

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА В ИМПУЛЬСНОМ ТРАНСПОРТНОМ КАНАЛЕ ВЭПП-3 – ВЭПП-4М

*Е. А. Бехтенов, А. Н. Журавлев, С. Е. Карнаев, Г. В. Карпов,
В. А. Киселев, О. И. Мешков, П. А. Пиминов, А. Н. Селиванов,
М. А. Скамароха, М. Г. Федотов*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В статье обсуждается проведенная модернизация системы диагностики пучка импульсного канала транспортировки заряженных частиц от накопителя ВЭПП-3 до коллайдера ВЭПП-4М. Система измерения положения траектории пучка, использовавшаяся до модернизации, не удовлетворяла требованиям точности измерений и помехозащищенности. В ходе модернизации на канале установлены новые датчики полоскового типа с геодезическими знаками, новая контрольно-измерительная электроника с интерфейсом Ethernet и новая система синхронизации. Программное обеспечение разработано на базе EPICS. Полученная точность измерения координат траектории пучка — лучше 100 мкм, интенсивности пучка — лучше 5%. Также модернизирована система для наблюдения поперечных размеров пучка, использующая люминофорные датчики. Аналоговые камеры были заменены цифровыми на базе матричных ПЗС. Для обработки данных, считываемых с ПЗС, разработана и установлена новая электроника, а также внедрена новая система управления механическими приводами люминофорных датчиков, подсветкой люминофорных экранов и синхронизацией запуска измерений с перепуском пучка. Новая система позволяет записывать, анализировать и отображать на дисплее компьютера поперечные положение и профиль пучка, чего не позволяла предыдущая система. Для контроля стабильности работы элементов выпуска и впуска пучка (кикеров) разработана программная система, использующая для оцифровки сигналов четырехканальный осциллограф.

We discuss modernization of the diagnostic system for a beam transfer line from VEPP-3 storage ring to VEPP-4M collider. During the modernization, new beam position monitors and electronics with Ethernet interface were installed. The software is based on EPICS. Accuracy of the beam centroid coordinates measurements is less than 100 μm while the beam intensity measurement precision is better than 5%. Also the beam profile identification system based on phosphor sensors was modernized. Old video-cameras were replaced by modern digital cameras based on CCD-matrix. The new system allows recording, analyzing and computer visualization of the beam profile at different points along the transfer line. To control stability of the beam deflector and inflectors, software was developed that uses a four-channel oscilloscope to digitize signals.

PACS: 29.27.Fh; 41.75.Ht; 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

В качестве бустера для электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М используется накопитель ВЭПП-3, в котором одновременно до энергии от 1–1,9 ГэВ ускоряются либо два сгустка электронов, либо два сгустка позитронов [1]. Для перепуска пучков из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М используется импульсный транспортный канал, схема которого приведена на рис. 1.

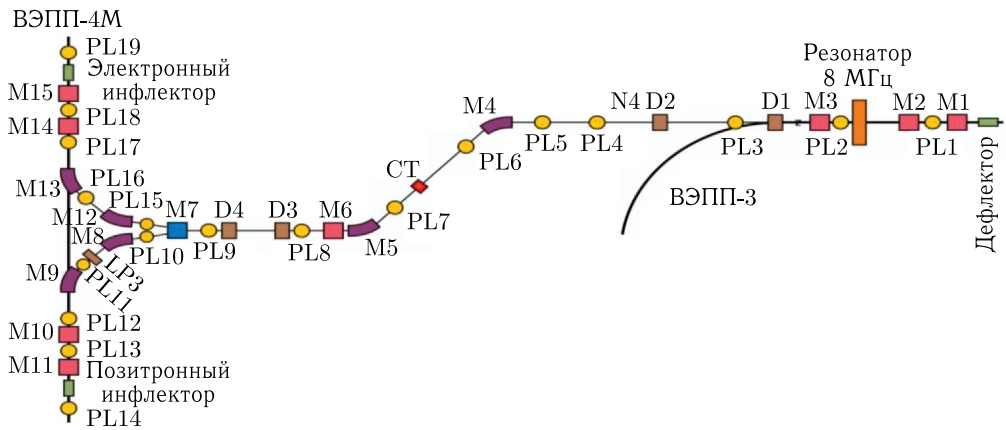


Рис. 1. Схема канала транспортировки частиц ВЭПП-3 – ВЭПП-4М: М — поворотные магниты; D — элементы магнитной оптики; PL — люминофорные датчики положения пучка; CT — пролетный датчик пучка

Транспортный канал состоит из нескольких участков: участка выпуска из ВЭПП-3, прямолинейной части, участка параллельного переноса, прямолинейного промежутка, проходящего через радиационную защиту коллайдера, и участка впуска в ВЭПП-4М с одновременным подъемом и 90° -м поворотом пучка, при этом электроны и позитроны разводятся в противоположных направлениях. Общая длина канала около 60 м. Поскольку кольца ВЭПП-3 и ВЭПП-4М расположены в разных плоскостях с разницей высот ~ 4 м, то геометрия канала является трехмерной. Места впуска электронов и позитронов в ВЭПП-4М расположены в прямолинейном промежутке коллайдера примерно на половине оборота от места встречи. 90° -й поворот транспортного канала в финальной части для электронов и позитронов разделяется на две отдельные транспортные линии. В коллайдере ВЭПП-4М могут циркулировать по два сгустка электронов и позитронов. Частицы разной полярности движутся навстречу друг другу по одной и той же траектории. В местах встречи, в том числе в промежутке впуска, пучки по вертикали разводятся электростатическим полем с помощью пластин, расположенных вдоль траектории частиц. Геометрия и оптика транспортного канала достаточно сложны, поэтому для коррекции траектории и огибающей пучка частиц требуется чувствительная и точная система диагностики.

Питание магнитных элементов транспортного канала импульсное, что приводит к появлению сильных электромагнитных помех. Основным источником помех в канале являются быстрые кикеры — инфлектор и дефлектор, на которые при перепуске пучка подаются импульсы напряжения гауссовой формы длительностью 60–80 нс (по уровню 0,5) и амплитудой до 25 кВ.

Цикл работы накопителя ВЭПП-3 состоит из накопления частиц, их ускорения и перепуска в ВЭПП-4М, что занимает около 15 мин. Во избежание потерь времени крайне важно иметь КПД перепуска не ниже 90%, вследствие чего на надежность и стабильность работы всех систем транспортного канала, в том числе и на систему диагностики пучка, накладываются жесткие требования.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Старая система измерения положения пучка [2] транспортного канала была разработана в 1980-х гг. В ее состав входило 10 датчиков и электроника обработки сигналов. Для регистрации пучка использовался датчик на основе трансформатора. Данное решение было чувствительно к импульсным помехам, не обеспечивало требуемую точность измерений положения траектории пучка (0,1 мм) и не позволяло достоверно измерять заряд пучка.

Новая система измерения положения пучка [3, 4], разработанная и изготовленная в ИЯФ СО РАН, позволяет измерять положение траектории и заряд пучка с точностью лучше 0,02 мм и 5% соответственно в условиях высокого уровня помех. Система измерения положения пучка состоит из датчика положения пучка, пикап-станций, системы синхронизации и системы сбора данных, построенной на базе EPICS. На рис. 2 показан внешний вид нового датчика и пикап-станции.

Датчик положения пучка состоит из цилиндрического корпуса, являющегося частью вакуумной камеры, и четырех электродов, представляющих собой 50-Ом полосковые линии длиной 95 мм, короткозамкнутые на одном из концов. Другие концы линий, с которых снимается сигнал от пучка, выведены на разъемы N-типа. Два электрода расположены в горизонтальной плоскости, два — в вертикальной. К корпусу датчика присоединены сильфон и два фланца.

Использование данного решения позволило заменить старые датчики на новые без модификации остальной части вакуумной системы канала. Снаружи к корпусу датчика прикреплены два геодезических знака, расположенных в одной плоскости. Геознаки использовались для выставки датчиков на канале, а также для индивидуальной калибровки датчиков на специальном стенде.

Электроника для обработки сигналов с каждого датчика размещена в отдельном блоке (пикап-станции). Каждая пикап-станция располагается в непосредственной близости от датчика. Пикап-станция имеет четыре аналоговых входа, по одному на каждую полосковую линию датчика, вход синхронизации, порт Ethernet для связи с компьютером, питание 220 В. Функциональная схема пикап-станции показана на рис. 3. Электроника состоит из четырех идентичных аналоговых каналов, вентиляционной матрицы (FPGA) и схемы калибровки. Каждый аналоговый канал включает фильтр нижних частот (ФНЧ), направленный ответвитель, усилитель с регулируемым усилением (УРУ), полосовой фильтр (ПФ), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП).

Принцип работы системы основан на измерении амплитуд сигналов U_i с каждого из четырех электродов датчика, по соотношению которых затем вычисляются



Рис. 2. Датчик положения пучка (а) и пикап-станция (б)

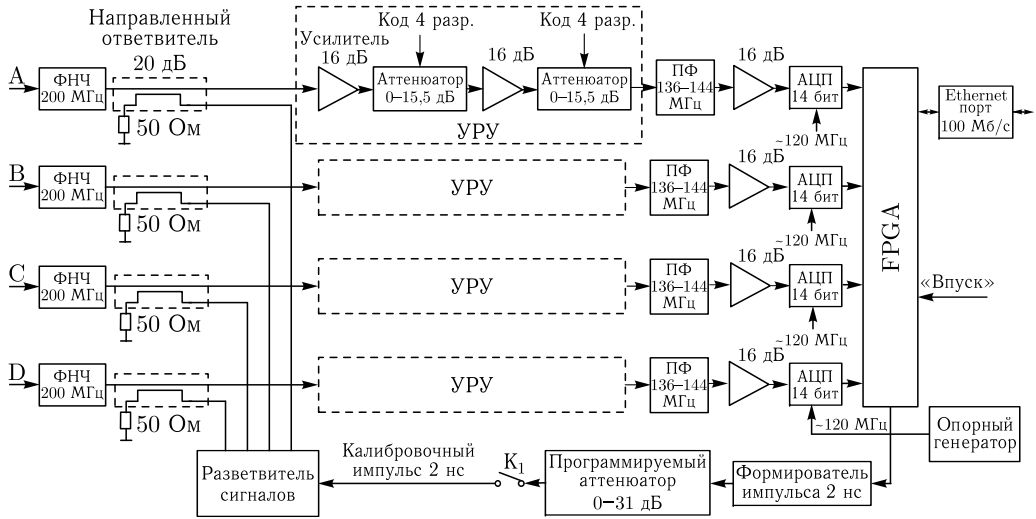


Рис. 3. Функциональная схема пикап-станции системы измерения положения пучка

поперечные координаты и заряд пучка. Разброс коэффициентов передач аналоговых каналов при разных кодах, записываемых в аттенюаторы, может достигать 1,5 дБ, что соответствует сдвигу нуля, вызванному электроникой, в 0,7 мм. Для компенсации разброса и нестабильности коэффициентов передачи аналоговых каналов использована схема калибровки, которая включает в себя формирователь калибровочного импульса длительностью ~ 2 нс, программируемый аттенюатор с диапазоном регулировки ослабления 0–31 дБ, ключ K_1 , разветвитель сигналов и четыре направленных ответвителя. Калибровочные коэффициенты вычисляются на основе четырех измеренных напряжений калибровочного сигнала. Измеренные напряжения сигналов от пучка умножаются на эти коэффициенты, и на их основе вычисляется координата положения траектории пучка. Для увеличения отношения сигнала к шуму для калибровочного сигнала измеренные значения суммируются и усредняются. Обычно для вычисления поправочных коэффициентов используется порядка нескольких десятков калибровочных сигналов. Для подавления помех также используются фильтры нижних частот (136–144 МГц).

Вычисление координат и интенсивности пучка осуществляется по следующим формулам:

$$X = G_X \frac{U_4 - U_2}{U_4 + U_2} - X_0, \quad Y = G_Y \frac{U_1 - U_3}{U_1 + U_3} - Y_0, \quad I = K(U_1 + U_2 + U_3 + U_4), \quad (1)$$

где G_X , G_Y — горизонтальный и вертикальный геометрические факторы; X_0 и Y_0 — геодезическое смещение датчика относительно оси датчика, привязанной к геодезическим знакам датчика, и смещение нуля самого датчика; K — коэффициент пропорциональности между напряжением на пластинах и током пучка.

Все пикап-станции подключены к внутренней сети Ethernet системы управления комплекса ВЭПП-4. Для обработки данных и управления процессом измерений и калибровки разработано программное обеспечение на базе программной платфор-

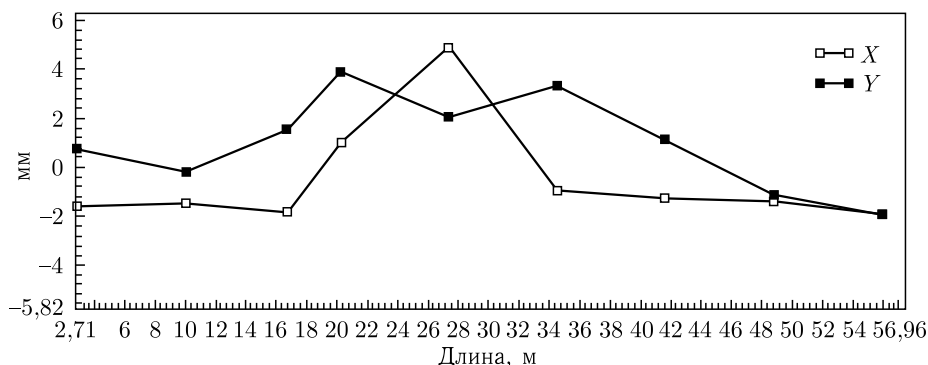


Рис. 4. Траектория пучка электронов в канале транспортировки

мы EPICS [5]. На рис. 4 показана измеренная траектория пучка электронов вдоль транспортного канала.

В процессе настройки оптики канала также используется работающая в пооборотном режиме система измерения положения пучка коллайдера ВЭПП-4М, включающая 54 датчика, распределенных по периметру кольца. Система позволяет наблюдать амплитуды и частоты колебаний пучка, раскогеренивание колебаний, искажение замкнутой орбиты, потери интенсивности пучка и т. д. Запуск пооборотных измерений положения пучка в накопителе и запуск измерений в транспортном канале осуществляются от одного импульса, синхронизированного с фазой частоты обращения пучка в коллайдере.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЛЮМИНОФОРНЫХ ДАТЧИКОВ

Для наблюдения за поперечным профилем пучка частиц в канале ВЭПП-3 – ВЭПП-4М используется система люминофорных датчиков (PL, см. рис. 1), которые вводятся в апертуру вакуумной камеры с помощью электропривода. Свечение люминофора, возникающее после пролета пучка частиц, регистрируется с помощью ПЗС-матрицы. Таким образом удастся наблюдать поперечный профиль пучка. Данная система используется для настройки оптики транспортного канала и положения траектории частиц.

Летом 2019 г. была проведена модернизация системы люминофорных датчиков, которая состояла в замене аналоговых видеокамер на разработанные в ИЯФ цифровые устройства, содержащие цифровые телевизионные камеры [6] на основе матричных приборов с зарядовой связью (ПЗС) и электронику управления электроприводами люминофорных пробников. Новая система оптической диагностики состоит из 18 комплектов люминофорных датчиков, одного источника питания подсветкой люминофорных экранов и системы синхронизации.

Люминофорный датчик состоит из люминофорного экрана, размещенного на пробнике,двигаемом внутрь вакуумной камеры, фотообъектива, блока электроники с матричным ПЗС Sony ICX424AL, блока электроники для управления электроприводом пробника и подсветкой люминофорного экрана (рис. 5). Пробник с люмино-

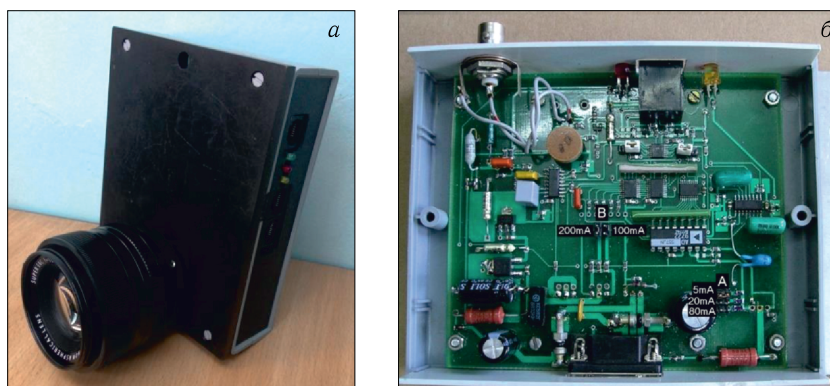


Рис. 5. Электроника люминофорного датчика: а) блок электроники с ПЗС-камерой и объективом; б) блок электроники управления электроприводом и подсветкой

Параметры цифровой камеры с матричным ПЗС Sony ICX424AL

Параметр	Значение
Размеры, мм	125 × 92 × 35
Размер поля изображения, мм	Диагональ 6
Эффективное число пикселей	659 × 494
Общее число пикселей	692 × 504
Размеры светочувствительной области ПЗС, мм	5,84 × 4,94
Размеры одного пикселя, мкм	7,4 × 7,4
Время накопления изображения, с	10 ⁻⁴ –30
Выходной сигнал	Цифровой, 16 бит
Интерфейс, мб	Ethernet 100
Время считывания кадра, мс	80
Синхронизация	Внешняя и внутренняя
Питание, В	+8, +20, -12

форным экраном вводится внутрь вакуумной камеры с помощью электропривода и во введенном состоянии располагается под углом 45° на пути движения пучка. Свечение люминофора выводится из вакуумной камеры через оптическое окно. С помощью объектива изображение фокусируется на матричном ПЗС, параметры которого приведены в таблице.

Контроль качества фокусировки оптической системы осуществляется с помощью регистрации изображения координатной шкалы, нанесенной на поверхность люминесцентного экрана и снабженной дистанционно регулируемой светодиодной подсветкой.

Старт начала измерений осуществляется с приходом сигнала синхронизации, сформированного в момент перепуска пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М. С помощью изменения времени интегрирования в ПЗС можно подобрать оптимальный уровень сигнала от вспышки света с люминофорного экрана. Характерная длительность вспышки составляет несколько миллисекунд.

Через интерфейс Ethernet данные, регистрируемые ПЗС-камерами, поступают в управляющий компьютер, где обрабатываются специальным программным приложением, управление работой которого осуществляется из пультовой комплекса ВЭПП-4. Приложение разработано с использованием библиотеки CERN ROOT [7]. На рис. 6 показано двумерное изображение поперечного профиля пучка на одном из люминофорных датчиков. Для координатной привязки используется координатная сетка с шагом 2 мм, нанесенная непосредственно на люминофор. Приложение, используя метод наименьших квадратов, определяет параметры пучка (положение, размеры, разворот осей).

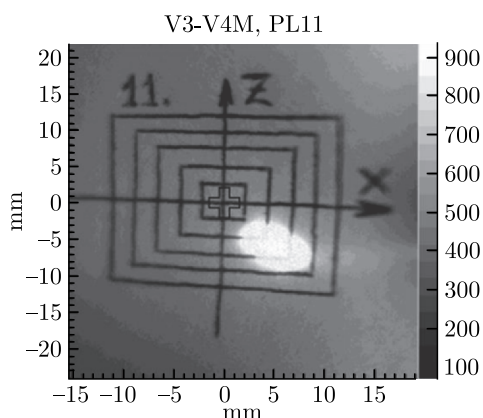


Рис. 6. Изображение профиля пучка в канале ВЭПП-3 – ВЭПП-4, полученное с помощью люминофорного датчика

МОНИТОРИНГ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ КИКЕРОВ

Для выпуска пучка из накопителя ВЭПП-3 и его впуска в кольцо коллайдера ВЭПП-4М используются импульсные устройства (кикеры), однократно задающие пролетающему через них пучку угол траектории: одно устройство (дефлектор) направляет накопленный и ускоренный пучок с орбиты ВЭПП-3 в канал транспортировки, а два других (инфлекторы для электронов и позитронов, см. рис. 1) переводят пучки с траектории движения по каналу на траекторию движения по замкнутой орбите в кольце ВЭПП-4М.

Кикер представляет собой пару горизонтальных пластин, расположенных параллельно сверху и снизу вдоль траектории пучка [8]. На пластины с высоковольтного генератора через тиратронный ключ подается импульс напряжения колоколообразной формы длительностью около 100 нс. Горизонтальное магнитное поле между пластинами, создаваемое протекающим по пластинам током, отклоняет пролетающий пучок в вертикальном направлении. Для обеспечения повторяемости и стабильности перепуска требуется точная и стабильная подача импульса синхронно с пролетом пучка на все четыре одновременно задействованные пластины: две пластины дефлектора и две пластины соответствующего инфлектора. Сигналы напряжения с согласующих нагрузок пластин приводятся на входы многоканального осциллографа, расположенного в главной пультовой комплекса ВЭПП-4. В этот же момент на осциллограф приходит сигнал с пролетного датчика пучка, который расположен примерно в центре канала транспортировки (см. рис. 1). Длины всех кабелей подобраны таким образом, что в случае правильной работы системы сигналы с пластин и с датчика пучка должны прийти на входы осциллографа в один и тот же момент.

Для прецизионных измерений времени срабатывания дефлектора и инфлекторов разработана система автоматического измерения, использующая четырехканальный цифровой осциллограф Tektronix DPO4030. Осциллограф запускается от внешнего импульса и выполняет регистрацию поступающих на него сигналов (рис. 7).

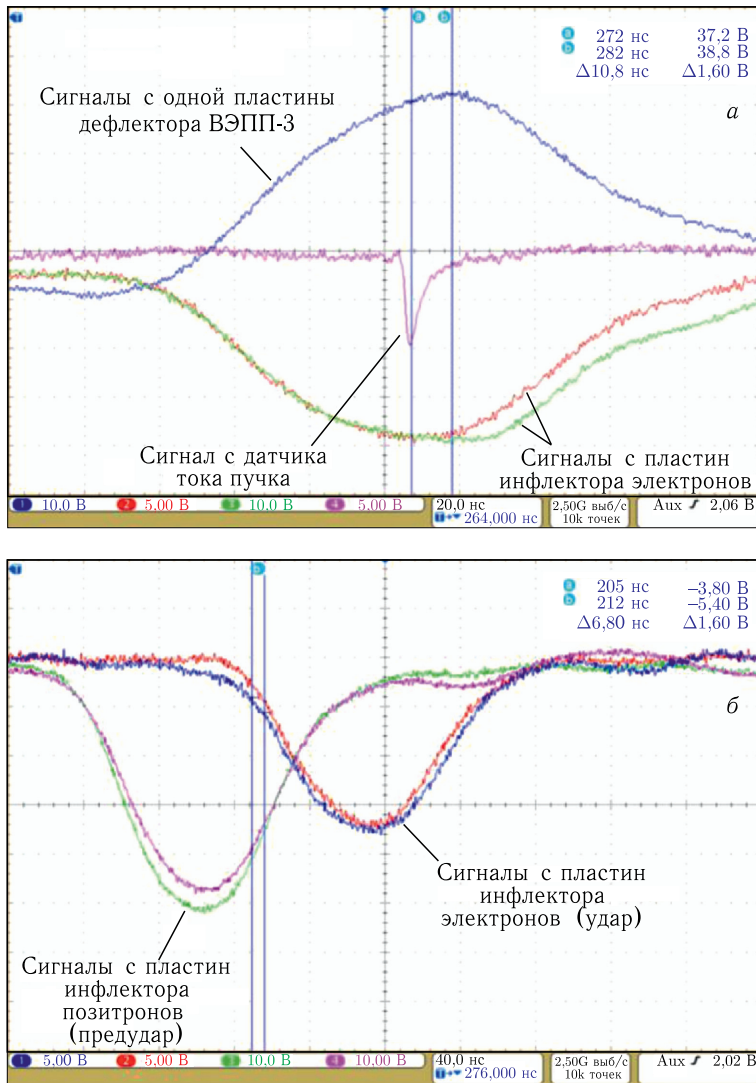


Рис. 7. Осциллограммы импульсов дефлектора, инфлектора и датчика пучка (а), электронного инфлектора и позитронного инфлектора в режиме предудара (б)

Специально разработанная программа scoreview считывает с осциллографа массивы данных и выполняет их численную обработку, результатом которой являются положения (времена) и величины максимумов сигналов с пластин, а также время момента пролета по каналу пучка заряженных частиц. Для определения максимума (по модулю) сигнала применяется процедура интерполяции со сглаживанием, что позволяет избавиться от разного рода наводок и пульсаций. Результаты измерений отображаются на графике и заносятся в базу данных для последующего анализа. Примеры экранов, выводимых программой, представлены на рис. 8.

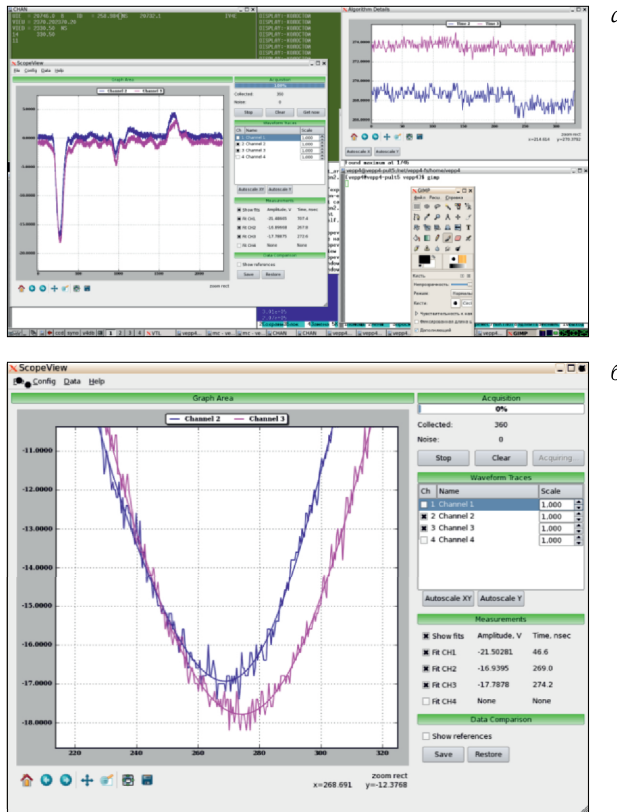


Рис. 8. Примеры экранов программы scoreview: а) главный экран программы с меню настроек и изображением сигналов (слева) и диаграмма стабильности работы пластин инфлектора электронов (справа); б) главный экран программы, детализация сигналов с интерполяцией, использующейся для определения положения сигнала

Достигнутая точность измерения положения максимумов сигналов с фронтами длительностью порядка 40 нс составляет 0,1 нс. На разработанную систему измерений получено Свидетельство о государственной регистрации [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая система диагностики пучка в канале транспортировки частиц ВЭПП-3–ВЭПП-4М существенно превосходит прежний вариант с точки зрения помехоустойчивости и точности измерений, что позволяет настраивать и контролировать прохождение частиц по каналу с высокой надежностью и стабильно обеспечивать высокий коэффициент перепуска пучков из накопителя ВЭПП-3 в коллайдер ВЭПП-4М.

Аппаратура для измерения положения траектории пучка способна работать в условиях больших импульсных и высокочастотных помех, что позволяет использовать ее в любых системах транспортировки пучков на существующих и перспективных уско-

рительных комплексах. Программное обеспечение на базе EPICS позволяет легко интегрировать эту систему в различные программные комплексы, обеспечивающие отображение и архивирование информации, автоматическую подстройку траектории движения пучков.

Новая система люминофорных датчиков также может быть легко интегрирована в современные системы управления ускорительными комплексами. Использование интерфейса Ethernet позволяет считывать данные из аппаратуры с высокой скоростью, что актуально для установок, работающих с высокой частотой перепуска частиц, а также для интеграции данной системы в различные системы автоподстройки.

Программная система мониторинга стабильности работы кикеров позволяет с нужной точностью диагностировать неисправности устройств системы впуска/выпуска пучка, синхронно работающих с наносекундными точностями, что крайне важно для анализа измерений, полученных с аппаратуры диагностики пучка. Разработанная система применима для контроля стабильности срабатывания импульсных систем с длительностью рабочего импульса от единиц наносекунд и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levichev E. B.* Status and Upgrade of the VEPP-4 Storage-Ring Facility // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2016. V. 13, No. 7. P. 876–883.
2. *Cherepanov V. P.* Image Current Monitor for Bunched Beam Parameters Measurements // *Proc. of DIPAC'1995*, Travemunde, Germany, 1995.
3. *Бехтенов Е. А., Журавлев А. Н., Карпов Г. В., Пиминов П. А.* Новая система измерения положения пучка в канале транспортировки электронов и позитронов из накопителя ВЭПП-3 в коллайдер ВЭПП-4М // *ПТЭ.* 2020. № 1. С. 18–23.
4. *Bekhtenev E. A., Karpov G. V., Piminov P. A., Zhuravlev A. N.* A New System for Measuring of the Beam Position in the Electron-Positron Transport Channel from the VEPP-3 Storage Ring to VEPP-4M Collider // *Instrum. Exp. Tech.* 2020. V. 63, Iss. 1. P. 13–18.
5. <https://epics-controls.org/>
6. *Fedotov M. G., Selivanov A. N., Pischenuk S. M.* Progressive-Scan Digital Television Camera for the Particle Beam Monitoring // *Proc. of RuPAC 2006 Intern. Conf.* <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/r06/PAPERS/MODP03.PDF>.
7. <https://root.cern.ch>
8. *Anchugov O. et al.* The Coherent Particle-Oscillation Excitation System at the VEPP-4M Collider // *Instrum. Exp. Tech.* 2019. V. 62. P. 599–608.
9. Scoreview — программа для измерения времени задержки срабатывания импульсных устройств с помощью цифрового осциллографа. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664601.