

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ДЛЯ НАСТРОЙКИ СИСТЕМ СБОРА
ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА РЕАКТОРЕ
ИБР-2М

©2026 г. В. В. Швецов ^{а, *}, В. А. Дроздов ^а, Н. В. Горбунов ^{а, б}

^а Объединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^б Государственный университет “Дубна”

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Университетская, 19

*E-mail: shvetc@jinr.ru

Поступила в редакцию 01.07.2026

После доработки 20.07.2026

Принята к публикации 28.07.2026

Целью настоящей работы являлась разработка испытательного стенда с имитатором сигналов реактора, прерывателей и детекторов для системы сбора данных на спектрометре фурье-дифрактометр высокого разрешения реактора ИБР-2М. Такая система позволит проводить испытания и комплексную отладку системы сбора данных в лабораторных условиях. Испытательный стенд обеспечивает генерирование сигналов многоканальной детекторной системы с имитацией типичного времяпролетного спектра тепловых нейтронов на фурье-дифрактометре высокого разрешения, фурье-стресс-дифрактометре и других установках. Для оценки максимальной скорости накопления данных системы МРД-32 имитатор обеспечивает формирование регулируемой интенсивности потоков для 32 детекторных сигналов и сигналов прерывателя нейтронов.

Ключевые слова: имитация времяпролетного спектра, система сбора данных, ПЛИС.

1. ВВЕДЕНИЕ

Практически весь комплекс спектрометров реактора ИБР-2М оборудован электроникой систем сбора данных МРД [1], разработанной в Лаборатории нейтронной физики и предназначенной для сбора и накопления данных с массива точечных детекторов нейтронов. Модернизация систем реактора и развитие комплекса спектрометров направлены на существенное увеличение количества нейтронов в регистрируемом потоке, поэтому для обеспечения спектрометров адекватной электроникой в ЛНФ ведется

разработка и отладка новой системы сбора данных на основе блоков MPD-32 [2].

В период остановки реактора ИБР-2М на длительный период с 2022 по 2025 годы полноценные испытания системы MPD-32 на спектрометрах были невозможны. В связи с тем, что ИБР-2М является единственным импульсным реактором в России, испытания на других реакторах также не могли быть проведены.

На большинстве спектрометров реактора ИБР-2М используются системы сбора данных на основе разработанных в лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) блоков, предназначенных для обработки и накопления данных из массива точечных детекторов нейтронов (MPD). В настоящее время в ЛНФ завершена разработка и отладка новой системы сбора данных на основе блоков MPD-32, однако вследствие длительной остановки реактора полноценные испытания системы MPD-32 на спектрометрах были невозможны. В связи с этим было решено разработать испытательный стенд с имитаторами сигналов реактора, прерывателя и детекторов для обеспечения отладки новой системы сбора данных в лабораторных условиях.

2. ВХОДНЫЕ СИГНАЛЫ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ФУРЬЕ-ДИФРАКТОМЕТРЕ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Основным методом получения данных в экспериментах на нейтронных дифрактометрах на импульсном реакторе ИБР-2М является измерение спектров времени пролета нейтронов, рассеиваемых образцом и регистрируемых набором точечных и позиционно-чувствительных детекторов. На фурье-дифрактометре высокого разрешения (ФДВР) эти данные используются для определения с высокой точностью структурных параметров и микроструктуры кристаллических веществ.

В настоящее время изготовлен и смонтирован новый детектор обратного рассеяния ДОР-А. На рис. 1 изображена схема формирования сигналов, поступающих на входы системы сбора данных ФДВР. В процессе набора спектрометрических данных 6 блоков MPD-240 с 32-канальными блоками амплитудных дискриминаторов обеспечивают временную кодировку 216 регистрируемых детекторных сигналов вместе с сигналами импульсов реактора START и сигналами PICK-UP прерывателя потока нейтронов.

Рис. 1. Схема формирования сигналов, поступающих на входы системы сбора данных ФДВР

Сигнал реактора START соответствует периодическому импульсу нейтронов на выходе холодного замедлителя реактора ИБР-2М с частотой 5 Гц и длительностью около 2 мкс. Передний фронт этого сигнала задает временную метку старта для измерения времени пролета нейтронами расстояния до места регистрации детектором.

Фурье-прерыватели на спектрометрах высокого разрешения, таких как ФДВР, ФСД и ФСС, позволяют улучшить характеристики временного разрешения за счет использования корреляционной обработки данных по методу обратного времени пролета (RTOF) [2].

Сигнал прерывателя PICK-UP отражает функцию пропускания прерывателя потока нейтронов. Фурье-прерыватель представляет собой вращающийся диск с 1024 прорезями по окружности. В процессе накопления данных одного измерения диск вращается по определенному закону изменения скорости вращения от нуля до максимальной – около 6000 об/мин. При максимальной скорости вращения прерыватель обеспечивает модуляцию потока нейтронов с частотой 102.4 кГц [3]. Соответствующий сигнал PICK-UP непрерывно оцифровывается в процессе набора данных.

На установках ФДВР и ФСД для регистрации нейтронов, рассеиваемых образцом, используются сцинтилляционные детекторы на основе ZnS-экранов с формирователями детекторных сигналов на ФЭУ. В зависимости от типа сцинтиллятора сигналы детекторов имеют разную форму и требуют различной предварительной обработки и фильтрации.

3. ТРЕБОВАНИЯ К ИМИТАТОРУ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ НА ФУРЬЕ-ДИФРАКТОМЕТРЕ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Для отладки разрабатываемой системы сбора данных на основе новых блоков MPD-32 необходимо обеспечивать формирование всех входных сигналов спектрометра в соответствии с характеристиками, приближенными к реальным сигналам в процессе набора данных измерений на реакторе.

Формирование сигналов реактора START и сигнала прерывателя PICK-UP определяется известными характеристиками этих сигналов.

Для разработки имитатора детекторных сигналов необходимо оценить их временные характеристики по имеющимся экспериментальным данным.

На рис. 2 изображены дифракционные спектры низкого разрешения для 32 детекторов на ФДВР, полученные системой сбора данных MPD-240 при средней интенсивности входного потока нейтронов. Общая форма времяпролетных спектров соответствует распределению энергии тепловых нейтронов, используемых в исследованиях на ФДВР.

Рис. 2. Вид 32 TOF-спектров низкого разрешения на ФДВР

Набор спектров осуществлялся в течение 2 мин при ширине временных каналов 64 мкс для построения гистограмм времени пролета. По этим данным можно оценить максимальную пиковую интенсивность потока регистрируемых нейтронов.

Для оценки пиковой интенсивности нейтронов в представленном наборе спектров используется формула

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{32} n_i}{t_c k}, \quad (1)$$

где n_i – число нейтронов, зарегистрированных по i -му каналу, t_c – ширина временного канала, k – число стартов реактора за время набора спектра.

В данном измерении пиковая интенсивность для канала 200, находящегося в районе максимума распределения нейтронов, составила около $4 \cdot 10^6$ нейтронов/с. Набор представленных данных проводился на двух блоках системы MPD-240 и соответствовал максимальной пропускной способности такой системы сбора данных.

Система сбора данных MPD совместно с имитатором детекторных сигналов формирует набор многоканальных спектрометрических данных. Для проверки максимальной пропускной способности всей системы сбора данных необходимо обеспечить регулировку потока входных данных и идентификацию спектров за счет детерминированного положения пиков для различных детекторных каналов. Дополнительным требованием может быть имитация детекторных сигналов сцинтиллятора ZnS, характеризующихся формированием пачки импульсов, порождаемых повторными взаимодействиями. В блоках MPD-240 и MPD-32 предусмотрена дополнительная цифровая фильтрация, обеспечивающая выделение сигналов тепловых нейтронов и привязку к начальному импульсу в пачке сигналов.

4. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА МОДУЛЯ ИМИТАТОРА СИГНАЛОВ

Модуль имитатора реализован в виде NIM-блока, он включает цифровой имитатор сигналов на ПЛИС отладочной платы “Cyclone V Starter Kit” и платы формирователей аналоговых выходных сигналов (рис. 3). Характеристики модуля приведены в табл. 1.

Рис. 3. Модуль имитатора сигналов

Таблица 1. Характеристики имитатора сигналов

Характеристика	Значение
Диапазон частот сигналов прерывателя, кГц	0 – 102.4
Максимальная частота сигналов на один детекторный канал, МГц	~ 20
Амплитуда выходных сигналов, В	–0.25 ÷ –1
Максимальная интенсивность задаваемого псевдослучайного шума на один канал, событий/с	$8 \cdot 10^6$

Максимальная интенсивность задаваемого фона нейтронов на один канал, событий/с	$8 \cdot 10^6$
Число выходных детекторных сигналов	32

Функциональная схема имитатора (рис. 4), реализованная на основе ПЛИС, включает следующие блоки: генератор сигналов реактора START, генератор сигналов прерывателя PICK-UP, имитатор сигналов шума, имитатор сигналов фона тепловых нейтронов, блок имитатора индивидуальных детерминированных сигналов 32 детекторов, имитатор вторичных сигналов сцинтиллятора ZnS и блок сумматора, формирующий 32 импульсных сигнала детекторов.

Рис. 4. Функциональная блок-схема имитатора сигналов

Формирование детекторных сигналов синхронизируется от генератора сигналов реактора START.

Параметры, установленные через регистры в прошивке ПЛИС, позволяют задавать частоту сигналов прерывателя, уровень псевдослучайного шума, уровень общего фона тепловых нейтронов, интенсивность индивидуальных детекторных сигналов, а также добавлять имитацию серии вторичных импульсов, возникающих в сцинтилляторе ZnS(Ag).

Изменение уровня начальной интенсивности фона тепловых нейтронов позволяет задавать пиковую загрузку детекторных сигналов и усредненный поток входных данных для отлаживаемой системы сбора данных. Имитатор формирует сигналы детекторов на временном интервале со спадающим уровнем интенсивности тепловых нейтронов в соответствии с временным окном, обычно задаваемым в экспериментах на ИБР-2М.

Для проверки работы временного кодировщика MPD-32 задаются детерминированные индивидуальные детекторные сигналы, позволяющие оценить искажения спектров, вызванные потерей данных при больших нагрузках.

Изменяя параметры имитатора сигналов, можно получить сигнал с требуемой частотой импульсов и загрузкой для конкретного спектрометра. При необходимости возможно изменение формы геометрической функции на уровне программируемой логики.

Плата выходных драйверов включает 32 формирователя аналоговых детекторных сигналов D_1 – D_{32} и два формирователя NIM-сигналов для выходов PICK-UP и START. Формирователи детекторных сигналов построены на ОУ ОРА134 фирмы Texas Instruments.

В зависимости от ширины импульсов, подаваемых на входы инверторов, можно имитировать шумовые и полезные сигналы детектора с разными амплитудами и

длительностями. На рис. 5 представлены результаты моделирования аналогового формирователя сигналов при задании ширины входных импульсов в диапазоне от 25 до 150 нс. При этом амплитуда выходных сигналов изменяется в диапазоне от –250 до 1000 мВ. Устанавливая пороги дискриминаторов на уровне около 75 мВ на MPD-32, получаем входные импульсы кодировщика, изменяющиеся в диапазоне от 50 до 200 нс.

Рис. 5. Моделирование работы аналогового драйвера

Формирователи детекторных сигналов обеспечивают генерирование сигналов с разными длительностями для имитации сигналов шума и тепловых нейтронов. Эта функция вместе с имитацией сигналов сцинтиллятора ZnS может быть использована для отладки цифровой фильтрации сигналов в блоках системы сбора данных MPD-32. В частности, важной задачей для внедрения нового сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов АСТРА-М на ФСД [5] является имитация серии вторичных импульсов, возникающих в сцинтилляторе ${}^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$, для проверки корректности работы цифрового фильтра. Вид сигналов световых импульсов, полученных на детекторе АСТРА, приведен на рис. 6 [6].

Рис. 6. Форма светового импульса, создаваемого на сцинтилляционном экране ND

В результате отладки разработанного блока подобраны параметры формирователей сигналов, позволяющие получать спектры в системе сбора данных MPD-32, имитирующие времяпролетные спектры с точечных детекторов ФДВР. Это позволяет выполнять отладку блоков MPD-32 и программного обеспечения всей системы сбора данных в лабораторных условиях до начала работы реактора. Одновременно с изготовлением отдельного блока имитатора сигналов функционал цифровой части имитатора встроен в программируемую логику блока кодировщика MPD-32 для имитации этих сигналов в тестовом режиме работы блоков без подключения входных сигналов. Ниже показаны спектры детекторных сигналов по 32 каналам, полученные системой MPD-32 в тестовом режиме при различных интенсивностях имитируемых сигналов. Набор представленных спектров проводился в течение 3-4 с с шириной временного канала 32 мкс. Для каждого канала заданы детерминированные пики событий, имитирующие выбросы нейтронов.

На рис. 7 представлено отображение 32 спектров, полученных системой MPD-32 в режиме приема внешних сигналов с имитатором 32 детекторных сигналов при отсутствии потерь данных. Имитатор сигналов позволяет генерировать набор спектров, схожий по параметрам с времяпролетными спектрами на установках ИБР-2М со сцинтилляционными детекторами.

Рис. 7. Спектр для 32 детекторных сигналов с имитатора без потерь данных

С увеличением интенсивности потока данных можно наблюдать искажения спектров (рис. 8), обусловленные недостаточным объемом памяти буфера FIFO в ПЛИС и контроллере USB 3.0 FTDI DT600, а также малостью пропускной способностью кодировщика модуля. Максимальная пропускная способность MPD-32 составила $1 \cdot 10^7$ событий/с.

Рис. 8. Спектр для 32 детекторных сигналов с имитатора с потерями в модуле MPD-32

На рис. 9 представлена спектрометрическая диаграмма, полученная в тестовом режиме работы MPD-32. Такая форма характерна в случае потери данных на этапе передачи данных в компьютер по интерфейсу USB 3.0. В этом случае искажения различных спектров идентичны для разных детекторных каналов, так как потери данных не зависят от номера детектора.

Рис. 9. Спектр для 32 детекторных сигналов с имитатора с потерями данных в интерфейсе связи

Представленный прибор может быть адаптирован для работы на любом спектрометре реактора ИБР-2М. Для другого спектрометра достаточно изменить функцию распределения, интенсивность нейтронов и коэффициенты спада фона нейтронов через управляющие регистры в микропрограмме ПЛИС.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный испытательный стенд с имитатором сигналов позволяет в лабораторных условиях проводить тестирование комплекса системы сбора данных из нескольких модулей с аналоговыми дискриминаторами, а также выполнять функции универсального испытательного стенда для комплекса спектрометров ИБР-2М. Для тестирования цифровой части модуля имитатор тестовых сигналов встроен в программную логику ПЛИС цифровых модулей MPD-32.

Результаты испытаний имитатора сигналов, проведенные в рамках данной работы, показывают возможность проверки пропускной способности и работоспособности блоков MPD-32 при разных уровнях загрузки, а также позволяют по форме искажений полученных спектров определить причину потери данных для MPD-систем сбора данных, используемых на установках реактора ИБР-2М.

Авторы выражают благодарность Мурашкевич С.М. за разработку программ сбора и обработки данных в тестовом режиме блока MPD-32 и подготовку результатов для визуализации спектров средствами программного комплекса SONIX+ [7] НЭОКС ЛНФ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов С.А., Приходько В.И. ЭЧАЯ. 2016. Т. 47. № 4. С. 1288.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=44311869>
[Kulikov S.A., Prikhodko V.I. Physics of Particles and Nuclei. 2016. V. 47. № 4. P. 702.
<https://doi.org/10.1134/S1063779616040092>]
2. Bogdzal A.A., Drozdov V.A., Kruglov V.V., Murashkevich S., Prikhodko V.I., Shvetsov V.V.
Proc. 27th International Symposium Nuclear Electronics and Computing (NEC'2019).
Budva, Becici, Montenegro, 2019, V. 2507, P. 142.
<https://ceur-ws.org/Vol-2507/142-146-paper-24.pdf>
3. Péogyry H., Hiisméaki P., Virjo A. Nucl. Instr. Meth. 1975. V. 126. P. 421.
<https://doi.org/10.1016/0029-554X%2875%2990707-7>
4. Балагуров А.М., Бобриков И.А., Бокучава Г.Д., Журавлев В.В., Симкин В.Г. ЭЧАЯ.
2015. Т. 46. № 3. С. 453. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48957460>
5. Bokuchava G. Crystals. 2018, V. 8. No. 8. P. 318. <http://doi.org/10.3390/cryst8080318>
6. Kuzmin E.S., Balagurov A.M., Bokuchava G.D., Zhuk V.V., Kudryashev V.A., Bulkin
A.P., Trounov V.AJ. Neutron Res. 2002. V. 10. № 1. P. 31.
<https://doi.org/10.1080/10238160290027748>
7. Публикации по программному комплексу Sonix+[сайт] Объединенный институт
ядерных исследований. Дубна.
<http://sonix.jinr.ru/wiki/doku.php?id=ru:publications> (дата обращения: 01.07.2026)

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема формирования сигналов, поступающих на входы системы сбора данных фурье-дифрактометра высокого разрешения
- Рис. 2.** Вид 32 TOF-спектров низкого разрешения на фурье-дифрактометре высокого разрешения
- Рис. 3.** Модуль имитатора сигналов.
- Рис. 4.** Функциональная блок-схема имитатора сигналов.
- Рис. 5.** Моделирование работы аналогового драйвера.
- Рис. 6.** Форма светового импульса, создаваемого на сцинтилляционном экране ND при захвате нейтронов: **а** – усредненная форма волны (1000 событий), **б** – индивидуальный импульс.
- Рис. 7.** Спектр для 32 детекторных сигналов от имитатора без потерь данных.
- Рис. 8.** Спектр для 32 детекторных сигналов от имитатора с потерями в модуле MPD-32.
- Рис. 9.** Спектр для 32 детекторных сигналов от имитатора с потерями данных в интерфейсе связи

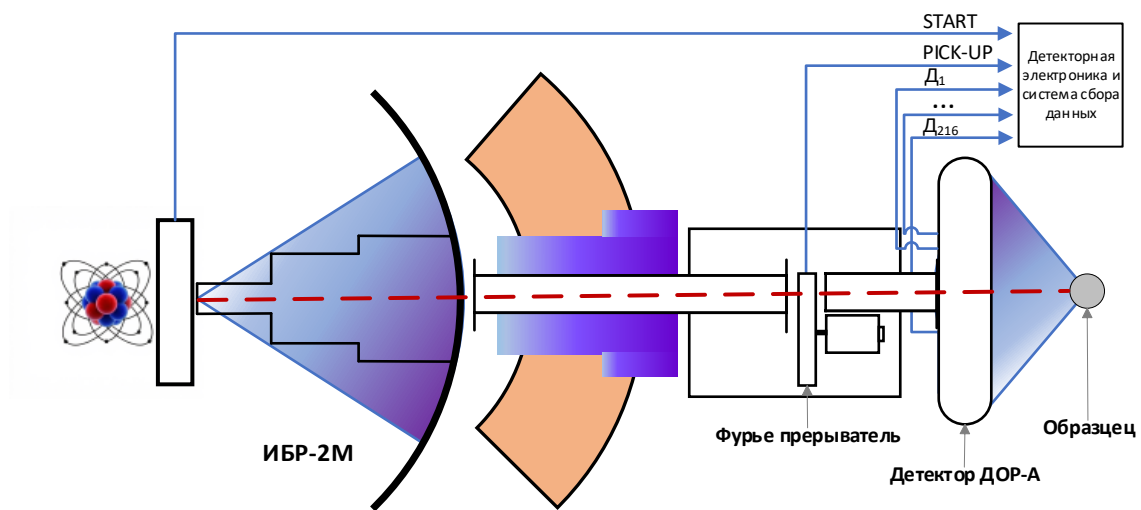


Рис. 1.

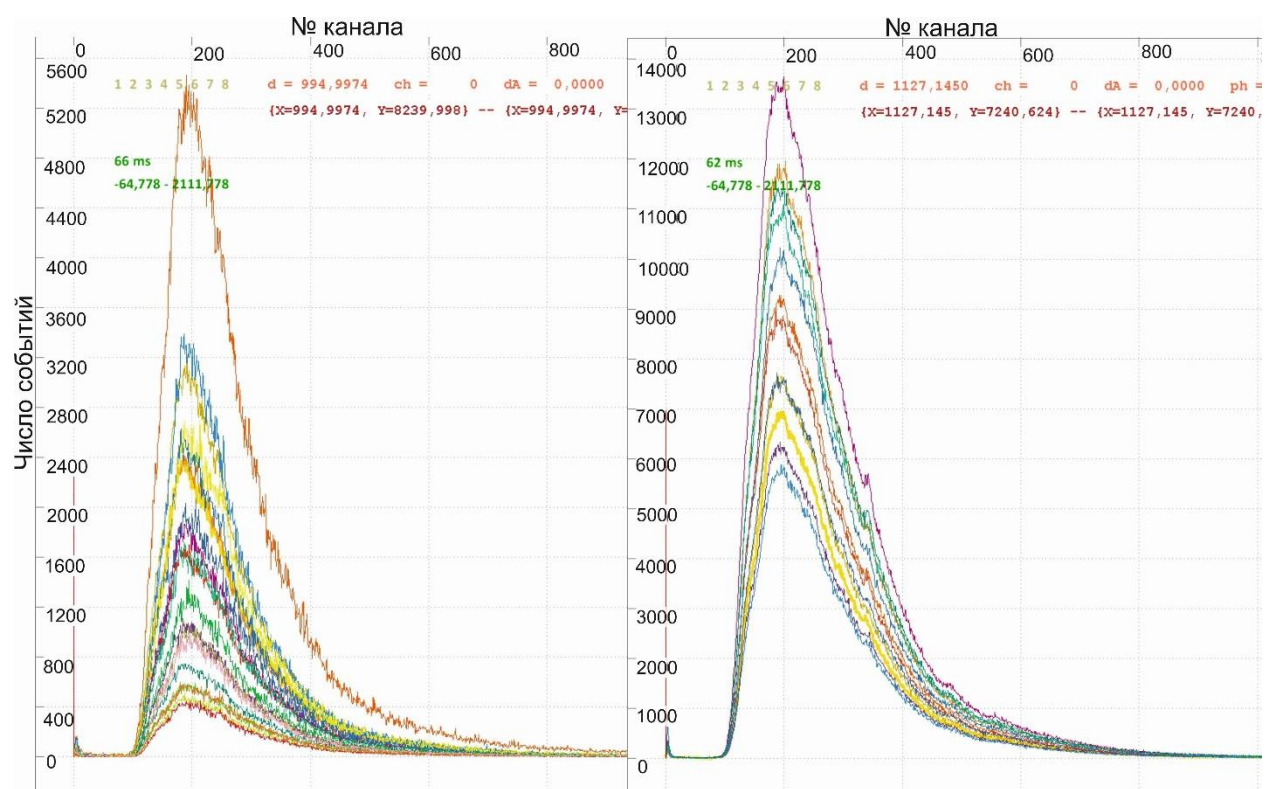


Рис. 2.

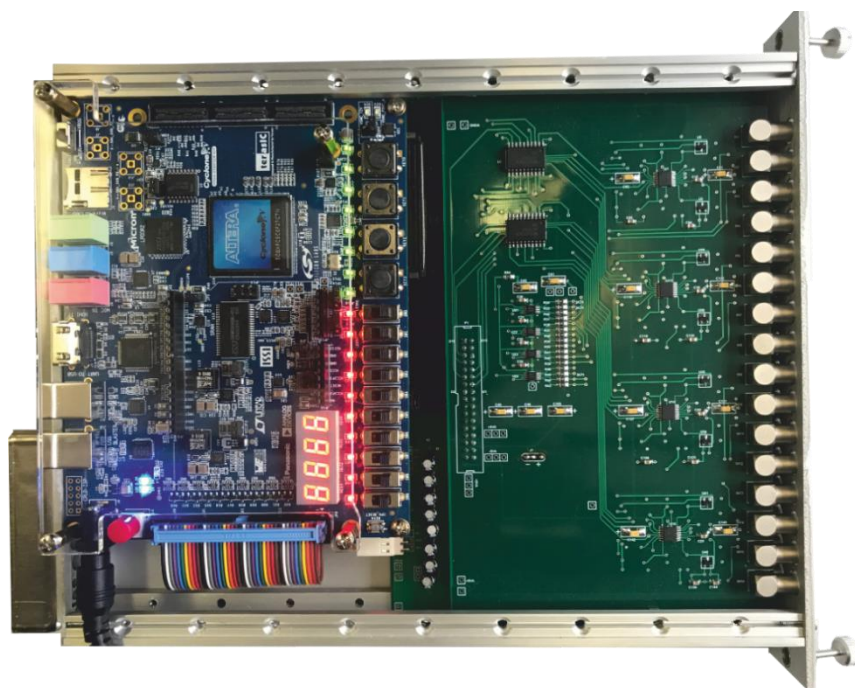


Рис. 3.

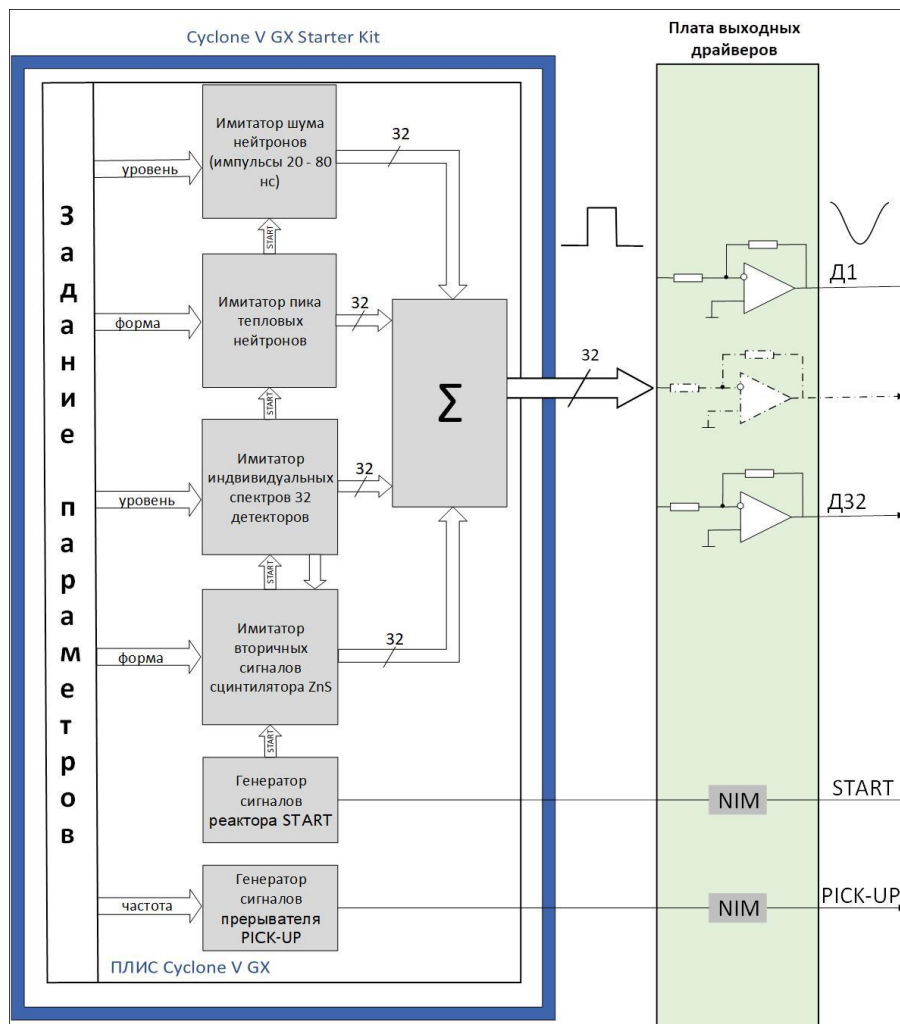


Рис. 4.

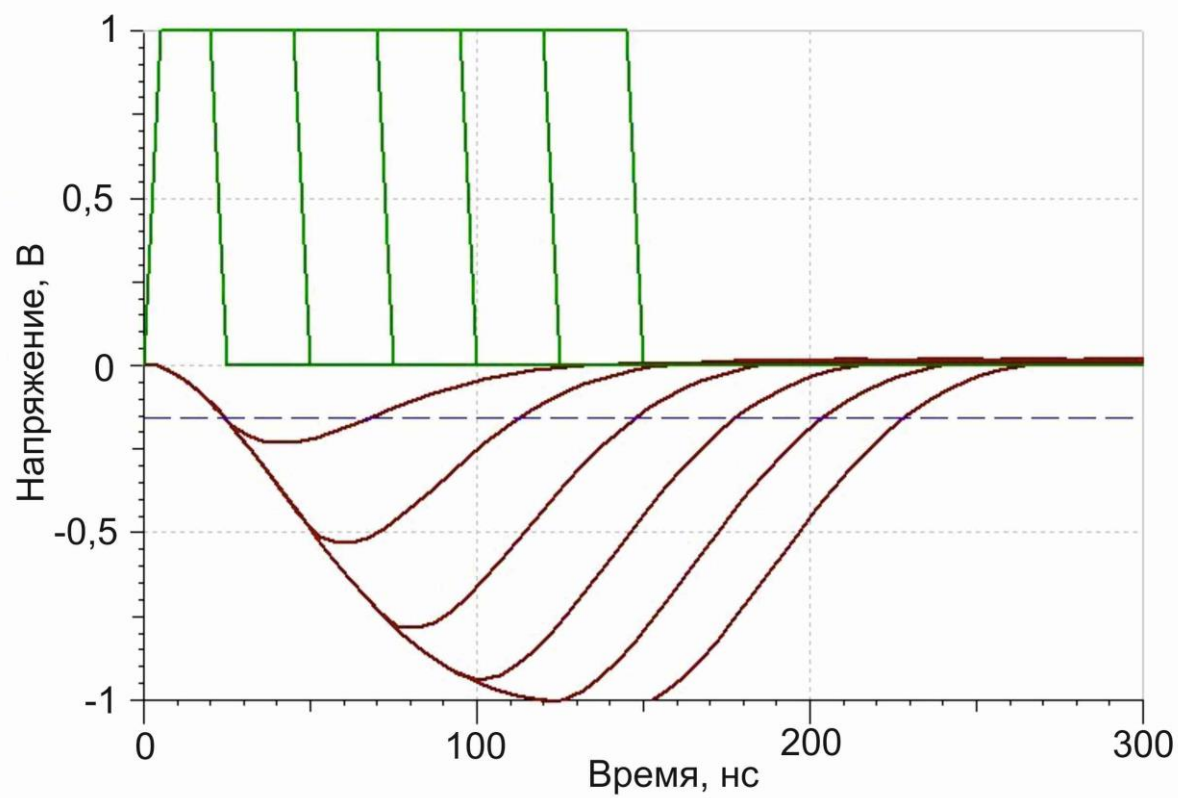


Рис. 5.

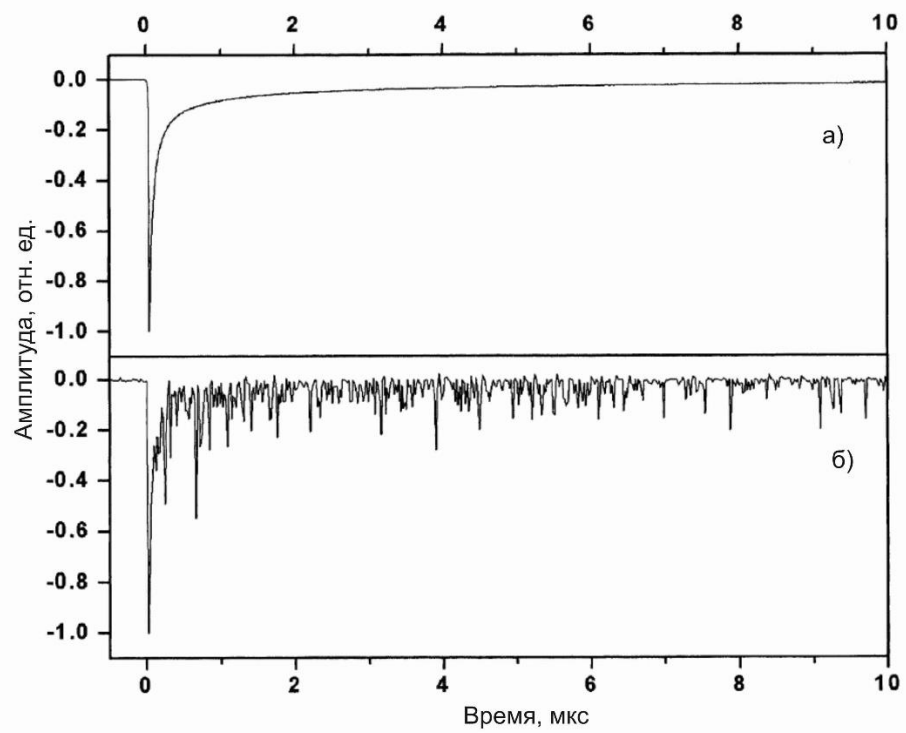


Рис. 6.

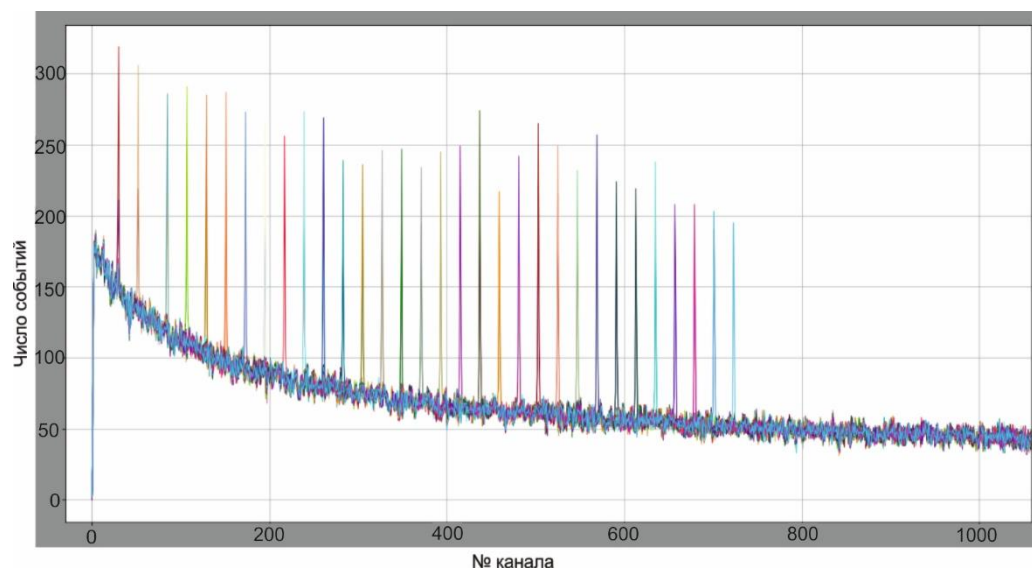


Рис. 7.

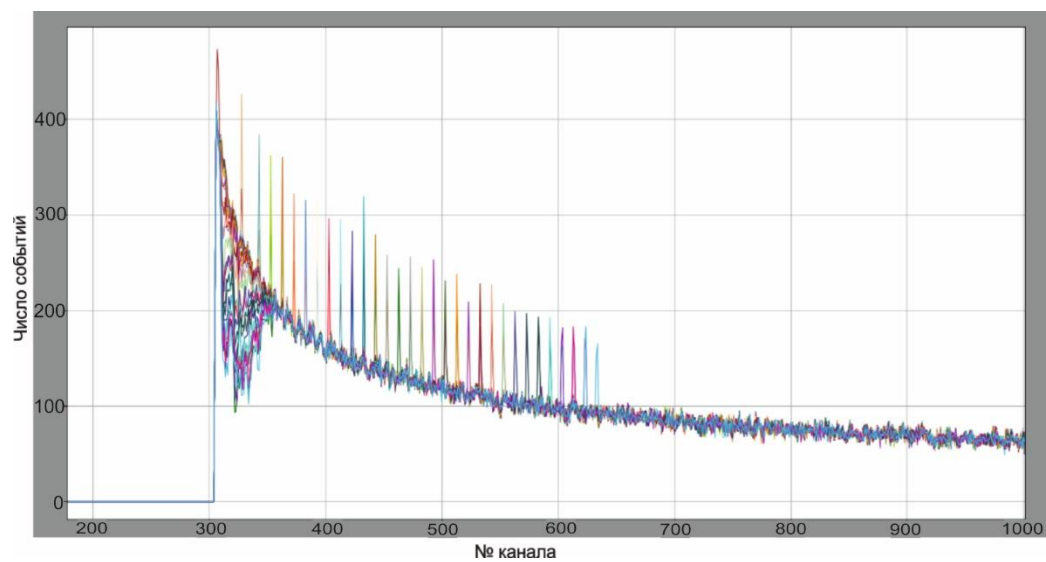


Рис. 8.

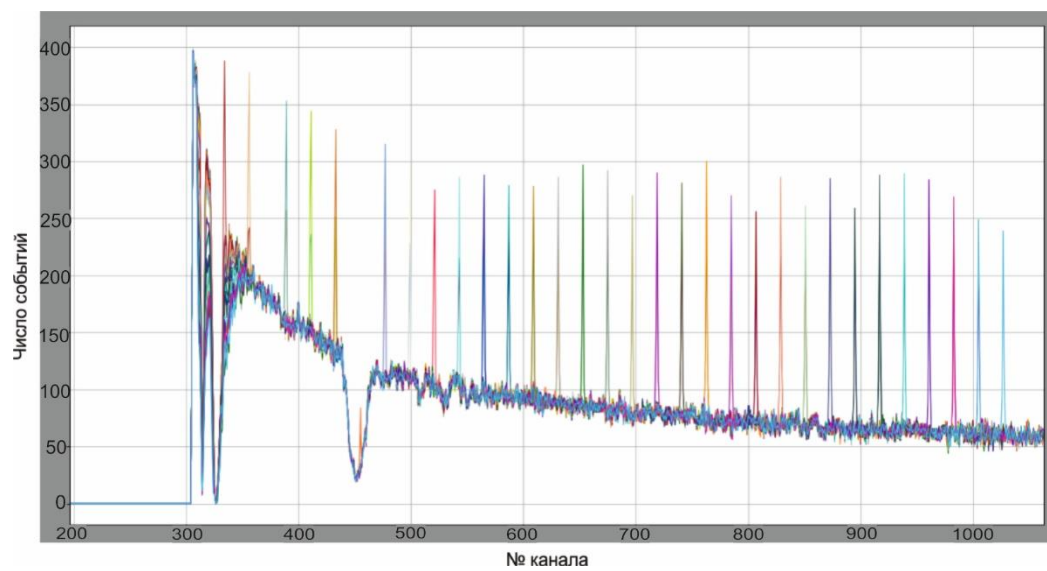


Рис. 9.