

СИСТЕМА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ЭКСПЕРИМЕНТА DSS НА НУКЛОТРОНЕ ОИЯИ

С. М. Пиядин^{а,1}, В. П. Ладыгин^а, А. В. Пиляр^а, С. Г. Резников^а, М. Янек^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Университет «Жилина», Жилина, Словакия

Описывается 8-канальная система высоковольтного питания, основанная на использовании модуля «Wenzel Elektronik N1130». Приводятся характеристики управляющих модулей 8DAC-12 и 8ADC-14 стандарта CAMAC, разработанных для высоковольтной системы. Данная система успешно применялась для обеспечения питания сцинтилляционных детекторов в экспериментах по изучению структуры легких ядер на нуклотроне ОИЯИ.

An 8-channel high-voltage power system based on the use of the module “Wenzel Elektronik N1130” is described. Specifications of control modules 8DAC-12 and 8ADC-14 designed for the high-voltage systems in CAMAC standard are presented. This system was successfully used to provide the power scintillation detectors in experiments on the study of the structure of light nuclei at the JINR Nuclotron.

PACS: 21.45.-v; 07.50.-e; 07.05.Bx

ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) — распространенный детектор оптического излучения, часто используемый в физических установках для регистрации событий. На выходе ФЭУ возникают электрические сигналы, несущие информацию об исследуемом излучении. В физическом эксперименте необходимо обеспечить стабильность коэффициента усиления ФЭУ и минимизировать влияние шумов, возникающих в умножителе [1,2], что важно для последующей передачи и анализа данных.

Обычно в экспериментах необходимо использовать одновременно несколько счетчиков. При этом в системах с большим количеством детекторов для каждого фотоэлектронного умножителя необходимо устанавливать оптимальное напряжение питания и изменять его в ходе эксперимента [3]. Количество ФЭУ, используемых в современных экспериментах, во многих случаях является чрезвычайно большим [4]. Использование данных систем питания в физических экспериментах с малым количеством детектирующей аппаратуры, когда речь идет о нескольких или нескольких десятках каналов, является неудобным и дорогостоящим.

¹E-mail: piyadin@jinr.ru

На сегодняшний день существует большой выбор разнообразных высоковольтных источников для физических экспериментов. Стоит отметить необходимость использования высоковольтных систем питания в физических экспериментах для детектирующей аппаратуры с защитами от перегрузок по каждому каналу. Так, в работе [5] описывается многоканальная система питания фотоумножителей, в которой предусмотрена защита от перегрузки по каждому из 64 каналов. Однако данный вариант системы высоковольтного питания основан на использовании источника ВС-28 и не имеет возможности управления и мониторинга напряжения с помощью компьютера.

Многоканальная высоковольтная система, представленная в [6], предназначена для питания больших массивов ФЭУ (30–10 000 каналов) в крупных физических экспериментах. Стоит отметить, что данная система позволяет достичь потерь менее 0,05 Вт/канал, и отсутствуют дорогостоящие высоковольтные кабели, так как в этой системе используется метод генерации высокого напряжения непосредственно в месте его потребления. Одним из важнейших недостатков использования таких систем в малых и средних физических экспериментах является высокая средняя цена на канал. Кроме того, теряется универсальность высоковольтной системы, так как для каждого типа ФЭУ необходимо приобретать отдельную ячейку.

Для получения хорошо стабилизированного высокого напряжения для каждого канала уделяют особое внимание системе питания детектирующей аппаратуры. В больших физических установках зачастую изготавливают системы питания с большим числом каналов и с диапазоном напряжения для используемых детектирующих элементов. Так, для электромагнитного калориметра CMS совместно с компанией CAEN был разработан источник высоковольтного питания с долговременной стабильностью порядка 0,2 % и максимальным выходным напряжением 500 В [7].

Описываемая в данной работе система высоковольтного питания создана в рамках проекта «Deuteron Spin Structure» (DSS), который направлен на получение информации о спин-зависимой части 2- и 3-нуклонных сил из двух процессов: dp -упругого рассеяния и реакции развала дейтрона на нуклотроне ОИЯИ [8, 9]. Изучение обеих реакций основано на использовании информации, полученной с помощью сцинтилляционных счетчиков [10]. Все детекторы состоят из обычного органического сцинтиллятора, а съем информации со сцинтилляторов осуществляется с помощью различных ФЭУ.

Созданная система высоковольтного питания ФЭУ рассчитана на восемь каналов, но может быть свободно адаптирована для большего числа каналов. Данная высоковольтная система успешно применялась для питания ФЭУ в физических экспериментах на нуклотроне ОИЯИ.

Статья организована следующим образом: в разд. 1 описывается общая схема системы высоковольтного питания; в разд. 2 приведены основные характеристики высоковольтного модуля «Wenzel Elektronik N1130»; разд. 3 описывает модуль 8DAC-12 стандарта САМАС, разработанный для системы высоковольтного питания; в разд. 4 приводятся характеристики модуля 8ADC-14 стандарта САМАС, который также был разработан для системы высоковольтного питания; в разд. 5 описывается система медленного контроля, которая основана на использовании пакета MIDAS и обеспечивает управление высоковольтной системой питания с помощью компьютера; в заключении содержатся основные выводы.

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

В проекте DSS используются ФЭУ-85 с диодно-емкостными умножителями напряжения [6], ФЭУ со встроенными делителями и ФЭУ-63 с резистивными делителями. В эксперименте по изучению реакции развала дейтрона для ФЭУ-63 применяются обычные резистивные делители без дополнительной подпитки последних диодных промежутков [10, 11]. Высоковольтная система (ВС) для ФЭУ с резистивными делителями удовлетворяет таким требованиям, как:

- диапазон рабочего напряжения для ФЭУ 0–3 кВ;
- независимая регулировка напряжения каждого ФЭУ в пределах рабочего диапазона с помощью компьютера;
- точность изменения напряжения < 10 В;
- аппаратное и программное ограничения по току и напряжению во избежание выгорания элементов детектирующей аппаратуры и самой высоковольтной системы;
- возможность увеличения числа каналов для питания ФЭУ, а также возможность использования ВС для газовых детекторов.

Этому удовлетворяет модуль «Wenzel Elektronik N1130» [12]. Для реализации независимого управления и контроля каждого канала были специально разработаны и использованы цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) стандарта SAMAC (Computer Aided Measurement and Control). Для управления модулями SAMAC использовался крейт-контроллер ССРС6 (Crate Controller Personal Computer), разработанный в ЛФВЭ ОИЯИ [13]. Для управления каналами с помощью компьютера в качестве программного обеспечения за основу был взят программный пакет MIDAS [14]. На рис. 1 представлена общая блок-схема ВС для питания ФЭУ-63.

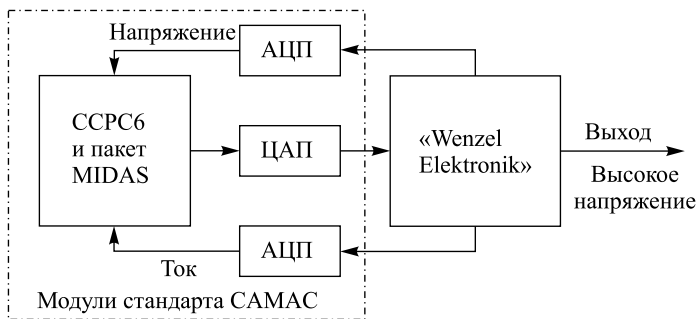


Рис. 1. Блок-схема высоковольтной системы питания

Управление высоким напряжением осуществляется с помощью ССРС6 и установленным на нем пакетом программ MIDAS. Связь ССРС6 с модулем ЦАП происходит по шине SAMAC. Далее установленное напряжение на каждом канале ЦАП передается на вход модуля «Wenzel Elektronik N1130». С выходов модуля «Wenzel Elektronik N1130» считываются сигналы с помощью двух модулей АЦП для мониторинга выходного напряжения и потребляемого тока. Эта информация с модулей АЦП по шине SAMAC считывается через ССРС6.

Ниже подробно описан каждый элемент представленной ВС.

2. МОДУЛЬ «WENZEL ELEKTRONIK N1130»

Модуль высоковольтного питания «Wenzel Elektronik N1130» (N1130) предназначен для установки в NIM (Nuclear Instrument Module) крейт. Основные характеристики данного модуля приведены в таблице.

Характеристики модуля «Wenzel Elektronik N1130»

Характеристика модуля	Цифровое значение
Число каналов	4
Выходное напряжение и ток	До 3 кВ (0–3 мА) До 6 кВ (0–0,5 мА)
Напряжение питания	~ 220 В ~ 117 В ±24 В
Стабильность напряжения	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$

Кроме данных параметров следует отметить следующие его характеристики:

- возможность выбора полярности выходного напряжения для каждого канала в отдельности с последующей индикацией на панели;
- возможность регулирования выходного напряжения с помощью потенциометра, расположенного на передней панели модуля;
- возможность регулирования выходного напряжения с помощью аналогового сигнала 0–6 В;
- наличие аналоговых сигналов, пропорциональных выходному напряжению и потребляемому току;
- возможность установки предельных значений выходного напряжения и тока для каждого канала на передней панели.

В экспериментальной части проекта DSS, а именно для изучения реакции развала дейтрона, используются 8 ΔE – E -детекторов, таким образом, необходимо подавать высокое напряжение на 8 ФЭУ-63. Для этой цели использовалось два 4-канальных модуля N1130.

3. ЦИФРОАНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ 8DAC-12

ЦАП 8DAC-12, выполненный в стандарте CAMAC, был специально разработан для ВС, основанной на использовании высоковольтных модулей «Wenzel Elektronik N1130». Модуль 8DAC-12 имеет ширину в одну станцию стандарта CAMAC [15]. Краткие характеристики ЦАП модуля стандарта CAMAC следующие:

- количество каналов — 8;
- выходные токи (на канал) — до 20 мА;
- выходное напряжение — от 0 до +4,096 В;
- разрядность — 12 бит;
- время установления — 6 мкс;
- предварительная установка в «ноль» всех выходов при включении питания;
- контроль установленных в каналах кодов;
- одновременный сброс всех каналов.

Модуль ЦАП предназначен для независимой установки напряжения на каждом канале модуля «Wenzel Elektronik N1130». Управление модулем ЦАП осуществляется по шине САМАС с помощью следующих команд:

- A(0) F(9) или C — сброс всех выходов в «ноль».
- A(k) F(0) — чтение информации в соответствующих каналах ЦАП (с 0 по 7).
- A(k) F(16) — запись информации в соответствующие каналы ЦАП (с 0 по 7).

4. АМПЛИТУДНО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ 8ADC-14

АЦП 8ADC-14, выполненный в стандарте САМАС, был специально разработан для ВС, основанной на использовании высоковольтных модулей «Wenzel Elektronik N1130». Конструктивно модуль 8ADC-14 занимает ячейку САМАС однократной ширины [15]. Краткие характеристики АЦП модуля стандарта САМАС следующие.

- Аналоговые входы:
количество входов — 8;
входное сопротивление — 100 кОм;
входные сигналы — -5 В до $+5$ В.
- Разрешение АЦП:
14 бит (14 разряд знаковый);
вся шкала — 16384;
шаг квантования 1 м. р. = 0,6104 мВ.
- Интегральная нелинейность: 1 м. р.
- STROBE: по положительному перепаду происходит запоминание входного аналогового сигнала в Track-Hold;
входное сопротивление — 50 Ом;
уровни сигнала — NIM ($-0,8$ В);
длительность импульса — 35 нс;
задержка сигнала STROBE внутри блока — 20 нс.

Данный модуль АЦП разрабатывался для независимого мониторинга выходного напряжения и потребляемого тока на каждом выходе модуля «Wenzel Elektronik N1130». Управление и считывание значений с модуля АЦП происходит по шине САМАС с помощью следующих функций:

- A(k) F(0) — чтение данных из регистров для $k = (0$ до $7)$ каналов;
- A(0) F(8) — проверка LAM, $Q = LAM$;
- A(0) F(9) — сброс регистров и LAM;
- A(0) F(10) — сброс LAM;
- A(0) F(11) — разрешение внутреннего строба (выставляется при включении питания);
- A(0) F(24) — запрет LAM (выставляется при включении питания);
- A(0) F(25) — внутренний строб сигнал (запись в АЦП);
- A(0) F(26) — разрешение LAM;
- A(0) F(27) — разрешение внешнего строба (запрет внутреннего).

Для управления и мониторинга точных значений напряжения и тока с помощью данного модуля необходимо откалибровать АЦП каждого канала. Для получения калибровочных коэффициентов, а также проверки стабильной работы всей системы без

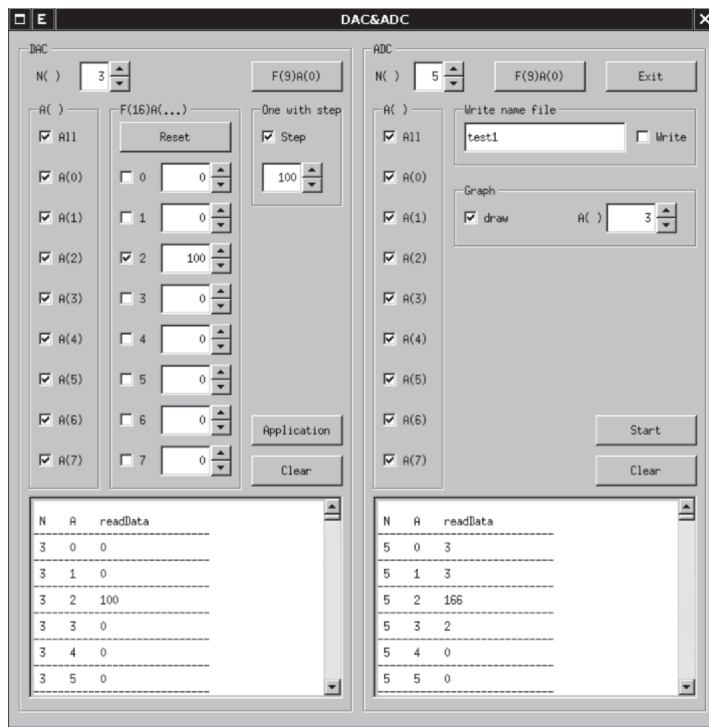


Рис. 2. Графический интерфейс программы для калибровки модуля АЦП

подключения модуля «Wenzel Elektronik N1130» было разработано программное обеспечение на языке программирования C++ с использованием пакета ROOT [16] под операционную систему LINUX. Система состояла из одного откалиброванного модуля ЦАП, одного модуля АЦП и крейт-контроллера СРС6. Для работы с помощью программного обеспечения в представленной системе все выходы с модуля ЦАП были соединены со входами АЦП. При данной конфигурации системы возможно получение калибровочных коэффициентов для всех восьми каналов одного модуля АЦП. Графический интерфейс программы для проверки стабильности и получения калибровочных коэффициентов представлен на рис. 2.

Программа выполняет следующее:

- выбор станции в крейте САМАС для модулей ЦАП и АЦП;
- сброс модулей в начальное состояние;
- установку «нуля» в модуле ЦАП (кнопка «Reset»);
- запись в каждый канал ЦАП определенного цифрового значения;
- циклическую запись на каждый выход ЦАП с определенным пользователем шагом;
- демонстрацию записи и чтения для обоих модулей в окне выдачи;
- запись в файл всех данных и с ЦАП, и с АЦП модулей.
- в режиме с шаговым циклом пользователь может выбирать построение графика для исследуемого канала;
- удаление истории в окне выдачи.

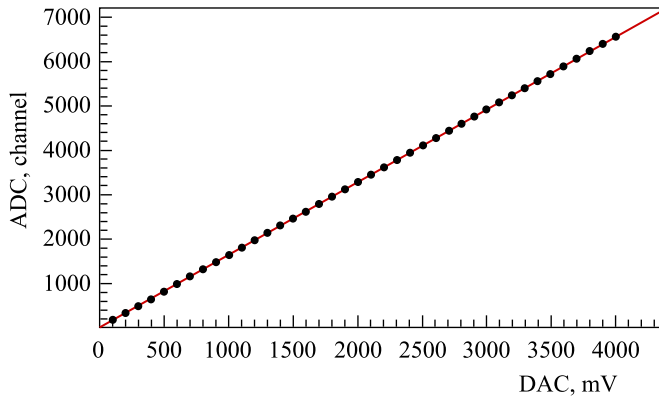


Рис. 3. График зависимости считываемого значения с АЦП от задаваемого значения на ЦАП

Например, на рис. 2 можно видеть, что на третий выход ЦАП постоянно будет подаваться значение 100, а остальные каналы будут работать в цикле повышения напряжения с шагом 100. В окне выдачи для ЦАП и АЦП можно наблюдать процесс записи и чтения значений с модулей. В результате выполнения программы будет построен график зависимости значения АЦП от входного значения с ЦАП для четвертого канала (рис. 3).

Полученные значения аппроксимировались на всем промежутке двумя полиномами: первой и второй степени. Полученные значения дают одинаковый результат, что говорит о линейной зависимости на всем рабочем диапазоне АЦП. Из формулы линейного уравнения

$$y = a_k + b_k x \quad (1)$$

вычислялись калибровочные коэффициенты. Здесь y — входное значение с ЦАП в мВ; x — полученное значение АЦП в отчетах; k — нумерация каналов; a_k — пьедестал; b_k — коэффициент линейной зависимости выходных значений от входных значений напряжения для k -го канала АЦП. Типичное значение полученных коэффициентов a_k и b_k составляло 4–5 и 0,6104 мВ соответственно. Погрешность измерения коэффициента b_k составляла $5 \cdot 10^{-5}$, а отклонение от номинала равнялось $6 \cdot 10^{-4}$.

Кроме того, с помощью данной программы также проверялась надежность алгоритма выполнения команд САМАС. Это осуществлялось постоянным чтением информации всех восьми каналов АЦП. Этот алгоритм применялся для реализации «on-line» управления ВС с помощью компьютера и пакета MIDAS.

5. СИСТЕМА МЕДЛЕННОГО КОНТРОЛЯ

Для реализации системы медленного контроля и управления с помощью персонального компьютера за основу был взят пакет MIDAS (Maximum Integrated Data Acquisition System — максимально интегрированная система сбора данных) [14]. MIDAS состоит из библиотек, написанных на языке С, и нескольких приложений, которые могут работать на различных платформах, таких как UNIX-подобные, Windows, VxWorks и т. д.

Система медленного контроля организуется в объектно-ориентированном виде посредством трех уровней вызова: класс драйверов, устройство и шина. Каждый драйвер

класса относится к конкретному множеству функциональности данного класса, такому как: высокое напряжение, температура, общий канал ввода–вывода, магнит и т. д. Осуществлением вызова устройств занимается второй уровень или драйвер устройства, тогда как текущие аппаратные средства задействуются на третьем уровне посредством драйвера шины.

Для реализации управления и контроля высоким напряжением с помощью пакета MIDAS были разработаны два драйвера: *scrbscat* и *n1130*, которые впоследствии были использованы вместе с данным пакетом.

scrbscat представляет собой драйвер шины CAMAC. В данном драйвере были объявлены функции, команды стандарта CAMAC: сброс, чтение, запись, запрет, разрешение и т. д.

Программный модуль *n1130* выполняет функцию драйвера устройства. В данном драйвере заложена логика выполнения определенных команд, которые необходимы для записи значения в ЦАП и инструкций для чтения информации, поступающей на входы АЦП. В данном коде использованы функции, которые содержатся и объявлены в MIDAS для полноценной работы всех приложений и утилит данного пакета.

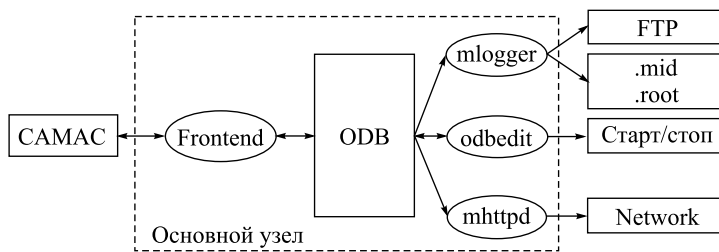


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления высоковольтной системой с помощью пакета MIDAS

Данные две программы обеспечивают заполнение массива переменных в базе данных (ODB на рис. 4). Frontend — программный модуль, который автоматически получает задаваемые переменные из ODB, передает данные значения на ЦАП, и измеренные значения с АЦП отсылаются в ODB. Все эти операции программный модуль frontend осуществляет непосредственно с помощью драйверов *n1130* и *scrbscat*. Все остальные модули, которые входят в состав основного узла, имеют право только на чтение измеренных значений из ODB. Утилита *mlogger* позволяет вести запись в файл всех данных, полученных от запущенных процессов. Формат этих данных выбирает сам пользователь. Данный программный модуль сохраняет данные независимо от команд пользователя для визуализации информации другими приложениями. Программный модуль *mhttpd* дает возможность с помощью браузера управлять процессом сбора данных с любого компьютера, который имеет подключение к глобальной сети Internet. Также имеется возможность настройки ограниченного доступа с помощью пароля.

На рис. 5 представлен внешний вид окна status программы *mhttpd*, которая входит в пакет MIDAS. В данном окне продемонстрированы следующие возможности управления и визуализации:

- индикация запущенных программ на данном компьютере;
- индикация запущенных процессов систем сбора данных;

MIDAS experiment "hv"				Wed Jun 24 17:26:38 2009 Refr:10					
Start	ODB	CNAF	Messages	ELog	Alarms	Programs	History	Config	Help
Run #0	Stopped		Alarms On	Restart No	Data dir: /root/midas/hv/				
Start: Tue Sep 09 15:04:42 1997				Stop: Tue Sep 09 15:04:42 1997					
Equipment	FE Node	Events	Event rate[/s]	Data rate[kB/s]	Analyzed				
HV	SC Frontend@lns03cc	0	0.0	0.0	N/A				
Channel		Active	Events	MB written	GB total				
0		Yes	0	0.000	0.000				
17:20:46[mhttpd] Program mhttpd on host lns03cc started									
ODBEdit [lns03cc]			Logger [lns03cc]			SC Frontend [lns03cc]			
mhttpd [lns03cc]									

Рис. 5. Внешний вид окна status программы mhttpd, входящей в состав пакета MIDAS

- запуск и остановка записи данных в файл;
- переход к другим приложениям.

Представленный на рис. 6 график демонстрирует работу ВС во времени. Пользователь имеет возможность выбора цветовой и поканальной информации. Данная опция доступна только при выполнении трех программ: ODBedit, mlogger, mhttpd. Пользователь может просматривать историю изменения напряжения с момента исполнения вышеуказанных программных модулей независимо от того, была ли осуществлена запись в файл или нет. Также на графике указываются отметки начала записи и остановки файла, и выводится имя этого файла.

Установка и контроль напряжения и тока осуществляется во вкладке графического интерфейса HV программы mhttpd (рис. 7). В данной оболочке перед пользователем открывается весь список работающих каналов. Нумерация каналов начинается с «0». Поль-

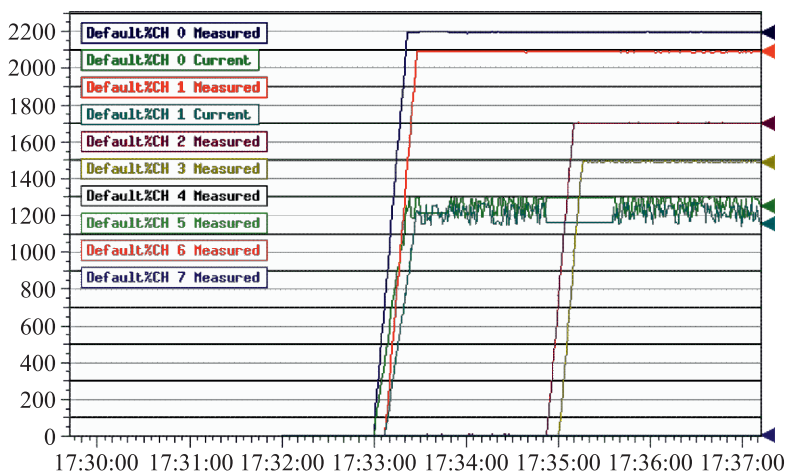


Рис. 6. График изменения выходного напряжения и потребляемого тока со временем, отображаемый в окне history

MIDAS experiment "hv"		Wed Jun 24 17:15:55 2009	
ODB		Status	Help
Equipment: HV			
Groups: All Default			
Names	Demand	Measured	Current
CH 0	2200	2200	1300,6
CH 1	2100	2100	1243,7
CH 2	1700	1700	936,9
CH 3	1500	1500	0
CH 4	0 <input type="text"/> Set	0	0
CH 5	0	0	0
CH 6	0	0	0
CH 7	0	0	0

Рис. 7. Окно программы mhttpd эксперимента HV

зователь в столбце «Demand» вводит необходимые напряжения. После ввода пользователем любого значения начинается процесс постепенного поднятия напряжения, который происходит в несколько этапов, заложенных в алгоритме драйвера *n1130*. В столбцах «Measured» и «Current» отображаются измеренные значения, которые получены с АЦП. На рис. 7 видно, что в четвертом канале CH3 ток равен «нулю», что означает, что на данном выходе модуля «Wenzel Elektronik» нет нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и введена в эксплуатацию управляемая система высоковольтного питания ФЭУ для экспериментов на нуклотроне ОИЯИ. Разработаны модули 8DAC-12 и 8ADC-14 для управления высоковольтным источником напряжения «Wenzel Elektronik N1130». Создано программное обеспечение для получения калибровочных коэффициентов АЦП и проверки работы модулей САМАС. Написаны драйверы для управления ВС и программным пакетом MIDAS.

Данная система имеет следующие характеристики:

- диапазон напряжения и тока: до 3 кВ (0–3 мА), до 4 кВ (до 0,5 мА);
- независимую регулировку напряжения в каждом канале;
- индикацию выходного напряжения и потребляемого тока;
- возможность просмотра истории изменения напряжения с момента запуска системы;
- запись в файл всех данных, полученных от ВС.

Система используется на внутренней мишени нуклотрона-М в рамках проекта DSS. Она показала надежную, стабильную работу во время набора данных. В настоящее время данная ВС применяется как в экспериментах по изучению развала дейтрона и *dp*-упругого рассеяния [8, 9], так и для тестирования других детекторов и ФЭУ.

Данная система может быть легко расширена за счет увеличения модулей «Wenzel Elektronik N1130», управляемых посредством ЦАП и АЦП стандарта САМАС. Кроме того, она может быть использована для обеспечения питания газовых детекторов.

Работа частично поддержана грантом молодых ученых и сотрудников ОИЯИ и грантом РФФИ 13-02-00101а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цитович А. П. Ядерная электроника. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Атанасов И. Х., Русанов И. Р. Источник высоковольтного напряжения для питания ФЭУ // Письма в ЭЧАЯ. 2000. Т. 100, № 3. С. 62–66.
4. Божко И. И., Кравцов В. И. Система высоковольтного питания ФЭУ жидкостных сцинтилляционных счетчиков нейтринного детектора ИФВЭ–ОИЯИ. Препринт ИФВЭ 91-143. Протвино, 1991.
5. Дзюбенко Г. Б., Зайцев Б. В., Олехнович О. В. Многоканальная система высоковольтного питания ФЭУ с защитой от перегрузки по каждому каналу. Препринт ИТЭФ 69. М., 1981. С. 1–8.
6. <http://hvsys.ru/>
7. Bartoloni A. *et al.* High Voltage System for the CMS Electromagnetic Calorimeter // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 582. P. 462–468.
8. Ladygin V. P. *et al.* Short-Range Correlations Studies in Collisions of Polarized Nuclei at Nuclotron-M // EPJ Web Conf. 2010. V. 3. P. 04004.
9. Ladygin V. P. *et al.* Few-Body Studies at Nuclotron-JINR // Few Body Syst. 2014. V. 55. P. 709.
10. Piyadin S. M. *et al.* Experiments on the Study of the Deuteron–Proton Interactions at Intermediate Energies at Internal Target at Nuclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8, No. 10. P. 83.
11. Piyadin S. M. *et al.* ΔE – E Detector for Proton Registration in Nonmesonic Deuteron Breakup at the Nuclotron Internal Target // *Ibid.* No. 2. P. 182.
12. High Voltage Power Supply N1130. Data Sheet. Wenzel Elektronik.
13. <http://afi.jinr.ru/>
14. http://midas.triumf.ca/MidasWiki/index.php/Main_Page
15. Pilyar A. V. *et al.* Analog Electronics for Measurement and Control // Proc. of the XXI Intern. Symp. “NEC’2007”. 2008. E10 number 11-2008-37. P. 382–389.
16. <http://root.cern.ch>

Получено 29 апреля 2015 г.