

**ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО
И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

УДК 53.07+621.317

**ПОРТАТИВНЫЙ СТЕНД ДЕМОНСТРАЦИИ И ТЕСТИРОВАНИЯ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ**

**© 2026 г. В. Н. Марин*, Д. Н. Трунов, С. Н. Аксенов Д. А. Бучный,
В. С. Литвин, Р. А. Садыков**

Институт ядерных исследований Российской академии наук

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

**E-mail: marin@inr.ru*

Поступила в редакцию 10.06.2026

После доработки 22.08.2026

Принята к публикации 31.08.2026

Представлен учебно-демонстрационный стенд для исследования и тестирования сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов нового типа на основе сцинтиллятора $\text{ZnS(Ag):}^6\text{LiF}$ и кремниевых фотоумножителей. Стенд предназначен для использования в учебном процессе и при проведении первичных экспериментальных исследований, а также для демонстрации физических принципов регистрации нейтронов и методов обработки детекторных сигналов. Описана конструкция детекторных модулей с различной геометрией и эффективностью регистрации тепловых нейтронов до примерно 80 %, отличающихся низкой чувствительностью к гамма-излучению и низким рабочим напряжением питания. Рассмотрены схемотехнические решения блока предусилителей, включая схему компенсации заряда SiPM, позволяющую сократить время восстановления фотоприемников и увеличить допустимую счетную нагрузку. Представлена архитектура блока многостоповых время-цифровых преобразователей на основе программируемой логической интегральной схемы, обеспечивающая реализацию время-пролетных измерений, подсчет импульсов и регистрацию осциллограмм сигналов с временным разрешением порядка десятков наносекунд. Программное обеспечение стенда, реализованное на языке Verilog и в среде NI LabView, обеспечивает гибкую настройку режимов измерений, управление пороговыми уровнями дискриминации и последующий анализ данных. Показано, что разработанный стенд является универсальным и эффективным инструментом для обучения студентов методам регистрации нейтронов и может быть использован для сравнительных исследований и оптимизации сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель, времяпролетная методика, источник ^{252}Cf , тепловые нейтроны, нейтронная дифракция.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия детектирование нейтронов играет ключевую роль в различных областях науки и техники, включая ядерную энергетику, медицину, безопасность и фундаментальные исследования элементарных частиц [1, 2]. Нейтронные сцинтилляционные детекторы представляют собой один из наиболее востребованных инструментов для

регистрации нейтронов [3]. Детекторы, основанные на процессе сцинтилляции – преобразовании энергии нейтронов в световые вспышки, которые затем фиксируются фотоумножителями или другими детекторами фотонов, – важны благодаря своей возможности дискриминации нейтронов и гамма-излучения с использованием, например, такого метода, как дискриминация по форме импульсов (pulse shape discrimination, PSD) [4] и также обладают высокой эффективностью регистрации тепловых нейтронов [5, 6].

Определение ключевых параметров нейтронных сцинтилляционных детекторов, таких как световой выход (light yield), разрешение по энергии (energy resolution), время затухания (decay time) и других спектральных характеристик, критически важно для оптимизации их применения в реальных сценариях [7, 8]. Современные материалы, включая органические и неорганические сцинтилляторы с добавками изотопов ^6Li или ^{10}B , позволяют достигать высокой чувствительности и селективности, что делает их подходящими для задач спектроскопии и дозиметрии.

Проектирование, калибровка и тестирование сцинтилляционных детекторов требуют специально оборудованных экспериментальных установок – тест-стендов, позволяющих оценивать ключевые параметры: световой выход сцинтиллятора, стабильность работы при различных физических условиях, эффективность регистрации различных типов излучения. Такие стенды включают источники калиброванного излучения, оптические системы для измерения светового сигнала, электронику усиления и обработки сигналов, а также компьютеры для сбора и анализа данных. При этом разработка методик калибровки и проверок точности работы детекторных сборок является критическим элементом обеспечения достоверности измерений. В литературе описаны различные подходы к построению и использованию стендов для тестирования сцинтилляционных детекторов разного типа для задач спектроскопии и оценки рабочих характеристик [9–11]. Кроме базовой инженерии детекторов стенды используются для сравнительных исследований и оптимизации новых материалов и конфигураций сцинтилляторов, а также для оценки алгоритмов дискриминации сигналов, например, при разделении нейтронных и гамма-событий.

В образовательном контексте разработка специализированного стенда для студентов позволяет не только освоить теоретические основы ядерной физики в области радиационной детекции, но и приобрести практические навыки в калибровке детекторов, анализе сигналов и определении их параметров с использованием реального оборудования [10, 11]. Такой подход способствует глубокому пониманию взаимодействия нейтронов с веществом и стимулирует интерес к инновационным технологиям. Конструкция и методики работы с таким учебным стендом подчеркивает его роль в подготовке будущих специалистов.

2. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

В Институте ядерных исследований РАН были разработаны сцинтилляционные счетчики тепловых нейтронов нового типа [12, 13]. Данные счетчики демонстрируют эффективность регистрации тепловых нейтронов выше 75%, что сопоставимо с характеристиками традиционно применяемых газоразрядных гелиевых счетчиков. При этом разброс эффективности между отдельными экземплярами не превышает 5 %, что указывает на хорошую воспроизводимость технологии изготовления.

Поскольку разработанные счетчики являются относительно новыми и пока не получили широкого распространения, возникла необходимость в создании специализированного демонстрационного стенда, предназначенного для обучения студентов физических вузов, а также для демонстрации принципов работы данных детекторов и методик измерений с их использованием.

Разработанный стенд предназначен для демонстрации работы твердотельных сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS(Ag)/LiF , кремниевых фотоумножителей и световода из полиметилметакрилата. Кроме того, стенд позволяет наглядно продемонстрировать применение время-пролетной методики измерений при регистрации нейтронов. Конструкция стенда ориентирована на использование в учебном процессе и позволяет проводить лабораторные занятия со студентами.

Для обеспечения безопасности при работе в радиационно опасных условиях в составе стенда предусмотрена биологическая защита. Стенд рассчитан на эксплуатацию с новым типом детекторов тепловых нейтронов, обладающих низкой чувствительностью к гамма-излучению (порядка 10^{-6}), что существенно упрощает проведение экспериментов и исключает необходимость в дополнительной защите от гамма-квантов.

Дополнительным преимуществом разработанных счетчиков является низкое рабочее напряжение питания, не превышающее 35 В, что позволяет использовать стенд в стандартных лабораторных помещениях без специальных требований к электробезопасности. Конструкция стенда предусматривает наличие удаленного блока детекторов, что обеспечивает безопасную работу как с нейтронным источником ^{252}Cf , так и с направленным нейтронным пучком.

3. БЛОК ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ

Блок регистрации содержит два трансимпедансных усилителя, к входам которых подключены сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов. На счетчики подается напряжение смещения V_{BIAS} , формируемое блоком питания совместно со схемой компенсации заряда. Схема компенсации заряда [14, 15] предназначена для уменьшения мертвого времени

кремниевого фотоумножителя (SiPM). Принцип ее работы основан на использовании линейной схемы зарядки емкости конденсатора, что позволяет увеличить скорость восстановления напряжения на фотоприемнике и ускорить зарядку его собственной емкости. В результате время восстановления SiPM сокращается приблизительно в 2.7 раза, что приводит к увеличению максимально допустимой счетной загрузки детектора.

Сигналы с выходов предусилителей поступают на быстродействующий компаратор, который формирует логический сигнал стандарта TTL в случае превышения напряжения на инверсном входе заданного порогового уровня. Пороговое напряжение для каждого компаратора устанавливается индивидуально с использованием цифрового потенциометра AD5290, управление которым осуществляется по интерфейсу SPI.

Рис. 1. Схема блока предусилителей

В состав стенда входят два сцинтилляционных детектора тепловых нейтронов различной конструкции. Первый детектор представляет собой двухслойный счетчик с габаритными размерами $100 \times 15 \times 5$ мм³ и эффективностью регистрации тепловых нейтронов порядка 60 %. Второй детектор выполнен в виде трехслойного счетчика с размерами $50 \times 5 \times 5$ мм³ и эффективностью регистрации, достигающей примерно 80 %. Подробная конструкция детекторов представлена в работах [16, 17].

В обоих детекторах в качестве сцинтилляционного материала используется композит ZnS(Ag):⁶LiF с массовым соотношением компонентов 1:2 и толщиной сцинтилляционного слоя 0.45 мм. Детекторные модули оснащены двумя кремниевыми фотоумножителями, размещенными в оптическом контакте по краям световода и сцинтилляционного слоя, что обеспечивает эффективный сбор сцинтилляционного света. В качестве световода используется полиметилметакрилат (PMMA) с коэффициентом пропускания порядка 94 %. Сцинтиллятор оптически соединен со световодом с использованием оптически прозрачного клея. Снаружи детекторы покрыты диффузно отражающей пленкой на основе фторопласта-4, а также слоем светоизолирующего материала, предотвращающего влияние внешней засветки.

4. БЛОК МНОГОСТОПОВЫХ ВРЕМЯ-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И КОНТРОЛЛЕРА УПРАВЛЕНИЯ ПОРОГАМИ СЧЕТЧИКОВ

Блок многостоповых время-цифровых преобразователей (ВЦП) построен на основе программируемой логической интегральной схемы Xilinx XA7A15T и включает в себя преобразователь интерфейса UART–USB, реализованный на микросхеме FTDI FT232. Структурная схема блока ВЦП представлена на рис. 2. Дополнительно в состав блока входит двухканальный аналого-цифровой преобразователь на основе микросхемы AD9226 с разрядностью 12 бит и максимальной частотой дискретизации 65 MSPS.

Рис 2. Структурная схема блока ВЦП.

Программное обеспечение блока ВЦП разработано на основе программных решений, ранее использованных в дифрактометре “СФЕРА” [18–20]. Основные отличия заключаются в реализации поддержки интерфейса SPI для управления пороговыми уровнями компараторов, а также в добавлении модуля обработки данных АЦП, обеспечивающего получение и сохранение осциллограмм сигналов. Упрощенная блок-схема программы представлена на рис. 3.

На всех входах цифровых сигналов применены фильтры, состоящие из триггерного модуля (FlipFlop) и модуля подавления дребезга (Debouncer). На входе синхроимпульса дополнительно используется регулируемый модуль задержки с диапазоном от 0 до 1 мс. Модуль обработки команд обеспечивает установку пороговых уровней предусилителей, подсчет импульсов от детекторов, запуск режима измерений по времени пролета, а также запись осциллограмм сигналов.

Рис. 3. Блок схема программы ПЛИС.

Рассмотрим основные режимы работы блока. В режиме измерений по времени пролета (Time of Flight, TOF) при поступлении синхроимпульса от ускорителя пучок частиц (например протонов) взаимодействует с нейтронообразующей мишенью, в результате чего формируется широкий (белый) спектр нейтронов. Далее нейтроны замедляются в замедлителе, распространяются по нейтроноводу и попадают на исследуемый образец. Энергия нейтрона определяется по времени его пролета от источника до детектора. Таким образом, задача регистрации сводится к разбиению временной шкалы на равные интервалы (каналы) и подсчету числа зарегистрированных импульсов в каждом из них. Для запуска режима TOF-измерений задаются задержка синхроимпульса и ширина временного канала в диапазоне от 1 до 16 мкс. После прихода синхроимпульса и его задержки запускается генератор временных ворот, формирующий 4096 импульсов заданной длительности. В течение каждого временного интервала 16-битный счетчик регистрирует количество импульсов от детектора, после чего значения счетчика обнуляются и начинается регистрация следующего интервала. Параллельно контроллер памяти считывает предыдущее значение соответствующего канала, суммирует его с текущими данными и сохраняет результат во встроенную память BRAM. После заполнения всех 4096 каналов система готова к приему следующего синхроимпульса. Таким образом осуществляется накопление временной гистограммы, используемой для построения дифрактограмм различных образцов.

В случае использования монохроматического нейтронного излучения принцип работы блока упрощается и сводится к подсчету импульсов за заданный временной интервал.

Для анализа параметров детекторов предусмотрен режим регистрации осциллограмм сигналов. В этом режиме происходит запись осциллограмм в циклическом режиме во внутреннюю память ПЛИС. В управляющей программе задается количество каналов до срабатывания триггера, а также порог компаратора, и при превышении порогового уровня формируется сигнал на цифровом входе, который используется в качестве триггера запуска записи сигнала АЦП и последующей передачи осциллограммы в персональный компьютер. Количество временных каналов 4096, разрешение по амплитуде 12 бит, один временной канал составляет около 15 нс.

Дополнительно возможно отдельное подключение двух SiPM и анализ параметров световода, и обработка метода определения координаты на основе анализа амплитуды. На рис. 4 представлены примеры осциллограмм, получаемых с одного детектора в этом режиме. На основе анализа амплитуды возможно определить координату события.

Рис. 4. пример получаемых сигналов с кремниевых фотоумножителей.

Программное обеспечение для ПЛИС реализовано на языке описания аппаратуры Verilog. Управляющая программа для персонального компьютера разработана в среде NI LabView, что обеспечивает гибкость системы и позволяет относительно просто модифицировать программное обеспечение для измерения различных параметров детекторов и работы с различными конфигурациями экспериментальной установки. В том числе и обработку различных вариантов амплитудно-широтного анализа.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен и подробно описан учебно-демонстрационный стенд для исследования сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов нового типа на основе композита $\text{ZnS(Ag):}^6\text{LiF}$ и кремниевых фотоумножителей. Разработанный стенд объединяет в себе детекторные модули различной конструкции, специализированную аналоговую и цифровую электронику, а также программное обеспечение для управления измерениями и анализа сигналов, что позволяет комплексно изучать основные характеристики нейтронных сцинтилляционных детекторов. На рис. 5 представлен внешний вид разработанного стенда.

Рис. 5. Внешний вид собранного стенда во время работы.

Показано, что применение новых твердотельных счетчиков тепловых нейтронов обеспечивает высокую эффективность регистрации (примерно до 80 %) при низкой чувствительности к гамма-излучению и малом рабочем напряжении, что делает стенд безопасным и удобным для использования в условиях учебных лабораторий. Реализация схемы компенсации заряда SiPM позволила существенно сократить время восстановления

фотоприемников и повысить допустимую счетную нагрузку, расширяя диапазон рабочих режимов стенда.

Разработанный блок многостоповых время-цифровых преобразователей на основе ПЛИС обеспечивает реализацию время-пролетных измерений с высоким временным разрешением, а также регистрацию осциллограмм сигналов, что создает возможность детального анализа формы импульсов, амплитудных характеристик и пространственной локализации событий. Использование программного обеспечения на базе Verilog и NI LabView обеспечивает гибкость конфигурации системы и ее адаптацию под различные экспериментальные задачи, включая отработку методов амплитудно-временной и амплитудно-широтной дискриминации.

В целом, разработанный стенд является эффективным инструментом как для учебного процесса, так и для первичных исследовательских и сравнительных испытаний нейтронных сцинтилляционных детекторов. Он позволяет продемонстрировать физические принципы регистрации нейтронов, освоить современные методы обработки сигналов и может быть использован для дальнейшей оптимизации конструкции детекторов и алгоритмов их обработки, а также для расширения круга учебных и прикладных экспериментов [21].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. An B., Deng Y., Jin Z., Sun S. Adv. Funct. Mater. 2024. V. 35. P. 202422522. <https://doi.org/10.1002/adfm.202422522> .
2. Paschotta R. Scintillation detectors. RP Photonics Encyclopedia. Электронный ресурс. <https://doi.org/10.61835/8do> .
3. Zakiryanov T., Baktoraz A., Yerezhep N. et al. J. Phys.: Conf. Ser. 2025. V. 3089. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3089/1/012006> .
4. Baselga S., Montbarbon E. Appl. Sci. 2024. V. 14, № 13. P. 5532. <https://doi.org/10.3390/app14135532> .
5. Provenzano C., Marra M., Caricato A. P. et al. Sensors. 2023. V. 23. №. 24. P. 9831. <https://doi.org/10.3390/s23249831> .
6. Ming X., Cheng T., Guo-Ming C., Jun-Quan T. Chin. Phys. C. 2013. V. 37. № 10. P. 106001. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/37/10/106001> .

7. *Pritchard K., Majkrzak C. F., Maliszewskyj N. et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 2020. V. 67. P. 414. <https://doi.org/10.1109/tns.2019.2953875>.
8. *Yehuda-Zada Y., Pritchard K., Ziegler J.B. et al.* Nucl. Instr. Meth. A. 2018. V. 892. P. 59. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.02.099>.
9. *Корнеев Ю.П., Криницын А.Н., Крышкин В.И. и др.* Стенд контроля сцинтилляционных счетчиков. Препринт ИФВЭ 2003-31. Протвино: ИФВЭ, 2003.
10. *Александров И.С., Лукьяшин А.В., Хромов А.В., Шакиров А.В.* ПТЭ. 2024. № 6. С. 146. <https://elibrary.ru/ekbzab>.
11. *Конотоп А.Д., Бойко Н.С.* Вестник НИЯУ МИФИ. 2023. Т. 12, № 3. С. 143. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2023.268>.
12. *Литвин В.С., Марин В.Н., Караевский С.Х. и др.* Кристаллография. 2016. Т. 61, № 1. С. 115. <https://doi.org/10.7868/s0023476116010094>.
13. *Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н. и др.* ПТЭ. 2018. № 1. С. 5. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32619917>.
14. *Марин В.Н., Трунов Д.Н., Литвин В.С. и др.* Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2024. № 8. С. 20. <https://doi.org/10.31857/s1028096024080038>.
15. *Трунов Д.Н., Марин В.Н., Алтынбаев Е.В.* РФ Патент № 2782417 С1, 2022.
16. *Трунов Д.Н., Марин В.Н., Садыков Р.А. и др.* Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2024. № 8. С. 3. <https://doi.org/10.31857/s1028096024080012>.
17. *Трунов Д.Н., Марин В.Н., Садыков Р.А., Алтынбаев Е.В.* Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 11(149). <https://doi.org/10.60797/irj.2024.149.130>.
18. *Трунов Д.Н., Марин В.Н., Аксенов С.Н. и др.* Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 1(139). <https://doi.org/10.23670/irj.2024.139.29>.
19. *Трунов Д.Н.* Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024684342. Программа модуля микроконтроллера для управления и настройки предусилителей по интерфейсу SPI (CAN Amp Control), 2024.
20. *Трунов Д.Н.* Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025689369. Программное обеспечение для проведения эксперимента и накопления данных при измерениях методом Time-Of-Flight (TDC_Counter_Universal), 2025.
21. *Трунов Д.Н., Марин В.Н., Аксенов С.Н. и др.* РФ Патент № 2861602 С1, 2026.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема блока предусилителей

Рис. 2. Структурная схема блока ВЦП

Рис. 3. Блок схема программы ПЛИС

Рис. 4. Пример получаемых сигналов с кремниевых фотоумножителей

Рис. 5. Внешний вид собранного стенда во время работы

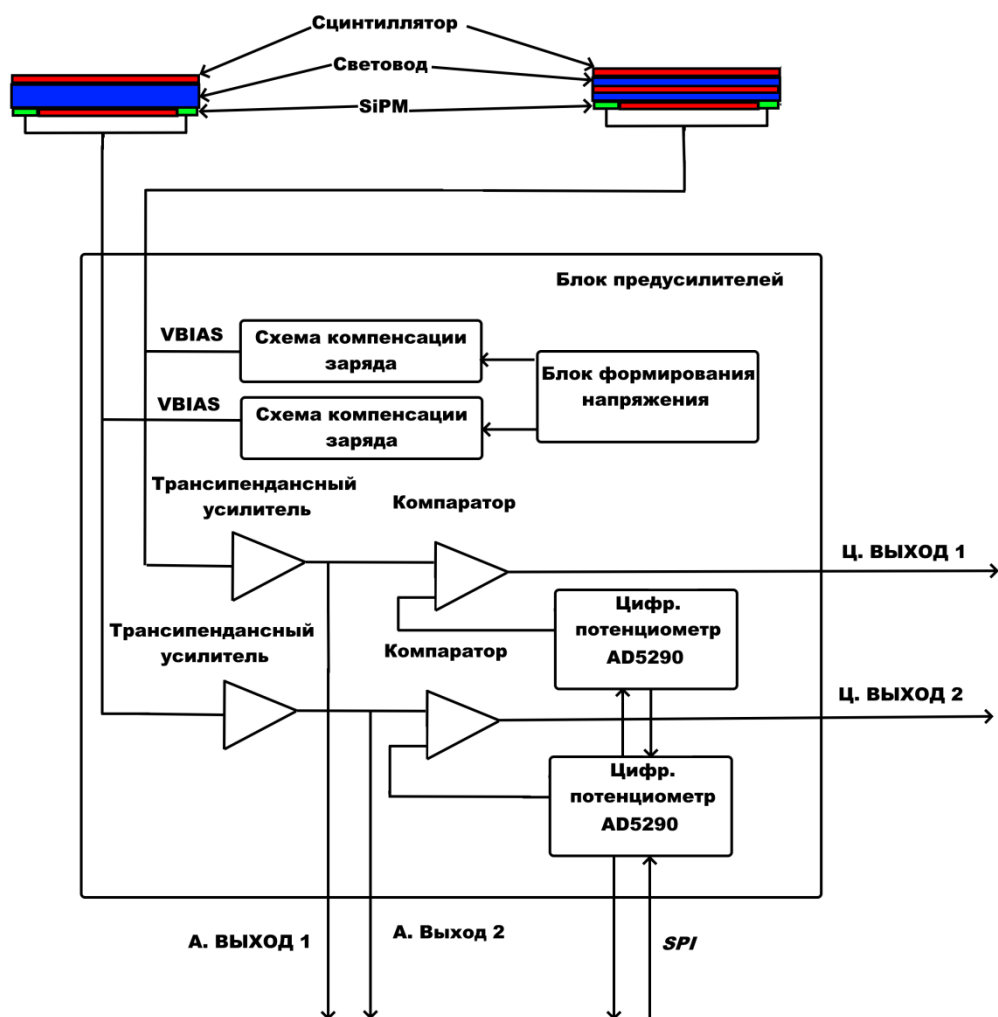


Рис. 1.

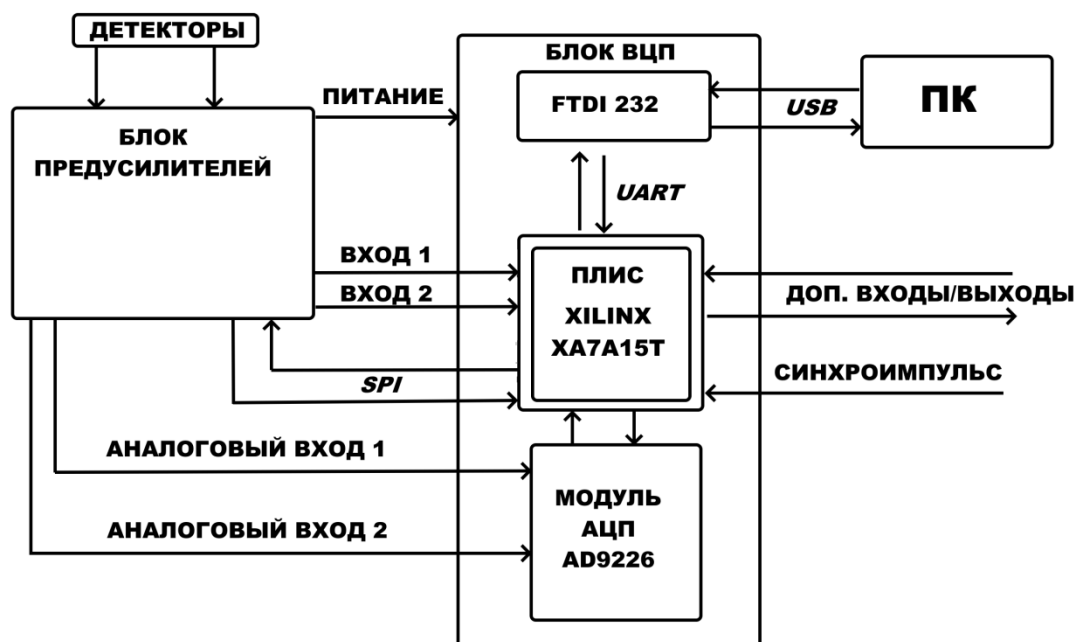


Рис 2.

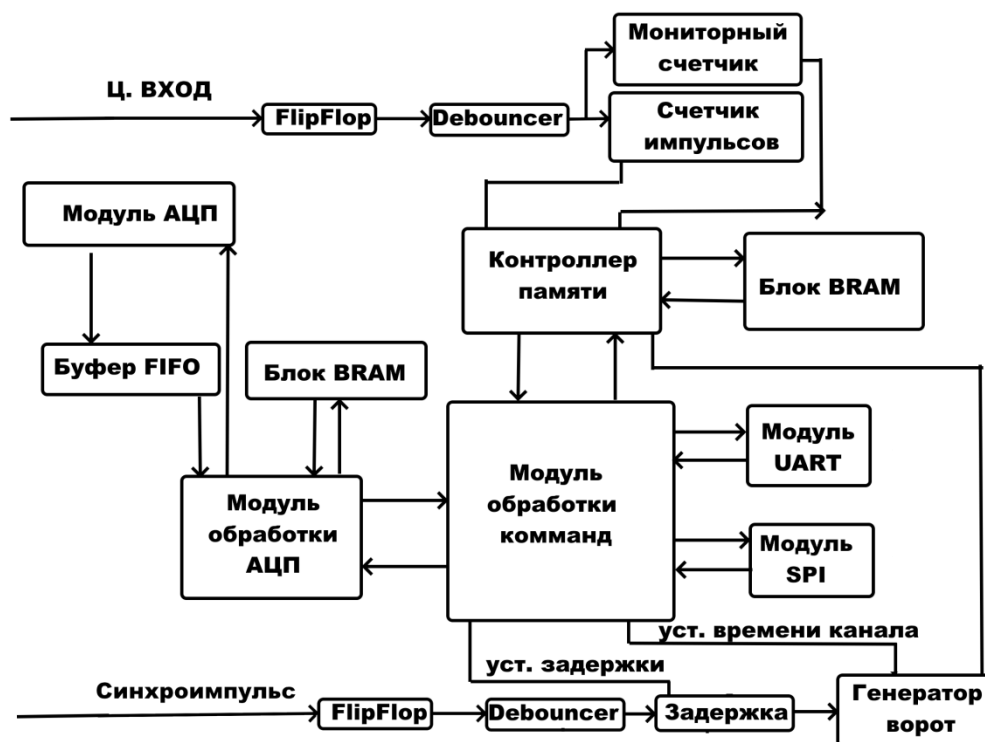


Рис. 3.

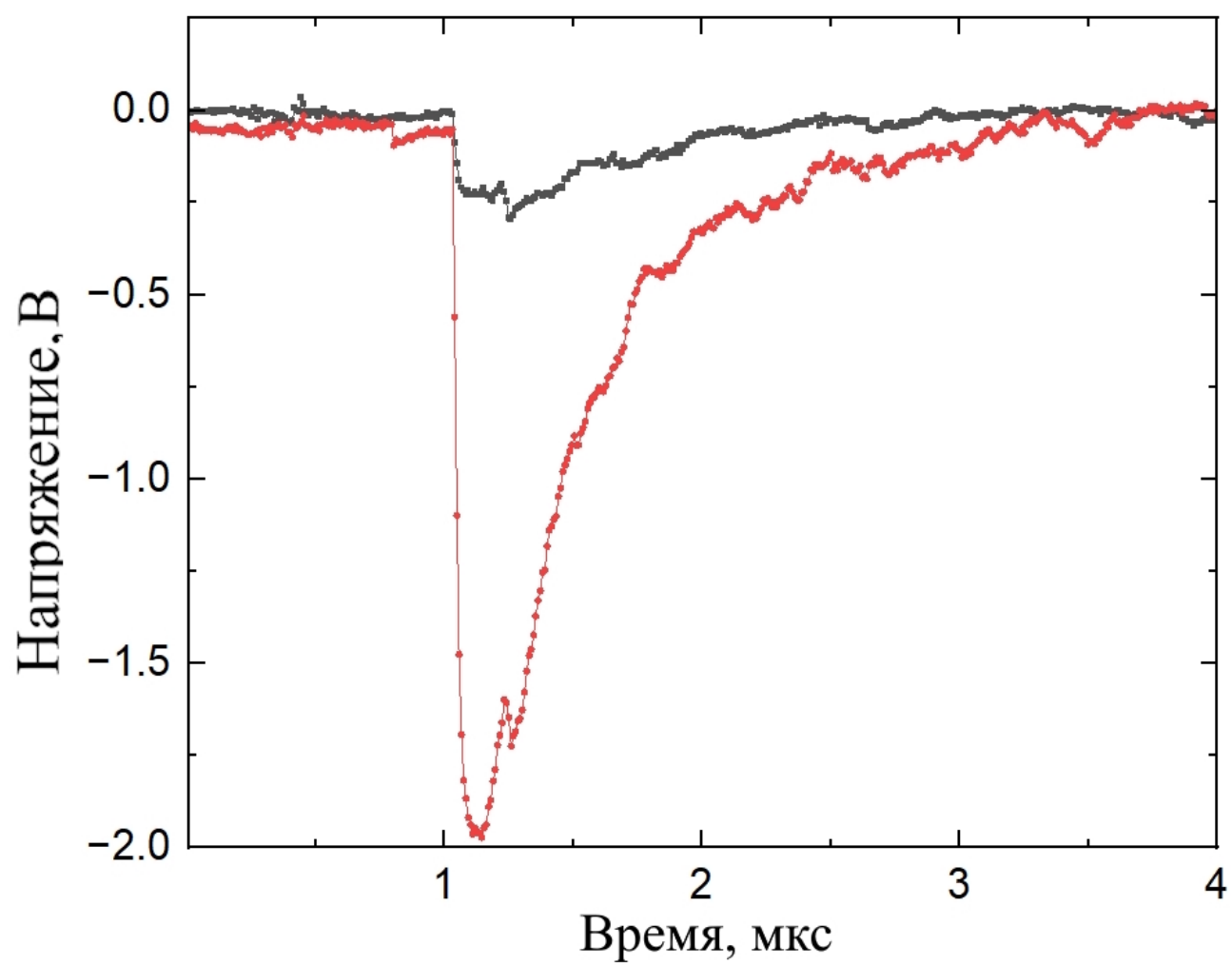


Рис. 4.



Рис. 5.