



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

ИФВЭ 2017–1

Н.И. Беликов, С.И. Букреева, Ю.В. Миличенко, Д.А. Морозов,
П.А. Семенов, В.А. Сенько, А.В. Узунян

**Исследование радиационной стойкости компонентов
системы управления переднего калориметра
установки PANDA**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2017

Аннотация

Беликов Н.И. и др. Исследование радиационной стойкости компонентов системы управления переднего калориметра установки PANDA: Препринт ИФВЭ 2017–1. – Протвино, 2017. – 15 с., 11 рис., библиогр.: 11.

Описаны результаты радиационных исследований микросхем АЦП, используемых в генераторах Кокрофт-Уолтона переднего калориметра «шашлык» в эксперименте PANDA. Радиационные тесты проведены в поле гамма и нейтронного излучения. Кроме АЦП рассматривается радиационная стойкость температурных датчиков под действием нейтронного потока.

Abstract

Belikov N.I. et al. Radiation hardness studies of components for forward calorimeter detector control system in PANDA: IHEP Preprint 2017–1. – Protvino, 2017. – p. 15, figs. 11, refs.: 11.

ADC microchips used on Cockcroft-Walton generators in forward calorimeter in PANDA have been tested for hardness at gamma irradiation and neutrons flux. Besides ADC chips under the neutron flux the 1-Wire temperature sensors hardness has been studied.

Введение

В настоящее время ФГБУ ГНЦ ИФВЭ занимает ключевые позиции в создаваемом эксперименте ПАНДА, который входит в экспериментальную программу нового научного центра по исследованиям с ионами и антипротонами ФАИР (FAIR - Facility for Anti-proton and Ion Research), Германия [1]. К ответственности ИФВЭ в экспериментальной программе ПАНДА относятся центральный и передний калориметры. Передний калориметр (FSC), который полностью разрабатывается и создается в ИФВЭ, основан на технологии «шашлык» [2], где в качестве фотодетекторов используются фотоумножители (ФЭУ). В том числе ИФВЭ отвечает и за систему управления детектором, как часть общей системы «медленного контроля» ПАНДА и как часть FSC. Для управления высоковольтным напряжением ФЭУ и его мониторинга будут использоваться генераторы типа Кокрофт-Уолтона с цифровым интерфейсом, которые будут расположены в непосредственной близости от пучка [3]. Радиационный фон в переднем калориметре ПАНДА несравнимо меньше фона в ЛНСб, который также использует в калориметре генераторы Кокрофт-Уолтона. Однако, для уверенности в достоверности информации о фактическом высоковольтном напряжении, которая будет читаться с АЦП, необходимо провести тестирование и отбор микросхем, выдерживающих радиационные нагрузки, сравнимые с расчетными дозами излучения в переднем калориметре ПАНДА.

Цель радиационных исследований. Выбор микросхем и требования к радиационной стойкости

Одним из детекторов установки PANDA является передний калориметр типа «шашлык», который служит для регистрации энергии частиц в широком динамическом диапазоне. В каждом канале «шашлыка» используются фотоумножители Hamamatsu R7899, к которым подключаются генераторы Кокрофт-Уолтона, задающие напряжения на динодах ФЭУ каждого канала до 1.8 кВ. Схема генераторов аналогична используемым в калориметрах LHCb [4] и включает ЦАП для задания напряжений уставки каскада усиления (DAC7512), операционный усилитель (TL072) и стабилизаторы напряжений (LP2980, MIC5270). Все микросхемы были испытаны в радиационных условиях [5], и генераторы на их основе уже несколько лет успешно работают на различных физических установках. При эксплуатации оказалось неудобным отсутствие обратной связи с генераторов при задании кода напряжения на ЦАП. Поэтому в схему генераторов были добавлены микросхемы АЦП, измеряющие реально выставленное высоковольтное напряжение в каждом канале. Для АЦП были проведены радиационные тесты для изучения работы микросхем в условиях облучения. Испытанные микросхемы AD7476ARTZ, AD7478AARMZ (Analog Devices), ADS7886SBDBVT, ADC121S021CIMF (Texas Instruments), MAX11665AUT (Maxim Intergrated) имеют последовательный интерфейс SPI, который позволяет подключать микросхемы на ту же шину SPI, по которой соединены ЦАП генераторов [6], и исполняются в малогабаритных корпусах (AD7478AARMZ в msop-8, остальные в sot-23). Все АЦП имеют разрядность 12 бит, за исключением 8-битного AD7478AARMZ. При выборе микросхем учитывались также такие критерии как доступность на рынке и низкая цена.

Требования к радиационной стойкости микросхем определяются исходя из ожидаемых доз в зоне подключения генераторов при работающем эксперименте. Согласно расчетам [3] (использовался комплекс программ MARS [9]) за передним калориметром ПАНДА в наиболее близкой к ионопроводу зоне при режиме максимальной светимости ожидается уровень мощности дозы от поля излучения не более 0.03 Гр/ч или, при непрерывной работе на пучке в течение 6 месяцев в году, около 130 Гр интегральной дозы в год. Кроме радиационной загрузки от ионизационных потерь в месте располо-

жения элементов системы управления детектором за передним калориметром присутствует также и нейтронный фон. За время эксплуатации детектора ПАНДА нейтроны могут вызывать необратимые изменения в кремнии и привести к деградации микросхем. При максимальной частоте взаимодействий 2×10^7 в секунду и оценке 1×10^{-4} нейтронов на см^2 на взаимодействие [3] в зоне высоковольтных генераторов переднего калориметра ПАНДА будем иметь флюенс нейтронов $\sim 3 \times 10^{10}$ на см^2 в год или 3×10^{11} на см^2 за 10 лет работы детектора. Таким образом, опорные значения флюенса нейтронов и дозы от ионизирующей компоненты излучения для исследуемых образцов микросхем должны быть порядка 10^{12} на см^2 и 1300 Гр соответственно.

Описание процедуры облучения и системы сбора данных

Измерения радиационной стойкости проводились методом непрерывного мониторинга параметров микросхем во время облучения [7]. Было проведено два цикла измерений – при облучении гамма-квантами с использованием радиоактивного источника и при облучении адронами до 200 МэВ (преимущественно нейтронами) в зоне поглотителя пучка бустера ускорительного комплекса У-70.

Облучение гамма квантами со средней энергией 1.25 МэВ проводилось в специально оборудованном помещении ПАНДА-РС в экспериментальном зале 1БВ ИФВЭ. Установленный в помещении ПАНДА-РС контейнер с радиоактивным изотопом ^{60}Co с активностью $\sim 5 \times 10^{12}$ Бк позволял получать мощности дозы от 20 до 0.005 Гр/ч в зависимости от расстояния до источника.

Облучение нейтронами ($\langle E \rangle$ около 20 МэВ; энергетический спектр простирается до 300 МэВ, вклад заряженных адронов менее 1%) проводилось в помещении быстроциклического протонного синхротрона У-1.5 (Бустера) ускорительного комплекса У-70. Бустер является инжектором пучка в кольцевой ускоритель У-70 и работает в пакетно-импульсном режиме с частотой повторения импульсов 16,6 Гц при частоте следования пакетов $\sim 0,1$ Гц. Количество импульсов в пакете может изменяться, но не превышает 32. Первые три импульса служат для тренировки и выхода на стационарный режим ряда технологических систем, остальные используются для ускорения пучка. В зависимости от режима работы в бустере может быть ускорено за один цикл от $2,0 \times 10^{11}$ до $9,0 \times 10^{11}$ протонов. Вывод из У-1.5 организован по двум ветвям. По одной из них пучок

транспортируется в основной ускоритель, по другой выводится на поглотитель, представляющий из себя стальной куб со стороной 2,8 м. Инжектироваться в У-70 может весь или часть пучка У-1.5. Не инжектированный в У-70 пучок может сбрасываться на поглотитель пучка. В конце прямой ветви канала, направленной на поглотитель, имеется зона площадью $\sim 9 \text{ м}^2$, где можно устанавливать экспериментальное оборудование и вести исследования с пучком. Показания счетчиков интенсивности протонов в У-1.5 и выведенных в У-70 позволяют вычислить интенсивность вывода на поглотитель и посчитать интегральный поток протонов на мишени перед поглотителем пучка У-1.5. Расчеты, выполненные с использованием программного комплекса HADRON+FAN15 [10, 11] показывают, что флюенс нейтронов в 50 см от мишени составляет $6.15 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}$ на один падающий на мишень протон, а на расстоянии 5 см от мишени - $6.5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}$.

Для радиационных исследований перед поглотителем устанавливалась мишень размером $30 \times 40 \times 10 \text{ см}^3$ из нескольких стальных блоков, а исследуемые образцы помещались на расчетном расстоянии от мишени для получения требуемого потока нейтронов (рис. 1). Микроконтроллерный блок управления, используемый в схеме непрерывного мониторинга характеристик образцов во время облучения, был помещен за бетонную стену толщиной $\sim 1 \text{ м}$ в соседний зал и соединен 5-метровыми кабелями с образцами, где влияние радиационного фона пренебрежимо мало.

В качестве образцов использовались две платы с одинаковым набором из 5 микросхем АЦП, указанных выше, подключенных на одну шину SPI, управление которой было реализовано в микроконтроллерном блоке. С помощью внутреннего 12-битного ЦАП микроконтроллера устанавливалось аналоговое напряжение на всех входах АЦП и инкрементировалось раз в 10 секунд от 0 до 3,3 В с шагом 80 мВ. Микроконтроллер поочередно опрашивал все АЦП на SPI и отправлял выходные коды АЦП в компьютер Raspberry Pi по шине Modbus. Raspberry Pi передавал полученные данные по сети Ethernet в базу данных с использованием протокола EPICS [8].



Рис. 1. Вид поглотителя пучка бустера с мишенью из металлических блоков и облучаемых образцов.

Кроме АЦП тестировались датчики температуры DS1820 и DS18B20. Микроконтроллер также раз в 10 секунд опрашивал значения температуры по интерфейсу 1-Wire и аналогичным способом передавал их вместе с кодами АЦП для сохранения в базе данных. Вне зоны облучения был установлен дополнительный температурный датчик, который использовался для сравнения показаний с облучаемых датчиков. Такая схема опроса АЦП определилась исходя из опыта применения Raspberry Pi в системе управления детектором «шашлык» [6].

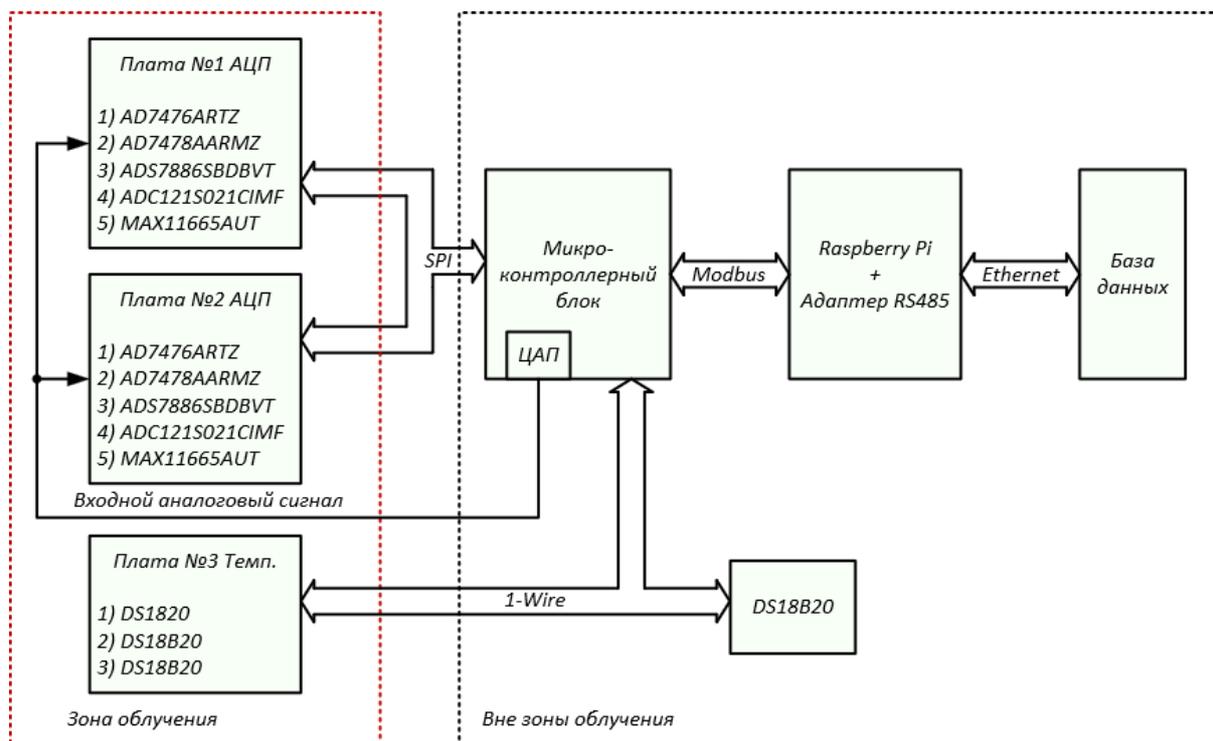


Рис. 2. Схема подключения плат АЦП к системе сбора данных.

Измерения и результаты облучения и восстановления

На первом этапе исследования образцы были облучены с использованием радиоактивного источника гамма-квантов при мощности дозы 2,7 Гр/ч. Измерения проводились с помощью промышленного дозиметра ДКС-АТ1123 с относительной погрешностью <math><15\%</math>. Интегральная доза составила 540 Грэй. Для оценки изменения интегральной нелинейности в облученных образцах полное время сбора данных было разделено на временные участки, для каждого из которых подсчитаны и профитированы передаточные характеристики АЦП по средним значениям выходных кодов, полученных на конкретном участке. Далее были подсчитаны интегральные нелинейности АЦП на соответствующих участках. На рис. 3 показаны интегральные нелинейности АЦП до облучения. Период облучения был разделен на 10 временных участков (20 часов каждый). Интегральные нелинейности для десятого временного участка, к концу которого интегральная доза составляла 540 Грэй, показаны на рис. 4. Период восстановления после

снятия облучения продолжался 5 дней и был разделен на 8 временных участков (15 часов каждый). На рис. 5 показаны интегральные нелинейности АЦП для последнего временного участка в периоде восстановления. Из графиков видно, что АЦП фирмы Analog Devices сильно повредились и не восстановились после снятия облучения. Значительно искажилась характеристика АЦП фирмы Maxim Integrated: при входном сигнале близком к максимуму (3,3 В) отклонения АЦП изменились более, чем в 35 раз. Интегральная нелинейность АЦП ADC121S021CIMF фирмы Texas Instruments ухудшилась с ростом интегральной дозы и незначительно улучшилась после снятия облучения. Характеристики другого АЦП фирмы Texas Instruments – ADS7886SBDBVT – не изменились в ходе тестирования.

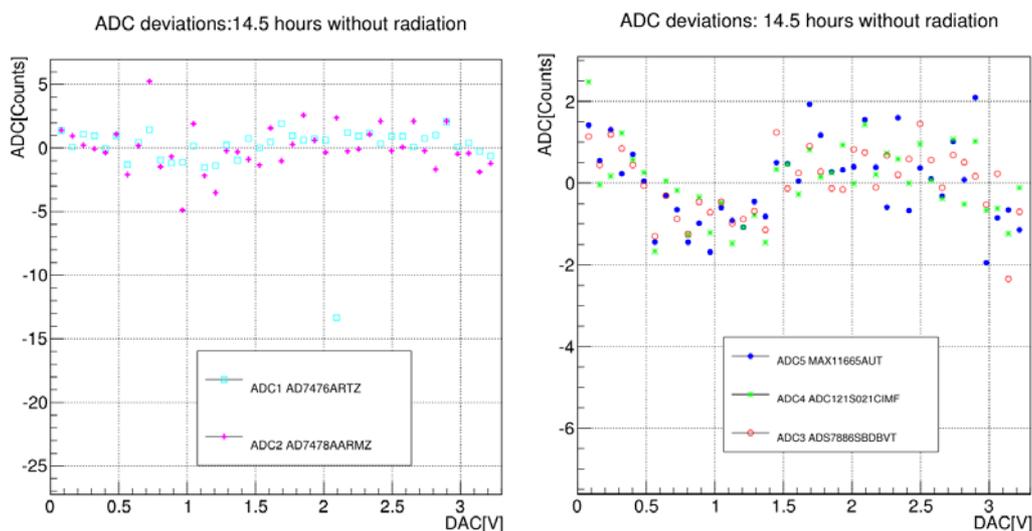


Рис. 3. Интегральная нелинейность АЦП на временном участке без облучения: слева – АЦП фирмы Analog Devices; справа – АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated.

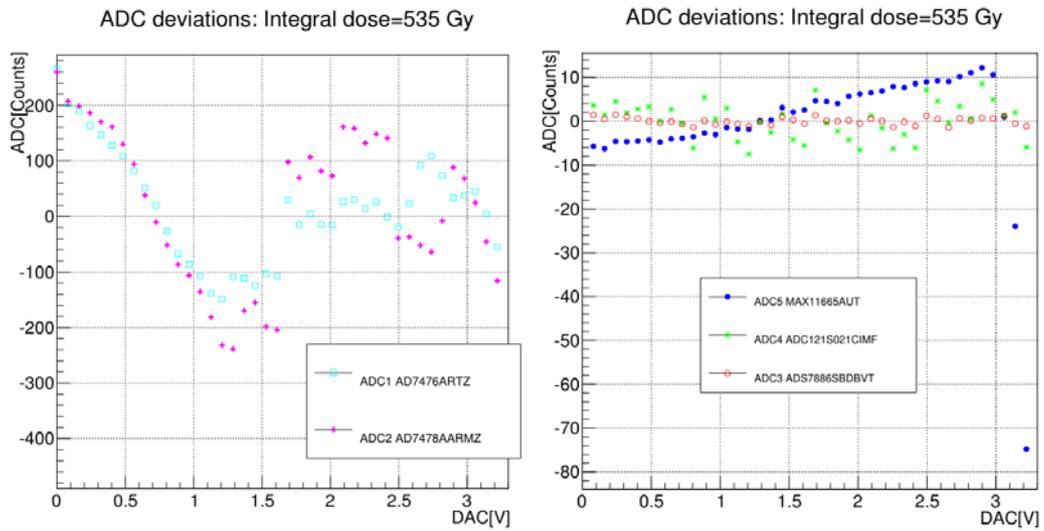


Рис. 4. Интегральная нелинейность АЦП на временном участке, интегральная доза на котором достигла 540 Грэй: слева – АЦП фирмы Analog Devices; справа – АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated.

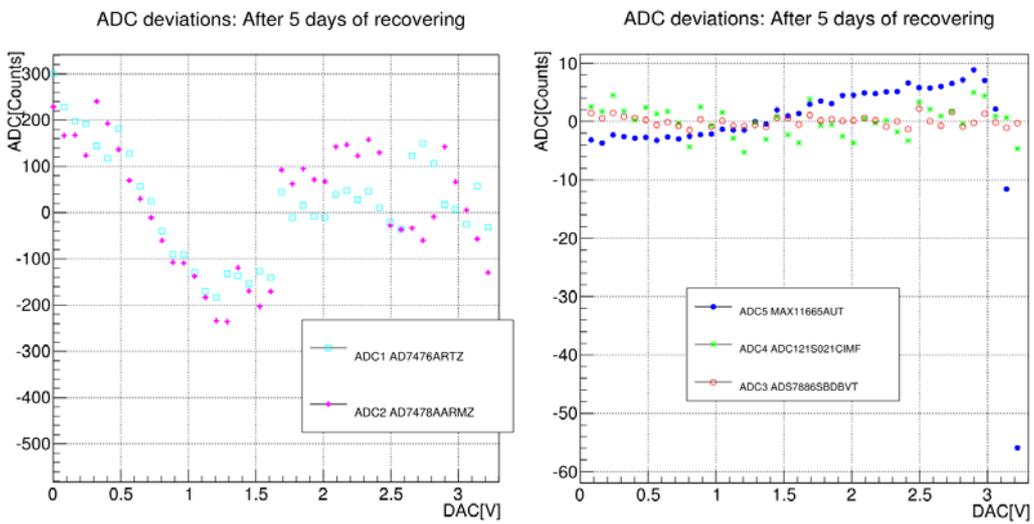


Рис. 5. Интегральная нелинейность АЦП на временном участке на пятый день восстановления после снятия облучения: слева – АЦП фирмы Analog Devices; справа – АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated.

На втором этапе облучения образцы были протестированы под воздействием поля нейтронов, флюенс которого мониторировался с помощью счетчика протонов, падающих на мишень с учетом расчетного флюенса нейтронов вокруг мишени. Кроме того, рядом с образцами была расположена алюминиевая фольга в качестве монитора интегрального флюенса нейтронов. По наработанному в алюминии при реакции с нейтронами изотопу ^{22}Na после облучения был вычислен флюенс нейтронов. Следует отметить, что монитор такого типа чувствителен к нейтронам с энергией выше 20 МэВ. Этим объясняется заниженный результат ($3 \cdot 10^{12}$ н/см²) при сравнении флюенса нейтронов за все время облучения по измерениям активности алюминиевой фольги и расчетами по потоку протонов на мишень ($1 \cdot 10^{13}$ н/см²).

При достижении интегрального потока 10^{12} нейтронов на см² в характеристиках АЦП не наблюдалось значительных изменений (рис. 6 и 7). Поэтому образцы были перемещены под более интенсивное поле нейтронов, интегральный флюенс в конце тестирования достиг 10^{13} нейтронов на см². Оценка повреждения АЦП проводилась аналогично предыдущим измерениям на гамма-облучении: полное время сбора данных разделено на временные участки, для каждого из которых были подсчитаны интегральные нелинейности АЦП. Период с интегральным флюенсом в 10^{12} нейтронов на см², разделен на 5 участков (по 16 часов каждый), интегральные нелинейности на последнем из которых показаны на рис. 7. Период с интегральным флюенсом, равным 10^{13} нейтронов на см², разделен на 4 участка (по 22 часа каждый). Интегральные нелинейности АЦП для последнего участка показаны на рис. 8. Период восстановления после снятия облучения составлял 6 дней и разделен на 6 временных участков. На рис. 9 показаны интегральные нелинейности АЦП для 6-го дня восстановления.

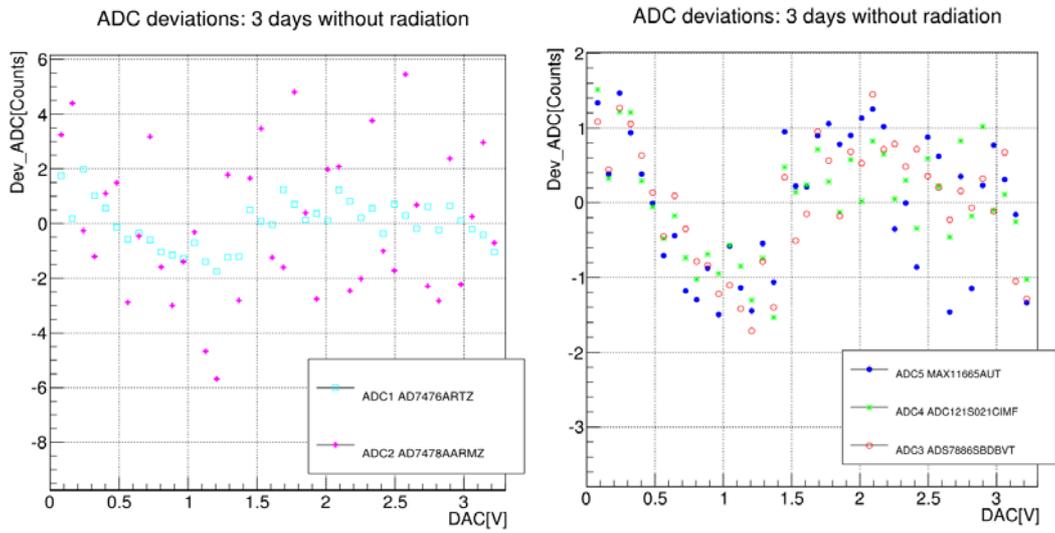


Рис. 6. Интегральная нелинейность АЦП на временном участке без облучения: слева – АЦП фирмы Analog Devices; справа – АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated.

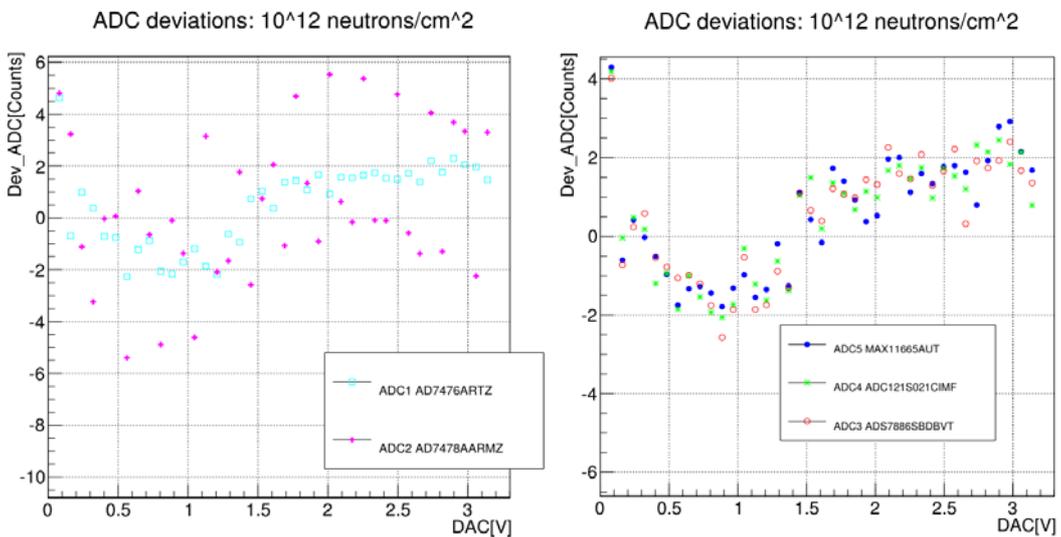


Рис. 7. Интегральная нелинейность АЦП на временном участке, с интегральным флюенсом нейтронов 10^{12} см⁻²: слева – АЦП фирмы Analog Devices; справа – АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated.

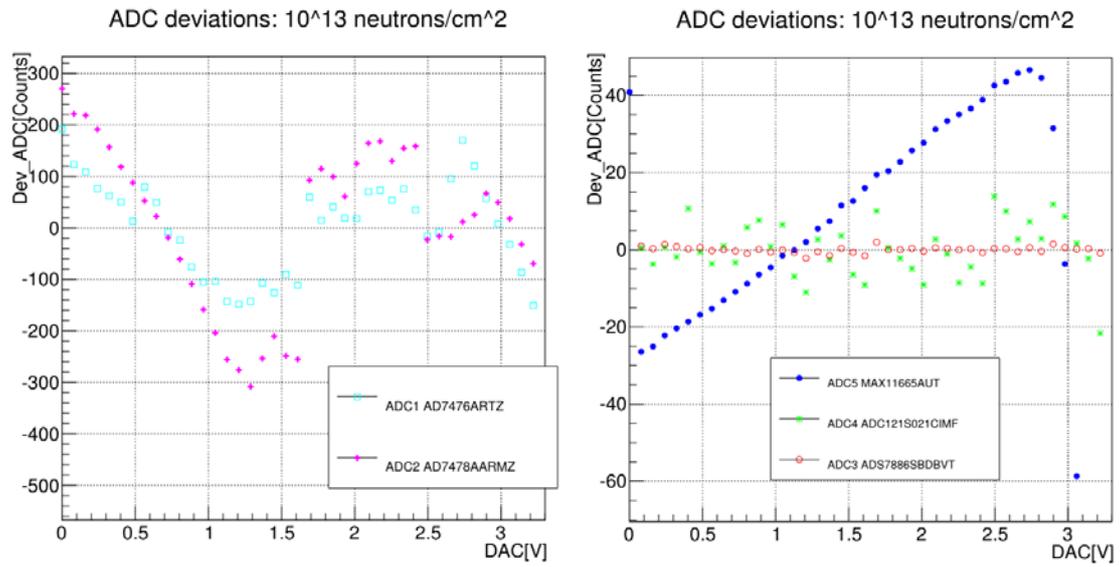


Рис. 8. Интегральная нелинейность АЦП на временном участке, с интегральным флюенсом нейтронов 10^{13} см⁻²: слева – АЦП фирмы Analog Devices; справа – АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated.

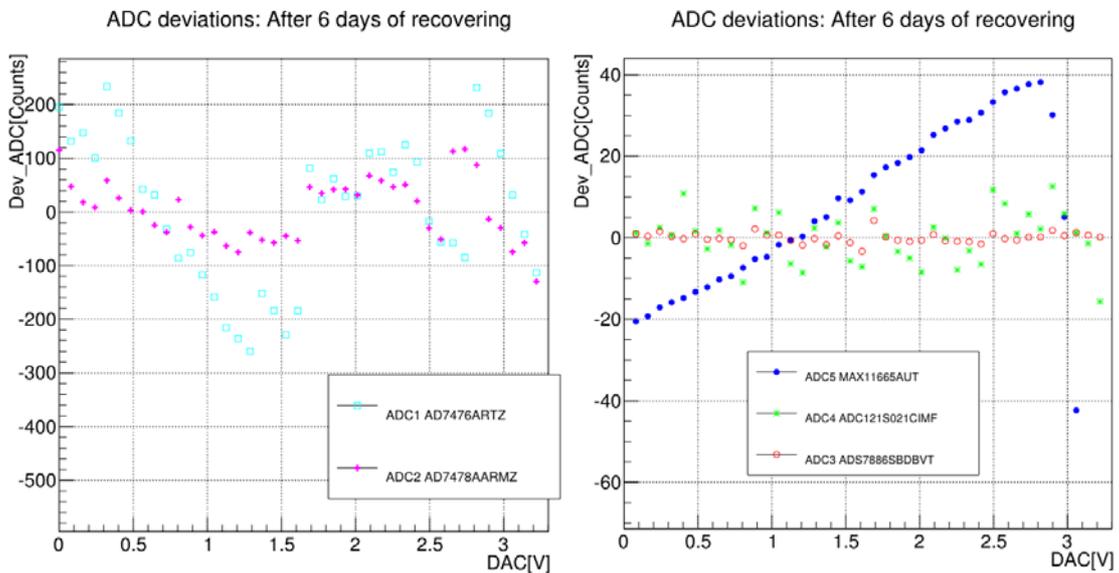


Рис. 9. Интегральная нелинейность АЦП на временном участке на шестой день восстановления после снятия облучения: слева – АЦП фирмы Analog Devices; справа – АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated.

Для оценки влияния облучения на шум АЦП были вычислены стандартные отклонения выходных кодов АЦП при входном аналоговом сигнале равном 161 мВ.

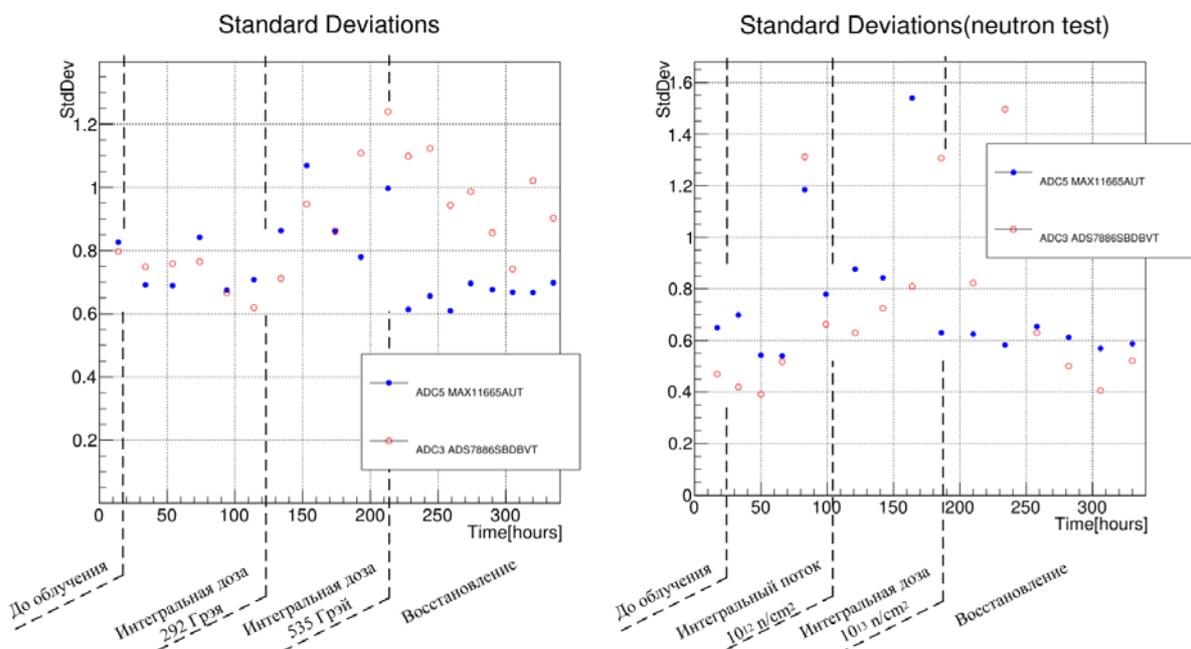


Рис. 10. Изменения стандартных отклонений в ходе тестирования при гамма-облучении (слева) и облучении потоком нейтронов (справа) для АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated.

Кроме микросхем АЦП на нейтронном облучении были протестированы датчики температуры фирмы Dallas. Для тестов выбраны два 12-битных датчика DS18B20 и один 9-битный датчик DS1820, и один контрольный датчик DS18B20 был расположен вне зоны облучения. Спустя 69 часов от начала облучения (флюенс нейтронов менее 10^{12} см^{-2}) нарушилась передача данных по шине 1-Wire. Вероятно, один или несколько датчиков вышел из строя и нарушил протокол обмен на шине, в том числе с контрольного датчика. Спустя еще 67 часов (флюенс нейтронов 10^{13} см^{-2}) поврежденные датчики «освободили» шину, и появились корректные данные с контрольного датчика.

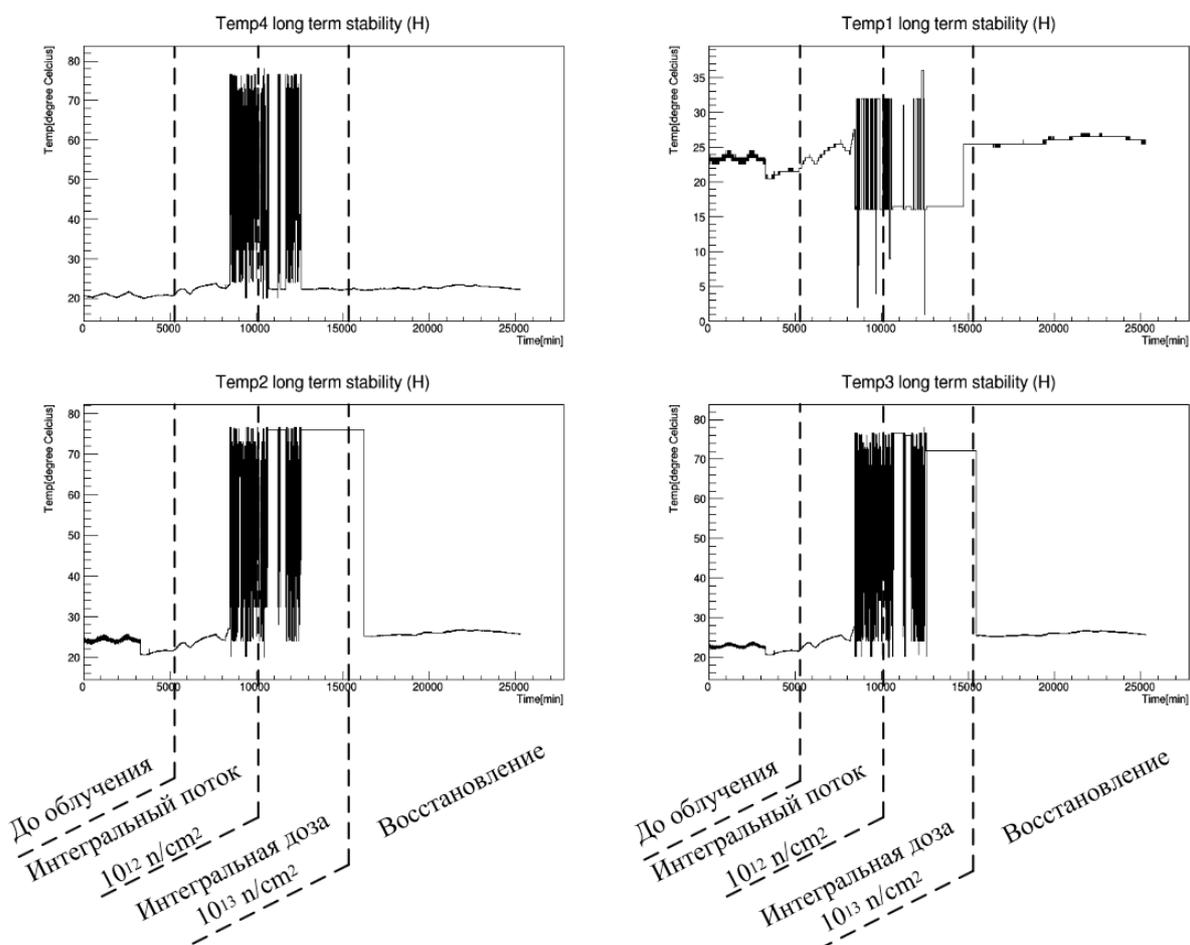


Рис. 11. Изменения выходных данных с датчиков температур:

Temp4 – значения температуры с контрольного датчика DS18B20 вне зоны облучения;
 Temp1 – значения температуры с 8-битного датчика DS1820 в зоне облучения;
 Temp2 – значения температуры с 12-битного датчика DS18B20 в зоне облучения;
 Temp3 – значения температуры с 12-битного датчика DS18B20 в зоне облучения.

Заключение

В ГНЦ ИФВЭ было проведено исследование радиационной стойкости пяти разных моделей микросхем АЦП от трех производителей и микросхем цифровых термометров в поле гамма-квантов с поглощенной дозой до 540 Грэй и в поле нейтронов с флюенсом до 10^{13} н/см². Наименее радиационно-стойкими оказались микросхемы

AD7476A и AD7478A, изготовленные с использованием технологического процесса 0,6 μm CMOS. Техпроцесс 0,18 μm , применявшийся для изготовления микросхем MAX11665, обеспечил гораздо лучшую радиационную стойкость. Наиболее радиационно-стойкими оказались микросхемы АЦП ADS7886SBDBV. Технологические параметры для этих АЦП производителем не раскрываются.

Цифровые элементы для системы управления и мониторинга детектора могут быть расположены за передним калориметром ПАНДА в течение всего времени эксплуатации установки. Из протестированных АЦП для контроля установленного высоковольтного напряжения ФЭУ переднего калориметра можно выбрать микросхемы ADS7886SBDBVT (Texas Instruments). Исследования также показали, что микросхемы цифровых термометров фирмы Dallas не могут надежно работать в условиях даже относительно низкого фона нейтронов и нарушают работу на шине 1-Wire. Таким образом, для мониторинга температуры в наиболее загруженной зоне за передним калориметром ПАНДА возле вакуумпровода не рекомендуется использовать эти микросхемы и шину 1-Wire.

Авторы выражают благодарность И.Л. Ажгирею и Е.Н. Савицкой за предоставленные результаты расчетов поля нейтронов в зоне поглотителя пучка У-1.5; Г.И. Бритвичу за проведение активационного анализа адронного поля излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Исследовательского центра ФАИР-Россия.

Список литературы

- [1] <http://www.fair-center.eu/> - сайт ускорительного комплекса FAIR.
- [2] PANDA Electromagnetic calorimeters, P.A.Semenov et. al., NIM A 598 (2009) 224–228.
- [3] Technical Design Report for the PANDA Forward Spectrometer calorimeter, by PANDA collaboration, arXiv: 1704.02713 [physics. ins-det].
- [4] LHCb Calorimeters, Technical Design Report, CERN/LHCC/2000-0036, 6 Sept. 2000.
- [5] <https://indico.cern.ch/event/414850/contributions/995205/attachments/846448/1178118/note2.pdf> - design of PMT base for the LHCb electromagnetic calorimeter.

- [6] Система управления переднего калориметра типа «шашлык» в эксперименте PANDA, С.И. Букреева, Ю.М. Гончаренко, П.А. Семенов, ПТЭ, 2017, №2.
- [7] Патент на полезную модель «Установка для исследования радиационной стойкости материалов и электроники в масштабе реального времени» № 93985 от 10.05.10, приоритет от 19.11.09, правообладатели ГК «Росатом» и ГИЦ ИФВЭ.
- [8] <http://www.aps.anl.gov/epics/> - сайт разработчиков программной среды EPICS.
- [9] И.Ажгирей и В.Таланов, «Статус комплекса программ MARS». Труды XVIII совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 2000, Т.2, стр. 184-187.
- [10] A.V. Sannikov, E.N. Savitskaya. Physics of the HADRON code: recent status and comparison with experiment. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. **A450**, 127-137 (2000).
- [11] Е.Н. Савицкая, А.В. Санников. Программа FAN15 для расчета переноса низкоэнергетических фотонов и нейтронов в произвольных средах. Препринт ИФВЭ 2016-4, Протвино, 2016.

Рукопись поступила 28 марта 2017 г.

Н.И. Беликов и др.

Исследование радиационной стойкости компонентов системы управления переднего калориметра PANDA.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 30.03.2017. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,25. Уч.– изд.л. 1,63. Тираж 80. Заказ 3. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2017-1,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2017
