

УДК 539.1.07

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ 4-КАНАЛЬНОЙ БЫСТРОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ДЕТЕКТОРА НА МКП

© 2024 г. Ф. Ф. Валиев¹, Н. И. Калиниченко¹, Н. А. Макаров^{1,*}, Г. А. Феофилов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: n.a.makarov@mail.spbu.ru

Поступила в редакцию 16.03.2024

После доработки 24.03.2024

Принята к публикации 29.04.2024

С использованием программной среды Quartus выполнено моделирование временных измерений для быстрого монитора столкновений пучков частиц на основе шевронных сборок микроканальных пластин (МКП). Алгоритм измерений основан на методе задержанных совпадений. Создана 4-канальная электроника для детектора на МКП на основе быстродействующих компараторов и FPGA EPM240 фирмы ALTERA. Проверка тестового прототипа проведена с использованием 4-канального генератора наносекундных импульсов с регулируемой задержкой между каналами. При использовании данных компараторов и FPGA установлена возможность определения времени регистрации частиц детектором с погрешностью 100 пс, при этом расчетное быстродействие схемы считывания совпадает с измеренным и составляет для 4-канальной системы не более 10 нс на каждое событие.

Ключевые слова: коллайдер NICA, программируемая логическая интегральная схема, монитор столкновений пучков, микроканальная пластина

DOI: 10.31857/S0367676524080231, **EDN:** OOWRTW

ВВЕДЕНИЕ

Исследование свойств материи с максимальной барионной плотностью на коллайдере NICA в ОИЯИ предполагает сканирование по энергии столкновения и по размерам сталкивающихся ядер с измерением различных наблюдаемых. Одной из основных задач в физической программе комплекса NICA является по-событийное исследование процессов рождения странных и мультистранных частиц [1]. Для прецизионного определения вторичных вершин распада короткоживущих странных частиц в настоящее время развиваются новые технологии для вершинных кремниевых детекторов, призванные повысить эффективность регистрации частиц в мягкой области спектра [2]. Особый интерес представляют гипероны и гиперядра, выходы которых оказываются чувствительными к эффектам ядерной плотности и к характеристикам среды, образующейся на раннем этапе столкновений [1]. В связи с этим существует необходимость точной информации о начальном состоянии системы для каждого события сталкивающихся ядер, в том числе о плотности энергии в области взаимодействия. Поэтому особое место занимает быстрый отбор событий ядро-ядерных столкновений, удовлетворяющих определенным критериям и реализуемый в условиях светимости коллайдера NICA на уровне $L = 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для A+A столкновений.

Так, прецизионное определение времени и места столкновения ядер в экспериментах на встречных пучках тяжелых ионов на коллайдере NICA важно для регистрации событий, удовлетворяющих заданным начальным условиям, например, для отбора только самых центральных столкновений. Кроме того, вершина события должна находиться в пределах заданного аксептанса, необходимо режектировать фоновые события, связанные с взаимодействием пучка с остаточным газом, а также случаи наложения событий (т. н. pile-up). Для решения перечисленных задач предложен быстрый монитор столкновений пучков — Fast Beam-Beam Collisions Monitor (FBBC) на основе МКП [3]. Многоанодные кольцевые МКП-детекторы, расположенные симметрично относительно центра экспериментальной установки, могут позволить получать для каждого столкновения ядер информацию о координате и времени столкновения, а также множественности заряженных частиц в области больших быстрой.

С целью пособытийного восстановления координаты, а также быстрой оценки класса центральности столкновения ядер ранее были проведены исследования с использованием средств машинного обучения [4, 5], которые позволили предложить варианты FBBC с постановкой детекторных МКП колец как внутри, так и вне ионопровода.

Здесь мы рассматриваем возможные конфигурации системы МКП детекторов, систему быстрого считывания информации, результаты моделирования и тестирования 4-канальной электроники быстрого считывания.

КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ МКП ДЕТЕКТОРОВ

На рис. 1 представлена конфигурация системы, состоящей из шести детекторных колец на микроканальных пластинах расположенных — для первого варианта внутри ионпровода.

В случае второго варианта возможна установка двух кольцевых многосекционных МКП детекторов в отдельных вакуумных камерах, расположенных вне ионпровода симметрично от точки взаимодействия. На рис. 2 представлена конфигурация такой внешней системы, состоящей из двух 32-канальных детекторов. Эту систему мы рассматриваем ниже, как базовую для разработки аппаратной реализации быстрой многоканальной электроники для детектора на МКП.

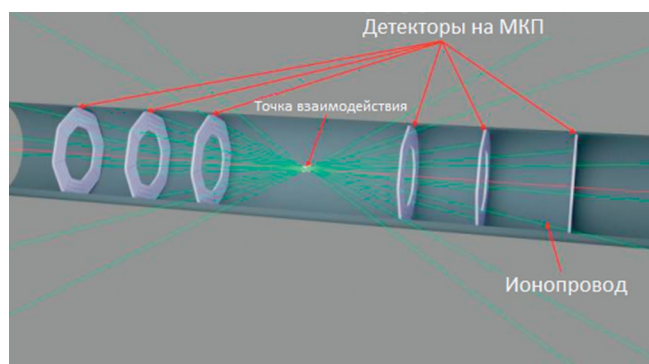


Рис. 1. Конфигурация системы, состоящей из шести детекторов на МКП с внутренними кольцами из МКП детекторов.

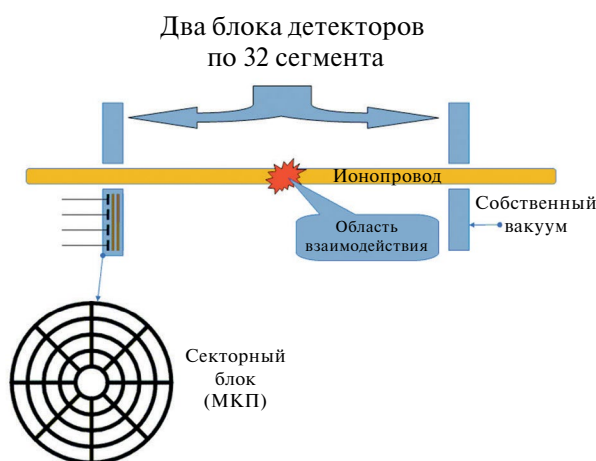


Рис. 2. Схема конфигурации детектора № 2. Большие кольца детектора (не в масштабе).

Детектор состоит из восьми сегментов по четыре анода в каждом. Каждый анод регистрации через схему дискриминации (компаратор с регулируемым порогом) соединен с индивидуальным преобразователем время — код.

С учетом частоты повторения банчей на коллайдере NICA можно получить требования для выполнения обработки в реальном времени. Основное требование к системе регистрации — время считывания, оцифровки и передачи информации о номере канала не должно превышать 20 нс. Кроме того, время прихода частицы на детектор должна определяться с точностью порядка 100 пс.

Время-цифровые преобразователи (ВЦП) можно разделить на ВЦП прямого счета, “уилкинсоновского” и нониусного типа. ВЦП “уилкинсоновского” типа позволяют получить временное разрешение менее 10 пс [6], но зарядка и последующая разрядка конденсатора длительный процесс и время преобразования составляет десятки мкс. Нониусный метод аналогичен дискретному счету, в котором идет подсчет числа тактовых импульсов генератора в течение измеряемого промежутка времени с помощью счетчика, но кроме генератора счетных импульсов, в схеме имеется генератор нониусных импульсов. Это позволяет повысить точность преобразования и применять их в субнаносекундной области [7–9].

Применение программируемых логических интегральных схем (ПЛИС/FPGA) с высоким быстродействием и большим количеством элементов дает возможность создать компактные, полностью интегральные и программируемые ВЦП.

ВЦП прямого счета на базе ПЛИС Altera EPF10K50VRC240-3 с типовым временем задержки на вентиль 2.5 нс и тактовой частотой между сигналами START и STOP 40 МГц показан в работе [10]. Цена одного канала измерения порядка 2.5 нс, а диапазон измеряемых интервалов времени от 2.5 нс до 2.8 мкс.

Применение нониусного принципа на порядок повысило разрешающую способность. Восьми-канальный ВЦП с переменным размером ячейки до 0.28 нс был реализован в ПЛИС Xilinx Kintex-7 [11]. Входной сигнал делился на четыре с частотой опорного тактового сигнала 110 МГц. Временное разрешение составило 0.08–0.10 нс, а минимальная задержка от входного сигнала до выхода буфера 0.21 мкс. В работе [12] на ПЛИС Kintex-7 реализован 128-канальный ВЦП с мертвым временем 1.47 нс, динамическим диапазоном 360 нс и среднеквадратичным разрешением менее 10 пс.

Недостатком вышеперечисленных устройств является низкая пропускная способность системы коррекции линейности выходных данных, что не позволяет в режиме реального времени получать информацию о столкновении частиц.

Ниже представлены результаты моделирования и тестирования 4-канальной электроники быстрого

до детектора, время прихода ионов до центра установки и удвоенная длительность банча. В момент прихода сигнала Stop происходит фиксация состояний выходов измерительных линии задержки.

На выходах триггеров возникает информация в термометрическом коде, соответствующая опережению импульсом Start импульса Stop, то есть о времени задержки. Таким образом, в момент прихода сигнала Stop происходит фиксация состояний выходов измерительных элементов задержки. Далее термометрический код преобразуется в двоичный.

Более подробно один из элементов, на котором построен преобразователь время—код представлен на рис. 5, временная диаграмма, поясняющая особенности работы этой системы представлена справа.

Сброс осуществляет сброс ячейки в исходное состояние по окончании измерения, когда данные считаны. Нами также была проведена эмуляция работы преобразователя время—код в программной среде Quartus [13]. На рис. 6. приведен пример временной диаграммы, полученной в результате моделирования в среде Quartus отработки системой пары импульсов Start-Stop со сдвигом 380 пс.

Можно видеть распространение сигнала через элементы задержки, момент срабатывания триггера с задержкой времени работы триггера, момента появления выходного термометрического кода и далее срабатывание дешифратора, который преобразует термометрический код в двоично-взвешенный. События начинаются с импульса Start в момент 4 нс, далее с задержкой чуть больше 2.5 нс следует сигнал

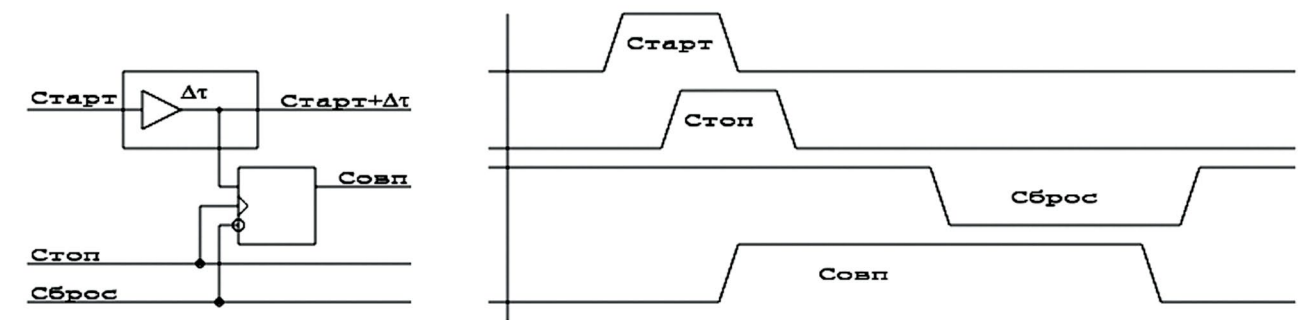


Рис. 5. Элемент, на котором построен преобразователь время—код и временная диаграмма.

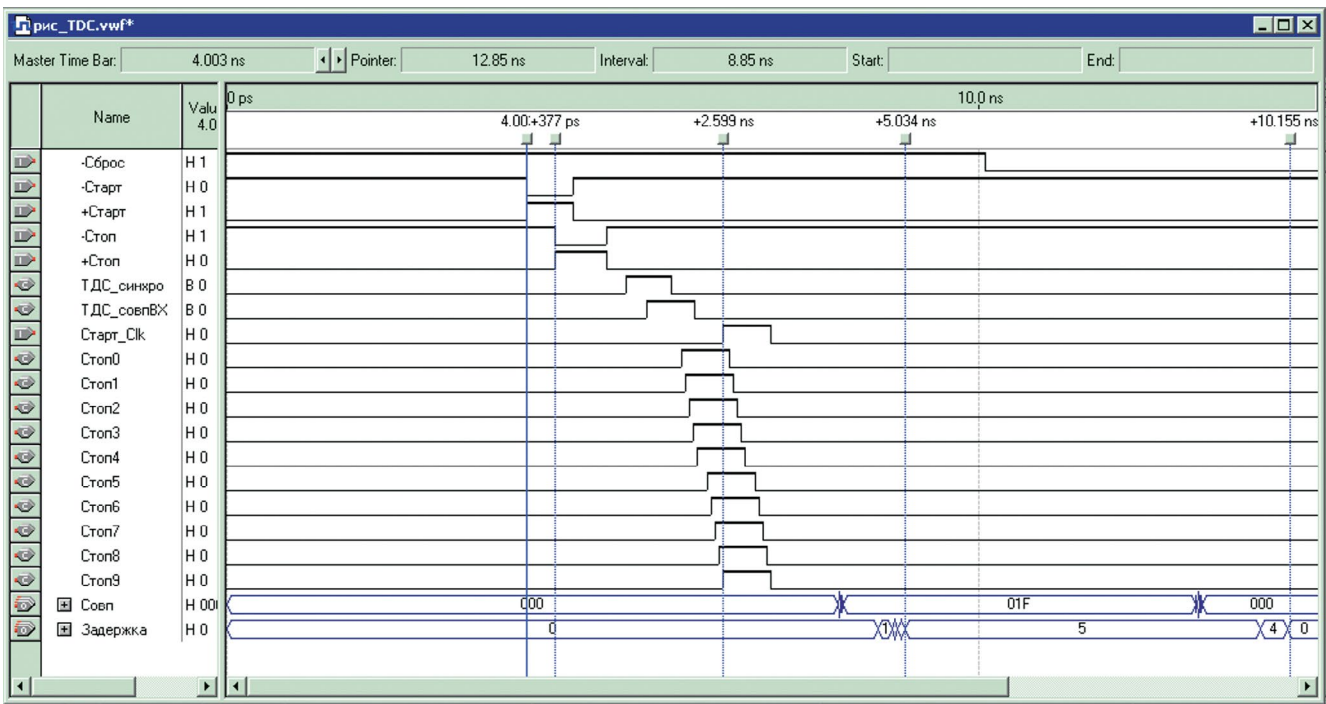


Рис. 6. Диаграмма, полученная в результате моделирования в среде Quartus [13] отработки системой пары импульсов Start-Stop со сдвигом 380 пс.

фиксации термометрического кода и через 5 нс после прохождения фронта сигнала Start вся система отработала и код, соответствующий задержке 5 элементарных задержек, сформирован на выходе преобразователя время-код.

Из рис. 6 видно, что время работы преобразователя из термометрического кода в двоичный в FPGA для одного канала не превосходит 6 нс, задержка сброса составляет 3 нс.

Для 32 канальной системы регистрации координаты и времени по сигналам с детекторов на МКП, построенной на основе разработанной схемы, с учетом всех задержек расчетное время обработки не превысит 20 нс.

Проведенное моделирование работоспособности предложенной системы с использованием САПР Quartus (среды для проектирования и отладки проектов на FPGA Altera) показало возможность определения времени регистрации частиц детектором с точностью (сигма) не хуже 100 пс. Ограничение связано с быстродействием использованной в данном прототипе схемы FPGA типа EPM240.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА МОДУЛЯ БЫСТРОГО СЧИТЫВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

На основе FPGA EPM240 фирмы ALTERA и компараторов ADC MP604 системы обработки сигнала изготовлен 4-канальный прототип модуля электроники быстрого считывания с детектора на МКП (см. рис. 7). Здесь в середине находится кристалл FPGA фирмы ALTERA семейства MAX2. Ниже его расположен блок компараторов и входные разъемы подключения дифференциальных линий (использованы компоненты интерфейса SATA).

С помощью генератора наносекундных импульсов с возможностью изменять задержку между

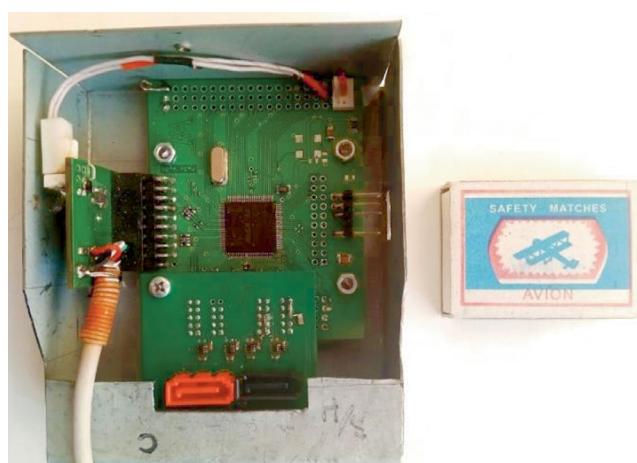


Рис. 7. Модуль 4-канальной электроники.

импульсами с шагом 100 ± 25 пс, проведено тестирование прототипа модуля быстрого считывания и обработки сигнала, т. к. параметры импульсов с генератора аналогичны сигналам с МКП. Осциллограмма выхода генератора представлена на рис. 8. Рядом представлен сигнал с МКП. Видно, что сигналы практически эквивалентны.

На рис. 8 приведено сравнение сигналов от детектора на МКП (а) и от генератора наносекундных импульсов (б) с разверткой 1 нс/дел. Четыре выходных канала генератора позволяют изменять задержку между каналами с шагом 100 пс.

Для управления модулем и сбора данных с него написана программа на языке LabVIEW7.1, обеспечивающая возможности установки порогов каждого канала регистрации, времени экспозиции и числа шагов измерения, графический вывод получаемых данных, формирование файла результатов измерения и сохранение на диск.

Лицевая панель — внешний интерфейс виртуального прибора, содержащий средства ввода-вывода,

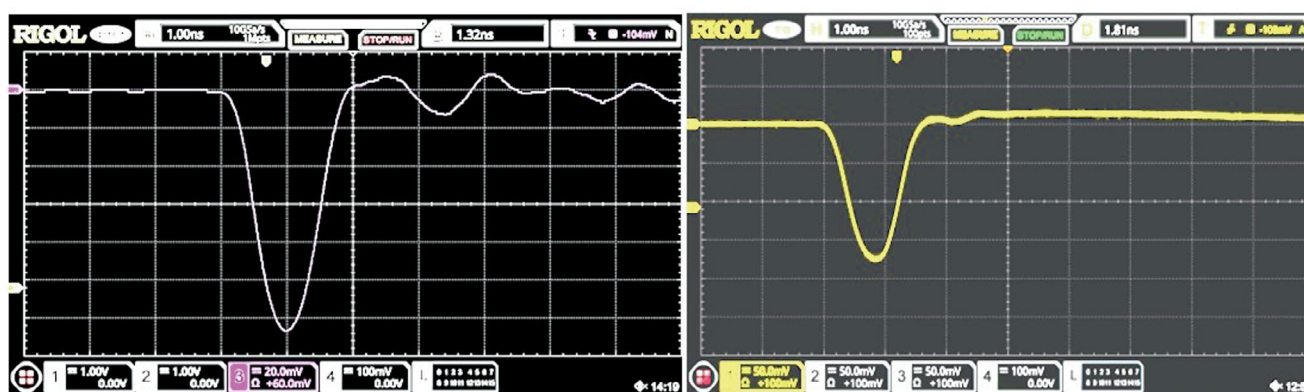


Рис. 8. Осциллограммы сигналов от детектора на МКП, 20 мВ/дел. (а), и генератора наносекундных импульсов, 50 мВ/дел. (б).

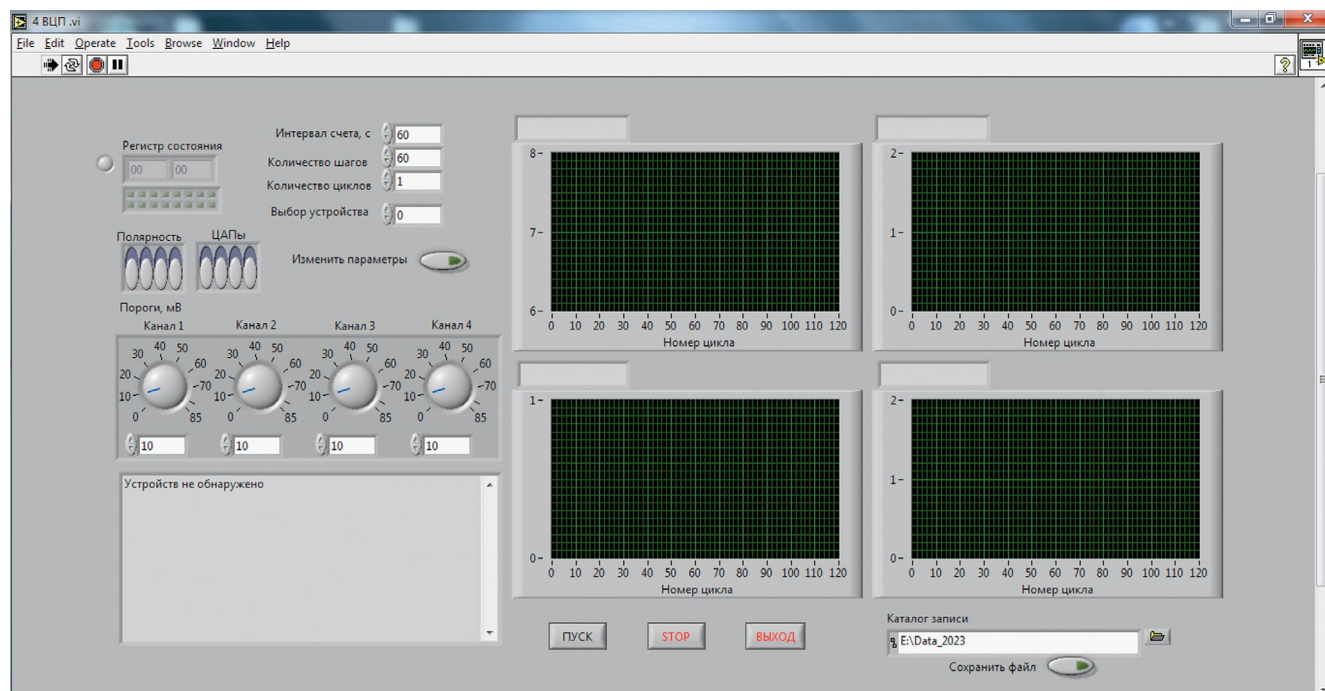


Рис. 9. Лицевая панель программы для управления вводом-выводом.

используемые для управления виртуальным прибором, изображена на рис. 9.

На рис. 10 представлен результат проверки системы быстрого считывания для одного канала в режиме старт-стоп. Изменение кода на выходе ВЦП в зависимости от изменения задержки между каналами стартового и стопового импульсами. Шаг по оси x равен 100 пс, шаг по оси y представляет выходные коды преобразователя ВЦП.

Из графика рис. 10 видно, что максимальное отклонение от линейной зависимости составляет ± 100 пс.

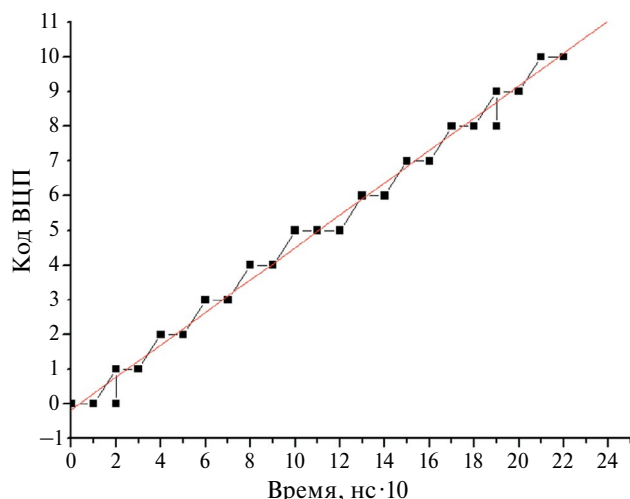


Рис. 10. Зависимость кода ВЦП одного из каналов прототипа от вводимой задержки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное моделирование работоспособности системы быстрого считывания для монитора столкновений пучков с использованием САПР Quartus показало возможность определения времени регистрации с точностью не хуже 100 пс.

Разработан и создан прототип многоканального модуля быстрой электроники временной привязки к сигналам с МКП детекторов с использованием дискретных компараторов и многоканального преобразователя время—код на основе FPGA EPM240. Написана программа, обеспечивающая возможность работы с модулем. Полученные с использованием генератора данные подтверждают результаты моделирования. Погрешность времени регистрации разработанной системы не хуже 100 пс. Для 32-канальной системы регистрации координаты и времени по сигналам с детекторов на МКП, построенной на основе разработанной схемы, расчетное время обработки с учетом всех задержек не превысит 20 нс.

Исследование выполнено в рамках проекта Санкт-Петербургского государственного университета ID94031112.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников В.И., Зинченко А.И., Васендина В.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 4. С. 575; Kolesnikov V.I., Zinchenko A.I., Vasendina V.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 451.

2. Жеребчевский В.И., Мальцев Н.А., Нестеров Д.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 8. С. 1146; Zhrebchevsky V.I., Maltsev N.A., Nesterov D.G. et al. // Bull. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 8. P. 948.
3. Baldin A.A et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2020. V. 958. Art. No. 162154.
4. Сандул В.С., Феофилов Г.А., Валиев Ф.Ф. // ЭЧАЯ. 2023. Т. 54. № 4. С. 848.
5. Галактионов К., Руднев В., Валиев Ф. // ЭЧАЯ. 2023. Т. 54. № 3. С. 560.
6. Беспалько В.А. // ПТЭ. 2009. № 2. С. 57.
7. Будагов Ю.А., Семан М., Ситар Б. и др. Преобразователь время-код с наносекундным разрешением. Препринт ОИЯИ 13—84—395. Дубна, 1984.
8. Абрамов Г.Н. Рециркуляционно-нониусный время-цифровой преобразователь. Патент РФ № 2730125 С1. 2020.
9. Гурин Е.И., Коннов Н.Н., Механов В.Б., Попов К.В. // ПТЭ. 1997. № 3. С. 102.
10. Букин М.А., Титов В.М. Время-цифровой преобразователь с наносекундным разрешением на основе ПЛИС Altera. Новосибирск: Ин-т ядерн. физики имени Г.И. Будкера СО РАН, 2001.
11. Sanoa Y., Horiia Y., Ikenob M. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2017. V. 874. P. 50.
12. Liu C., Wang Y. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2015. V. 62. No 3.
13. <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/software/programmable/quartus-prime/overview.html>

Hardware implementation and testing of 4-channel fast electronics for a MCP detector

F. F. Valiev¹, N. I. Kalinichenko¹, N. A. Makarov^{1,*}, G. A. Feofilov¹

¹ Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia

*e-mail: n.a.makarov@mail.spbu.ru

Using the Quartus software environment, simulation of time measurements for a fast collision monitor of particle beams based on chevron MCP assemblies was carried out. The measurement algorithm is based on the delayed coincidence method. 4-channel electronics for a detector on microchannel plates (MCP) based on high-speed comparators and FPGA EPM240 from ALTERA have been created. The test prototype was tested using a 4-channel nanosecond pulse generator, with an adjustable delay between channels. When using these comparators and FPGAs, it is possible to determine the time of registration of particles by a detector with an error of 100 ps, while the calculated speed of the reading circuit coincides with the measured one and is no more than 10 ns for each event for a 4-channel system.

Keywords: NICA, FPGA, fast beam-beam collisions monitor, microchannel plate