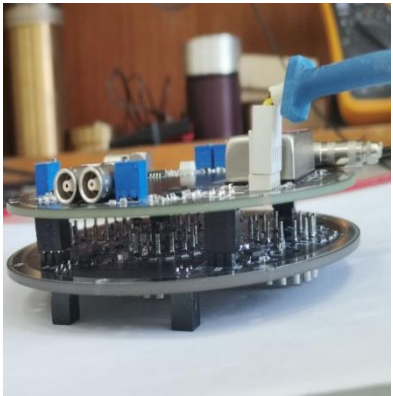
1. Плата делителей напряжения

|       | PMT 1     | PMT 2     | PMT 3     | PMT 4     |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| K1 =  | 0,2 Ом    | 0,2 Ом    | 0,2 Ом    | 0,3 Ом    |
| D1 =  | 1,08 МОм  | 1,234 МОм | 1,234 МОм | 1,082 МОм |
| D3 =  | 1,608 МОм | 2,007 МОм | 2,007 МОм | 1,609 МОм |
| D5 =  | 2,018 МОм | 2,779 МОм | 2,780 МОм | 2,019 МОм |
| D7 =  | 2,312 МОм | 3,551 МОм | 3,552 МОм | 2,313 МОм |
| D9 =  | 2,488 МОм | 4,323 МОм | 4,325 МОм | 2,489 МОм |
| A =   | 2,646 МОм | 5,193 МОм | 5,196 МОм | 2,646 МОм |
| D10 = | 2,532 МОм | 4,707 МОм | 4,710 МОм | 2,533 МОм |
| D8 =  | 2,414 МОм | 3,937 МОм | 3,939 МОм | 2,415 МОм |
| D6 =  | 2,180 МОм | 3,165 МОм | 3,166 МОм | 2,181 МОм |
| D4 =  | 1,828 МОм | 2,392 МОм | 2,394 МОм | 1,828 МОм |
| D2 =  | 1,359 МОм | 1,620 МОм | 1,621 МОм | 1,360 МОм |

|       | PMT 1    | PMT 2   | PMT 3   | PMT 4   |
|-------|----------|---------|---------|---------|
| D1 =  | 221,3 В  | 221,9 В | 221,9 В | 221,6 В |
| D2 =  | 286,7 В  | 287,1 В | 287,1 В | 286,7 В |
| D3 =  | 351,7 В  | 352,3 В | 352,2 В | 351,6 В |
| D4 =  | 417, 7 В | 418 В   | 418 В   | 417,6 В |
| D5 =  | 485 В    | 486 В   | 486 В   | 485 В   |
| D6 =  | 556 В    | 557 В   | 557 В   | 556 В   |
| D7 =  | 632 В    | 631 В   | 631 В   | 631 В   |
| D8 =  | 711 В    | 711 В   | 711 В   | 711 В   |
| D9 =  | 798 В    | 798 В   | 798 В   | 798 В   |
| D10 = | 894 В    | 894 В   | 894 В   | 894 В   |
| A=    | 991 В    | 992 В   | 991 В   | 991 В   |



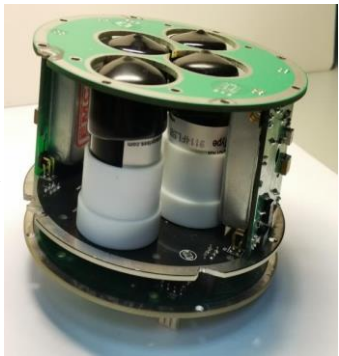
2. Измерительная плата  
(предусилители – усилители)



3. Делители +  
Измерительная плата



4. Сборка +  
Высоковольтные  
платы



5. Сборка + ФЭУ



6. Сборка +  
Регистратор

# Проверка работы двух каналов детекторной системы. Сравнение собственных темновых шумов ФЭУ

Использовал  
я четырёх -  
канальный

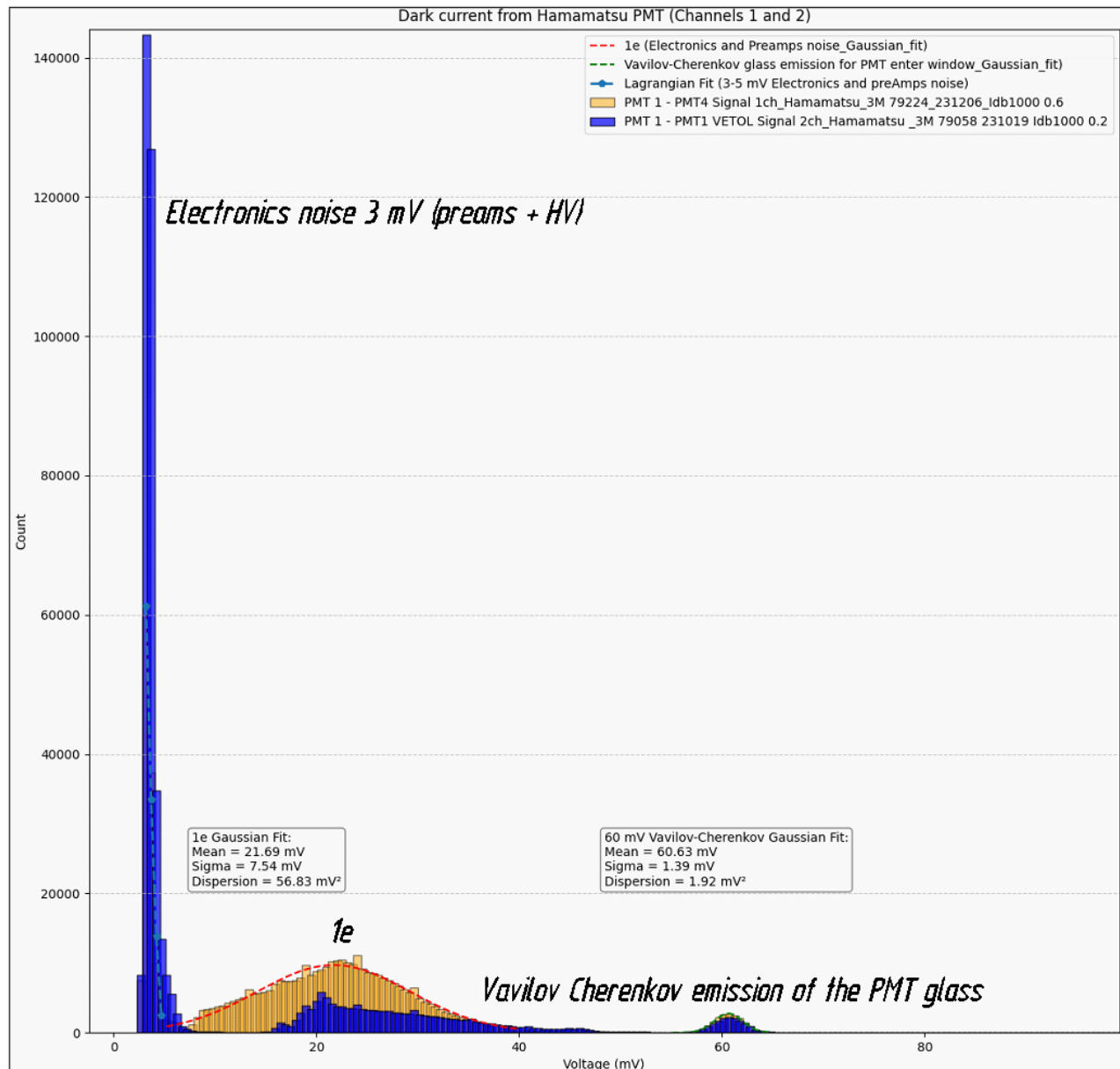
А

ЦП –

DRS4  
evaluation  
board, 5 GS/s,



с полосой  
пропускания  
700 МГц



Расчёт  
интенсивности  
для пика 60 mV:

$$\frac{N}{time} = \frac{1984}{19140} = 0,103$$

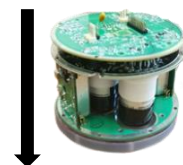
= 0.1 Hz  
Начало измерений  
9:35  
14:54

t = 5 часов 19 минут  
t = 19140 sec

N(60 mV):  
N\_1 канала = 1306  
N\_2 канала = 1984

Ширина  
одноэлектронног  
о пика =  
сигма вторичного  
динода

PMT window  
direction





# Spectrometer components



Detector (gamma-spectrometer) consists of

- 1) 10x10x30mm (size of active area) **scintillator CsI (Tl)**,
- 2) **SiPM** (SensL – Ireland),
- 3) Preamplifier,
- 4) **ADC**,
- 5) FPGA(Altera) and **Microchip** microprocessor unit with **USBxpress chip** (Silicon labs).

All components, are placed on 2 of the original circuit boards, including analog and digital electronics, signal processing circuit, and the full supply chain of the spectrometer.



It is configured as a monoblock with the digital interface connector.

This interface allows to connect to any external processing device via the USB.

Additionally the digital frequency output proportional to the level of ionizing radiation.

## Why CsI(Tl) ?

The scintillation crystal CsI(Tl) was chosen because of

- 1) its large light output [photons / MeV],
- 2) high atomic numbers,
- 3) as well as because of its peak in the spectrum of the luminescence peak sensitivity close to Si-PMT.

# Communication protocol

Port settings: **921600 / 8-N-1**;

Device communication works as “Request” – “Response” model.

All “Requests” и “Responses” – has their unique codes(see table):

| № | Name  | Code |      | Description              |
|---|-------|------|------|--------------------------|
|   |       | Dec  | Hex  |                          |
| 1 | ZDLE  | 24   | 0x18 | Prefix                   |
| 2 | ZDLEE | 88   | 0x58 | Exclusive prefix         |
| 3 | START | 240  | 0xF0 | Start of the data packet |
| 4 | STOP  | 15   | 0x0F | Конец пакета             |

## Example of request

| 0    | 1     | 2   | 3   | 4    | 5    |
|------|-------|-----|-----|------|------|
| ZDLE | START | CMD | CRC | ZDLE | STOP |

## Example of response

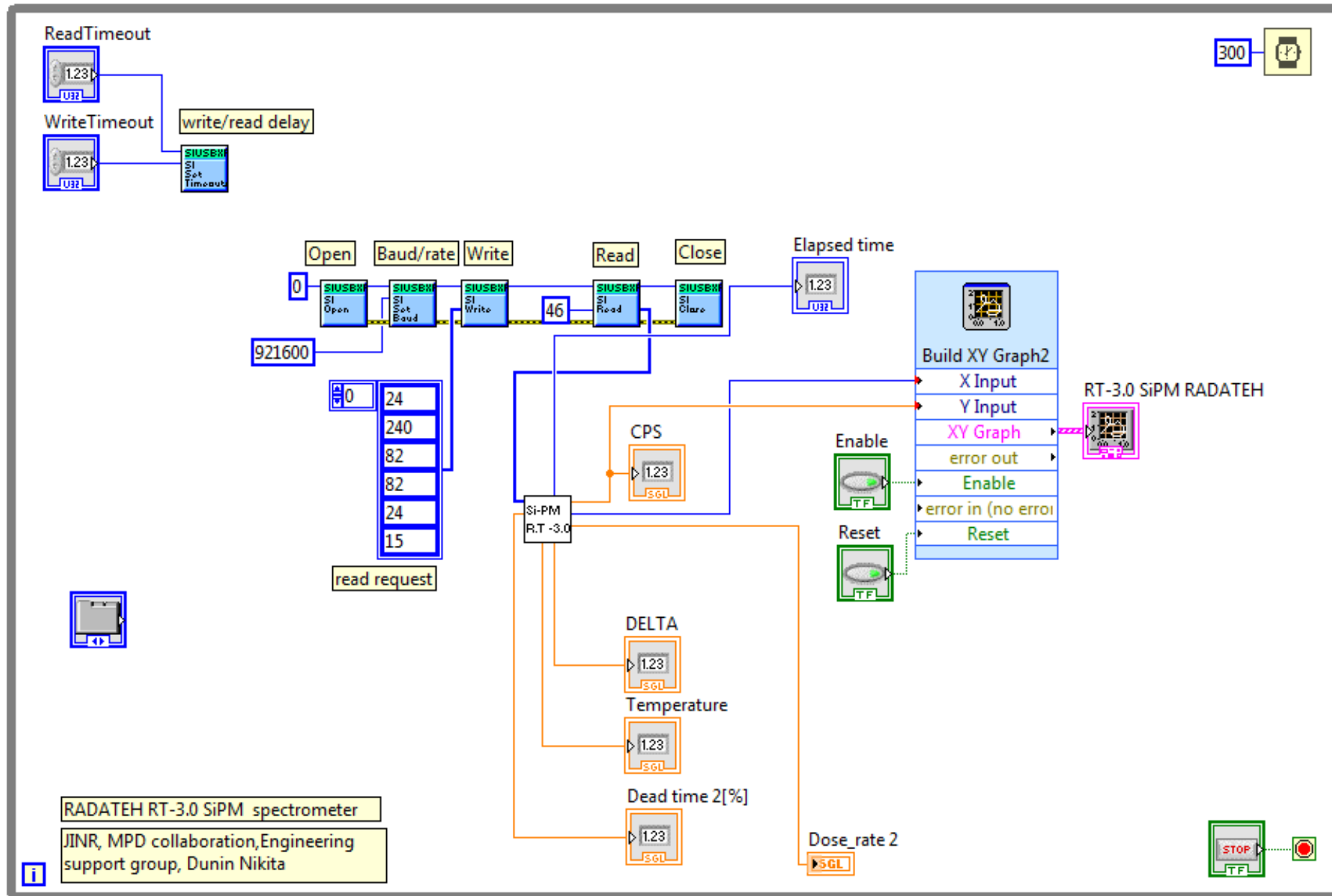
| 0    | 1     | 2   | 3    | ... | N+3  | N+4 | N+5  | N+6  |
|------|-------|-----|------|-----|------|-----|------|------|
| ZDLE | START | CMD | D[0] | ... | D[N] | CRC | ZDLE | STOP |

CRC - checksum

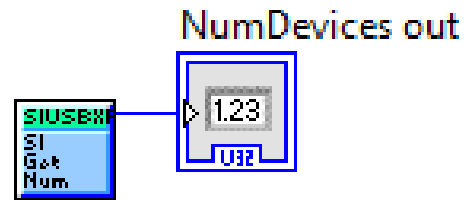
CRC – how to calculate it: First value of CRC is 0;

$CRC = CRC \text{ xor } CMD \text{ xor } D[0] \dots \text{ xor } D[N]$ .

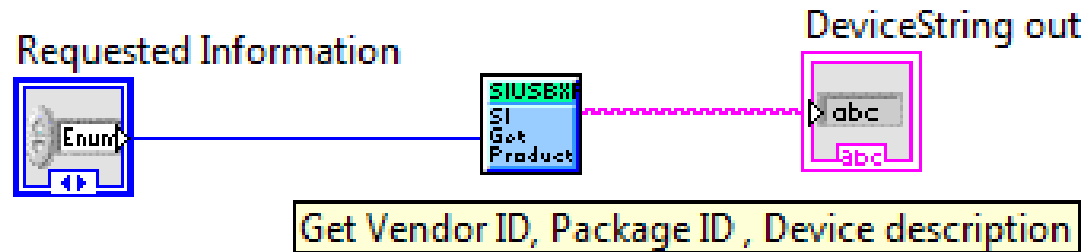
# Main algorithm



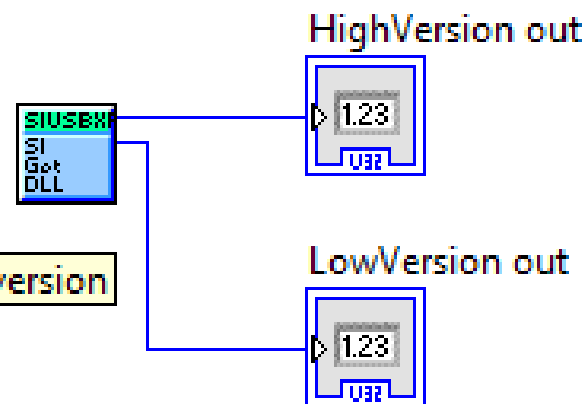
# USBxpress DLL library



Number of devices connected to HOST



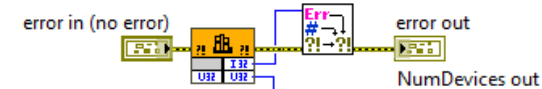
Get Vendor ID, Package ID , Device description



Get DLL version

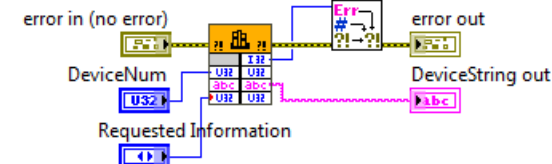
This function returns the number of devices connected to the host.

```
SI_STATUS WINAPI SI_GetNumDevices(  
LPDWORD lpdwNumDevices  
);
```

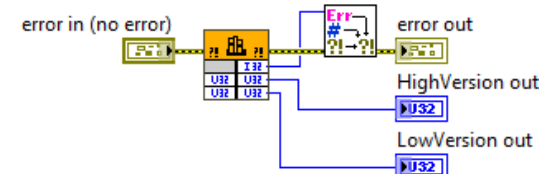


This function returns a null terminated serial number (S/N) string or product description string for the device specified by an index passed in DeviceNum. The index for the first device is 0 and the last device is the value returned by `SI_GetNumDevices - 1`.

```
SI_STATUS WINAPI SI_GetProductString(  
DWORD dwDeviceNum,  
LPVOID lpvDeviceString,  
DWORD dwFlags  
);
```



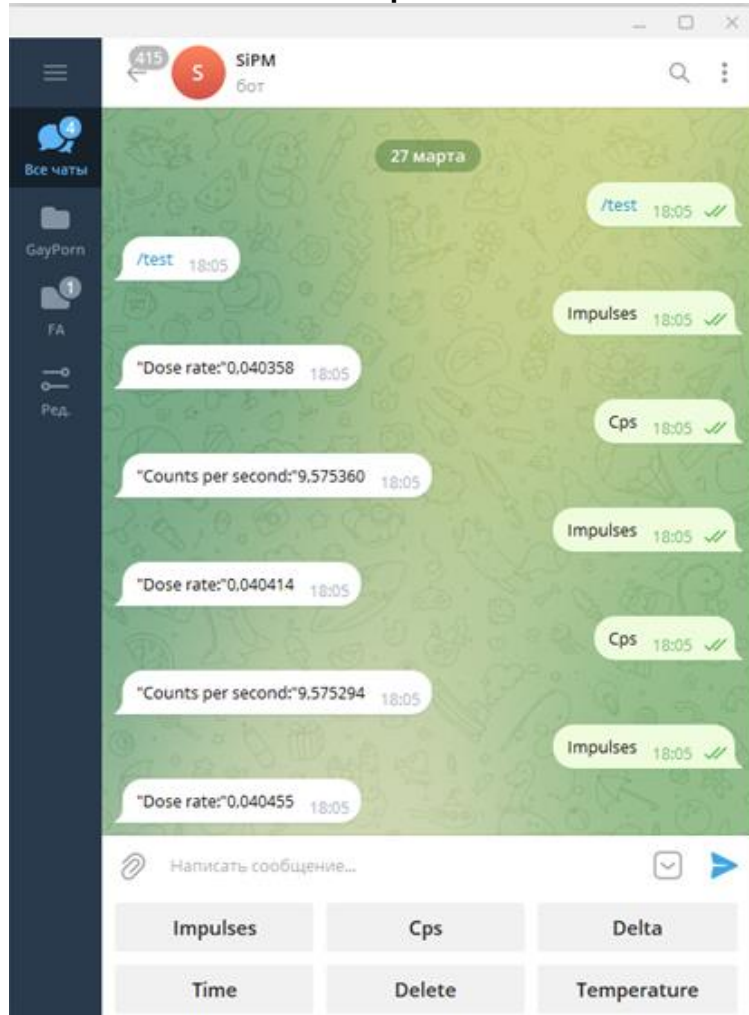
Obtains the version of the DLL that is currently in use. The version is returned in two DWORD values, HighVersion and LowVersion. This corresponds to version A.B.C.D where A = (HighVersion >> 16) & 0xFFFF, B = HighVersion & 0xFFFF, C = (LowVersion >> 16) & 0xFFFF and D = LowVersion & 0xFFFF.



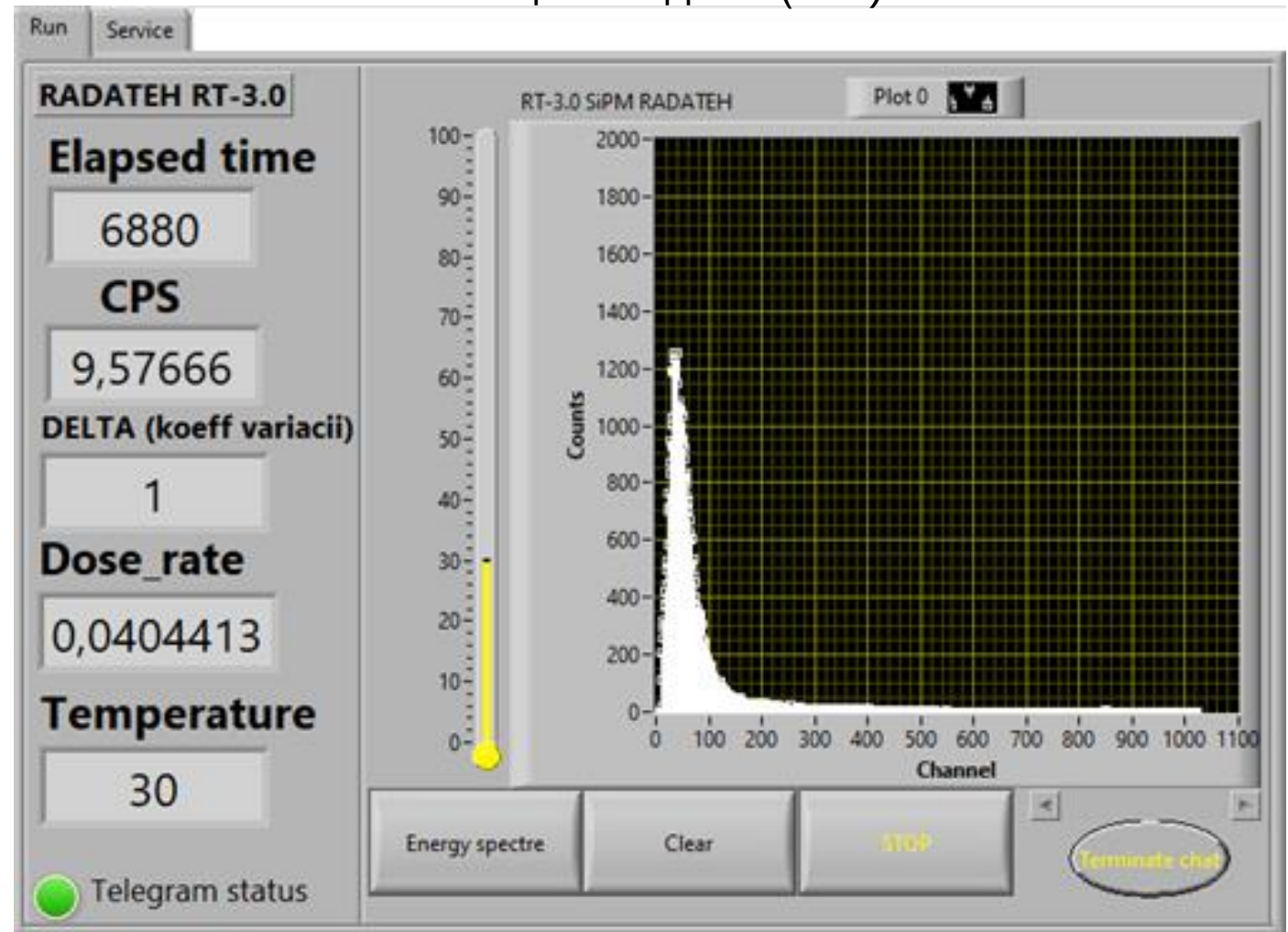


# Внешний мониторинг спектрометра через Telegram

Telegram-bot для  
обновления измеренных значений



Энергетический гамма-спектр и значение  
мощности дозы (uSv)



# Features:

- Wide temperature range (**-10 to 55°C**);
- Average service life - not less than **15 years**;

## 1) Magnetic field resistance

*magnetic fields of industrial frequency with a voltage of 800 A / m, quality criterion - A;*

## 2) Sinusoidal vibration resistance

*sinusoidal vibration in the frequency range from 10 to 500 Hz and an offset amplitude for frequencies below the transition frequency of 0.075 mm;*

**3)Strokes resistance** *with an acceleration of 100 m / s<sup>2</sup>, a shock pulse duration of 2 - 50 ms, a shock repetition rate of 60 -180 per minute.*

# Possibility usage:

- Dosimetry systems

to assess the extent of damage of the radioactive equipment for personal dosimetry.

| 1.  | Modes of operation                                                                                  | Amplitude analysis of gamma radiation, measurement of EDR and ED of photon radiation.            |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.  | Dose rate range of gamma-radiation                                                                  | 0.01 – 5000uSv/h                                                                                 |
| 3.  | Energy range of gamma-radiation                                                                     | from 20 keV to 2.5 MeV, from -10 to 55°C                                                         |
| 4.  | Settings range thresholds DR                                                                        | from 0.01 to 5000 uSv/h                                                                          |
| 5.  | Instability of readings when measuring the dose rate for continuous operation 8 hours, no more than | 5 %                                                                                              |
| 6.  | Calibration less than                                                                               | 60 sec                                                                                           |
| 7.  | Terms of Use:<br>- ambient temperature range;<br>– the relative humidity;<br>– atmospheric pressure | <b>from -10 to 55°C;</b><br><br>up to 98% when 35°C;<br>from 84 to 106.7 kPa                     |
| 8.  | Ingress Protection                                                                                  | IP65                                                                                             |
| 9.  | Power consumption                                                                                   | 25 mW                                                                                            |
| 10. | Indicators of reliability                                                                           | <b>MTBF - not less than 20000 hours;</b><br><b>average service life - not less than 15 years</b> |
| 11. | Interface                                                                                           | -USB<br><br>-RS485, CAN ( its possible with hardware and firmware upgrade)                       |
| 12. | Dimensions                                                                                          | 20x30x60 mm                                                                                      |
| 13. | Connector                                                                                           | 1 – GND;<br>2 - + (4 – 12)V;<br>3 - +D (CAN L);<br>4 - -D;<br>5 - Alarm                          |