

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.316.722.9

НОВАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА
В КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ
ИЗ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3 В КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-4М

© 2020 г. Г. В. Карпов^{a,*}, Е. А. Бехтенов^{a,**},
А. Н. Журавлев^{a,***}, П. А. Пиминов^{a,****}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

*e-mail: G.V.Karpov@inp.nsk.su

**e-mail: E.A.Bekhtenev@inp.nsk.su

***e-mail: A.N.Zhuravlev@inp.nsk.su

****e-mail: P.A.Piminov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 17.06.2019 г.

После доработки 17.06.2019 г.

Принята к публикации 01.07.2019 г.

Обсуждается новая система измерения положения пучка в импульсном транспортном канале от накопителя ВЭПП-3 до коллайдера ВЭПП-4М, обеспечивающая измерение положения и интенсивности пучка электронов или позитронов за один пролет. Для надежной работы экспериментального комплекса необходимо непрерывно контролировать траекторию движения пучка неразрушающим образом, а также измерять возможные потери заряда пучка. В 2018 г. были разработаны, изготовлены и установлены в канале транспортировки новые датчики и новая электроника системы измерения положения пучка, обеспечивающая значительно большую точность по сравнению со старой системой. В новой системе удалось практически полностью избавиться от помех и достичь точности измерений лучше 0.02 мм, что более чем достаточно для оптимальной настройки оптики канала и достижения высокой эффективности перепуска. Описывается конструкция датчика, структура и основные особенности построения электроники, анализируется точность измерений, приведены некоторые результаты работы новой системы в канале.

DOI: 10.31857/S0032816219060211

ВВЕДЕНИЕ

Накопитель ВЭПП-4М [1] предназначен для проведения экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках, пучках синхротронного излучения и выведенных γ -квантов в области энергий от 1 до 5 ГэВ. В качестве бустера для ВЭПП-4М используется накопитель ВЭПП-3, в котором два ступка электронов или позитронов ускоряются до энергии 1–1.9 ГэВ. Ускоренные пучки переводятся в ВЭПП-4М через канал транспортировки длиной ~60 м (рис. 1).

Оптика транспортного канала является достаточно сложной, в том числе из-за трехмерной геометрии канала – накопителя ВЭПП-3 и ВЭПП-4М расположены в разных плоскостях с перепадом высот ~4 м. Так как в ВЭПП-4М электроны и позитроны движутся по одной магнитной дорожке навстречу друг другу, финальная часть транспортного канала разделяется на две ветки – электронную и позитронную, каждая из которых осуществляет поворот на 90° в горизонтальной

плоскости и 14° в вертикальной. Из-за разной геометрии траекторий для электронов и позитронов оптика транспортного канала также различна для каждого типа частиц.

Питание магнитных элементов транспортного канала – импульсное, что является причиной появления сильных помех. Цикл работы накопителя ВЭПП-3, включающий в себя накопление частиц, их ускорение и перепуск, составляет ~15 мин. В связи с этим крайне важно иметь к.п.д. перепуска не ниже 90%, вследствие чего к надежности работы всех систем транспортного канала предъявляются жесткие требования.

Одной из ключевых систем является система измерения положения пучка, позволяющая измерять траекторию пучка вдоль канала, а также возможные потери интенсивности пучка. Требуемая точность измерения координат ~0.1 мм, заряда пучка ~5% в диапазоне 2–40 нКл. Система используется и как инструмент при настройке оптики транспортного канала, и при регулярной рабо-

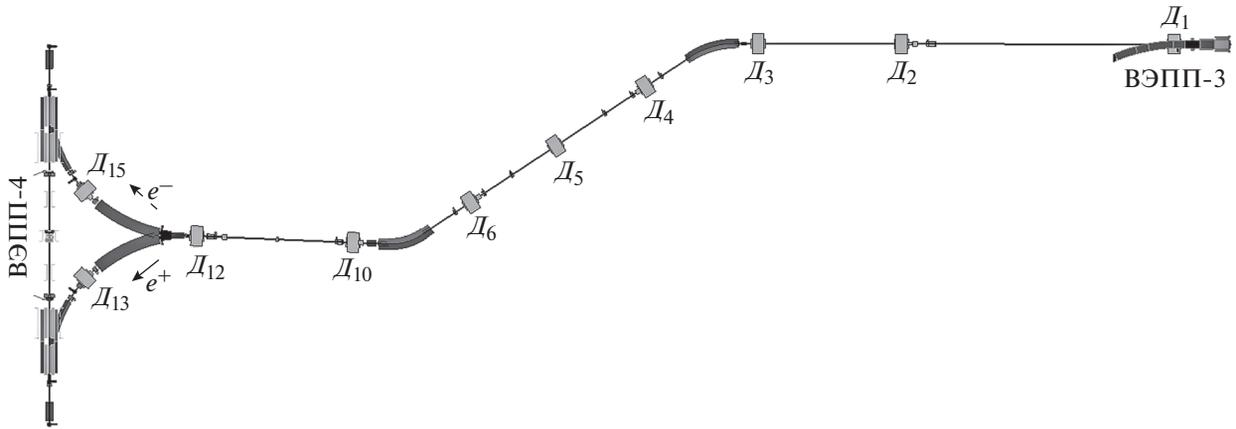


Рис. 1. Положение датчиков в канале транспортировки.

те в качестве контроля стабильности работы всех систем.

В процессе настройки оптики канала участвует также система измерения положения пучка накопителя ВЭПП-4М [2], включающая в себя 54 датчика и работающая в пооборотном режиме. Она позволяет наблюдать амплитуды и частоты колебаний пучка, раскогеренирование 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 синхронизации.

Старая система измерения положения пучка [3] в транспортном канале не позволяла обеспечить требуемую точность измерений, главным образом, из-за высокого уровня помех, наводимых на датчики и электронику. 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. Новая система, разработанная в ИЯФ им. Г.И. Будкера, позволяет измерять положение пучка с точностью лучше 0.02 мм, что с достаточным запасом удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям.

Таких результатов удалось достичь благодаря нескольким ключевым решениям, заложенным в новой системе. Во-первых, вместо старых датчиков тока изображения [3] были использованы плосковые датчики, более устойчивые к помехам. Во-вторых, в новой электронике для измерения выделена часть спектра сигнала в полосе частот 136–144 МГц, где помехи очень слабы. В старой системе использовалась низкочастотная часть спектра, 0.1–20 МГц, где уровень помех максимален. В-третьих, для компенсации неодинаковости и нестабильности коэффициентов передачи каналов обработки сигналов с датчика использована специальная схема калибровки.

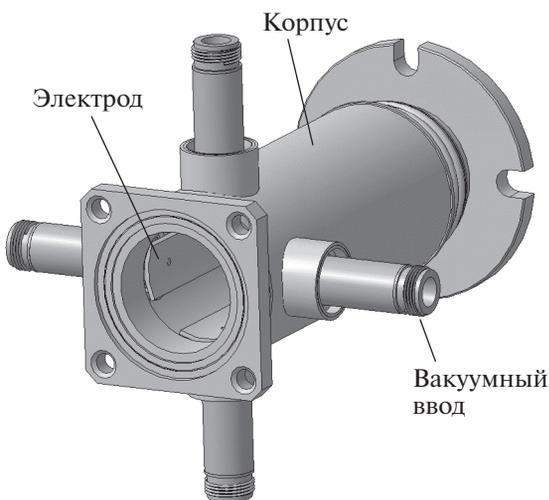


Рис. 2. Датчик положения пучка полоскового типа.

ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Датчик положения пучка состоит из цилиндрического корпуса, являющегося частью вакуумной камеры, и четырех электродов, представляющих собой короткозамкнутые на одном из концов 50-омные полосковые линии длиной 95 мм (рис. 2). Другие концы линий, на которых появляется сигнал от пучка, выведены на разъемы N-типа. Два электрода расположены в горизонтальной плоскости, два – в вертикальной.

Расчетный спектр сигнала с электрода датчика с учетом реальной длины пучка ~10 см показан на рис. 3. Там же показана та область спектра, которая используется в данной системе при обработке сигнала.

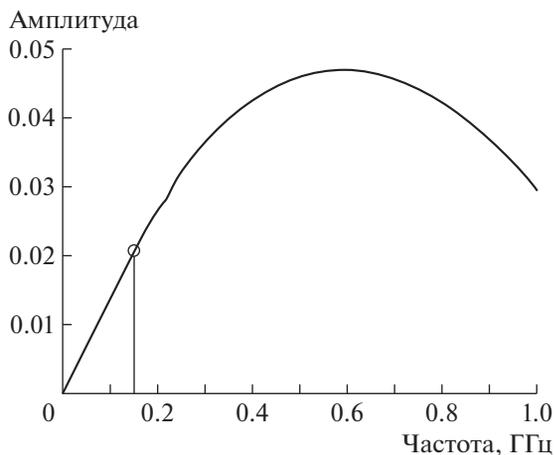


Рис. 3. Расчетный спектр сигнала с электрода пикапа при длине пучка 10 см.

Принцип работы системы основан на измерении амплитуд сигналов U_i с четырех электродов датчика, по соотношению которых затем вычисляются поперечные координаты пучка в соответствии со следующими формулами:

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

Здесь G_X , G_Y – горизонтальный и вертикальный геометрические факторы, составляющие для всех датчиков около 10 мм. Постоянные X_0 и Y_0 описы-

вают геодезическое смещение датчика относительно расчетной траектории пучка и смещение нуля самого датчика.

Помимо поперечных координат пучка, по сумме сигналов с электродов датчика можно с точностью 3–5% измерить заряд пучка.

Всего в канале транспортировки из ВЭПП-3 в ВЭПП-4 установлено 10 полосковых датчиков. Положение датчиков в канале показано на рис. 1.

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

На рис. 4 представлена функциональная схема электроники. Она состоит из четырех идентичных аналоговых каналов, вентиляльной матрицы FPGA, схемы калибровки и Ethernet интерфейса. Каждый аналоговый канал включает в себя усилитель с регулируемым коэффициентом усиления УРУ, полосовой фильтр ПФ и аналого-цифровой преобразователь АЦП.

УРУ обеспечивает регулировку коэффициента передачи аналогового канала в диапазоне 0–28 дБ, что позволяет при разных зарядах перепускаемого пучка в диапазоне 2–40 нКл обеспечить “комфортную” амплитуду сигнала на входе АЦП, составляющую от 30 до 70% его максимальной шкалы (± 1 В). УРУ состоит из цепочки усилительных блоков типа ADL5535 фирмы Analog Devices и регулируемых аттенуаторов типа PE4305 фирмы Peregrine Semiconductor.

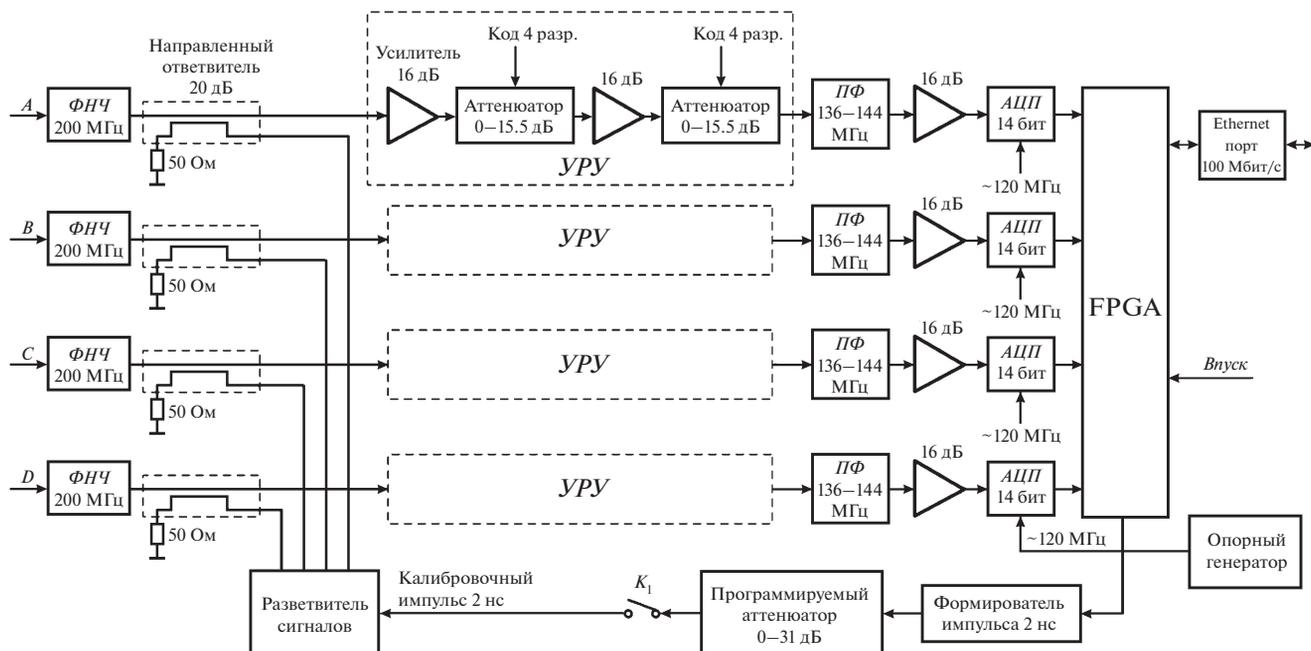


Рис. 4. Функциональная схема электроники системы измерения положения пучка. УРУ – усилитель с регулируемым усилением; ФНЧ – фильтр нижних частот; ПФ – полосовой фильтр; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; FPGA – вентиляционная матрица.

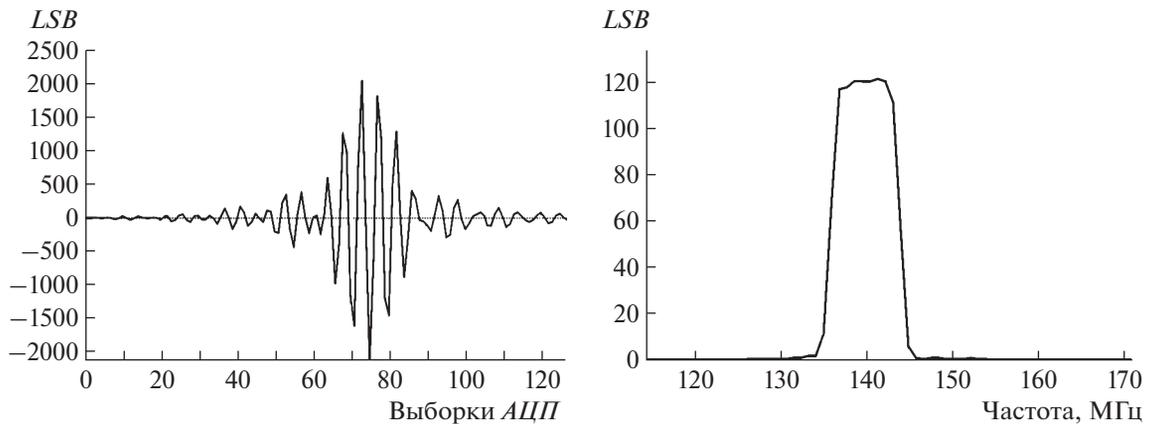


Рис. 5. Сигнал от пучка (слева) и его спектр (справа) на выходе полосового фильтра.

Усилительные блоки ADL5535 имеют фиксированное усиление ~ 16 дБ в полосе частот 20–1000 МГц, хорошие шумовые характеристики (коэффициент шума ~ 3 дБ), относительно высокую температурную стабильность коэффициента усиления ($\sim 3 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$) и хорошую линейность амплитудной характеристики ($\text{OIP3} \approx 45$ дБм, $\text{P1dB} \approx 19$ дБм). Последний параметр важен для минимизации зависимости результата измерения от заряда пучка. Атенюаторы PE4305 имеют диапазон регулировки 0–15.5 дБ с шагом 0.5 дБ и управляются 4-разрядным цифровым кодом. Коэффициент передачи всего аналогового канала задается 8-разрядным кодом усиления K_y .

Ключевым элементом аналогового канала является узкополосный полосовой фильтр на основе поверхностных акустических волн типа ТВ0320А фирмы Golledge. Полоса пропускания данного фильтра по уровню -3 дБ составляет 136–144 МГц. Такая узкая полоса фильтра позволяет растянуть сигнал по времени до ~ 180 нс, что при частоте выборок АЦП ~ 120 МГц делает практически независимым результат измерения от соотношения между моментами пролета пучка и моментами выборок АЦП. Основная мощность помех в канале лежит в диапазоне частот 0–100 МГц, вблизи частоты 140 МГц уровень помех крайне мал. В связи с этим применение данного фильтра позволяет практически полностью исключить влияние помех на точность измерений. Вид сигнала от пучка и его спектр на выходе ПФ показаны на рис. 5.

14-разрядный АЦП типа AD9246BCPZ-125 фирмы Analog Devices преобразует сигнал в цифровой вид с частотой выборок ~ 120 МГц. Далее сигнал в цифровом виде поступает в вентильную матрицу EP3C40Q240 фирмы Altera, где записывается в ее внутреннюю память. Запись в память начинается по приходу внешнего синхроимпульса *Впуск*, связанного с моментом перепуска пучка.

Окончательная обработка сигнала осуществляется в компьютере и включает в себя умножение массива сигнала на “окно” гауссовой формы и длительностью, примерно равной длительности самого сигнала, что по своему воздействию близко к “оптимальной” фильтрации [4], а также нахождение мощности сигнала.

СХЕМА КАЛИБРОВКИ

Неодинаковость коэффициентов передачи аналоговых каналов при разных кодах, записываемых в аттенюаторы, может достигать 1.5 дБ, что соответствует сдвигу нуля, вызванному электроникой, 0.7 мм. Для компенсации этого сдвига нуля в принципе можно было бы откалибровать аналоговую электронику с помощью тестовых сигналов с генератора импульсов, составив в результате таблицу поправочных коэффициентов для каждого кода усиления K_y . Проблема в том, что существует значительная температурная нестабильность коэффициентов передач аналоговых каналов, причем наибольшую нестабильность вносят полосовые фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Для компенсации неодинаковости 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 4 направленных ответвителя (см. рис. 4). На этапе калибровки импульс длительностью ~ 2 нс и амплитудой, зависящей от кода усиления, через разветвитель типа SCA-4-10 фирмы Mini-Circuits и 4 направленных ответвителя с коэффициентом направленности -20 дБ типа TCD-20-4 той же фирмы подается на вход каждого из четырех аналоговых каналов. На основе четырех измеренных

напряжений калибровочного сигнала U_{K_i} вычисляются калибровочные коэффициенты K_1, K_2, K_3, K_4 по формуле:

$$K_i = U_{KCP} / U_{K_i},$$

где $U_{KCP} = (U_{K_1} + U_{K_2} + U_{K_3} + U_{K_4}) / 4$.

На этапе измерения напряжения сигналов от пучка с датчика $U_{д_i}$ умножаются на соответствующие калибровочные коэффициенты:

$$U_i = U_{д_i} K_i.$$

Координаты пучка вычисляются на основе напряжений U_i .

Стадия калибровки начинается через ~80 мкс после запуска цикла измерения, т.е. после регистрации сигналов с электродов датчика. Учитывая, что перепуски пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4 осуществляются достаточно редко — не чаще, чем один раз в 15 мин, в промежутках между перепусками выполняются периодические внутренние (программные) запуски цикла измерения с регистрацией калибровочного сигнала. Суммируя полученные массивы калибровочного сигнала, мы тем самым значительно увеличиваем отношение сигнала к шуму для калибровочного сигнала. Обычно для вычисления поправочных коэффициентов используется порядка нескольких десятков калибровочных сигналов.

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЕЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ В КАНАЛЕ

Вся электроника системы измерения положения пучка в канале состоит из десяти блоков обработки сигналов с датчиков (“BPM Processor”) и разветвителя синхросигналов. Каждый блок обработки сигналов размещен в корпусе евромеханики высотой 1U и глубиной 280 мм и предназначен для работы с одним датчиком.

Вся электроника размещена в тоннеле канала. Каждый блок обработки сигналов расположен около своего датчика и соединен с ним через разъемы типа SMA на задней панели четырьмя короткими (длиной ~1 м) коаксиальными кабелями. Через разъем SMA на передней панели в блок поступает внешний синхроимпульс *Впуск*, связанный с моментом перепуска пучка. Через разъем RJ-45 на передней панели блок подключен к локальной сети Ethernet, через которую осуществляется его взаимодействие с одним из компьютеров системы управления накопителем.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Относительная точность измерения положения пучка характеризуется следующими основными параметрами:

Разрешение, мкм

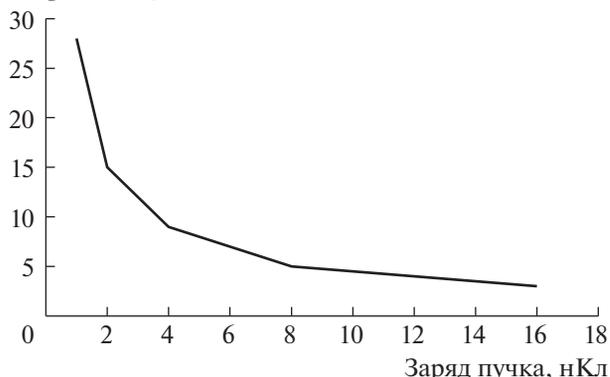


Рис. 6. Экспериментально снятая зависимость разрешения от заряда пучка.

- 1) разрешением измерений;
- 2) зависимостью результата измерения от температуры (температурной нестабильностью);
- 3) зависимостью результата измерения от заряда пучка.

Погрешность измерения координат определяется погрешностями измерения амплитуд сигналов с датчика. Допустим, амплитуда с одного из четырех электродов датчика измерена с относительной погрешностью δ_U . Тогда, учитывая формулы (1), погрешность измерения координаты $\delta_{x, y}$ будет примерно равна $0.5\delta_U G_{x, y}$.

Все приведенные выше основные параметры точности измерений были экспериментально определены. В процессе этих измерений тестовый сигнал с генератора импульсов через разветвитель одновременно подавался на 4 входа блока обработки сигналов. Амплитуда импульсов пересчитывалась через заряд пучка после калибровки блоков электроники на канале с реальным пучком.

Разрешение измерений, равное среднеквадратичному отклонению измеренной координаты от среднего значения, определяется амплитудным шумом аналогового канала и временным шумом (“джиттером”) частоты выборок, подаваемой на АЦП. Экспериментально снятая зависимость разрешения от заряда пучка приведена на рис. 6. При этом количество суммируемых калибровочных сигналов равнялось 30-ти.

Зависимость результата измерения от температуры определялась как с использованием калибровочного сигнала, так и без него. Для испытанных десяти блоков обработки сигналов коэффициент, определяющий зависимость измеренной координаты пучка от температуры, при использовании калибровочного сигнала был в пределах 0.5–1 мкм/°C, а без его использования — 2–3 мкм/°C, т.е. в среднем примерно в 3–4 раза выше.

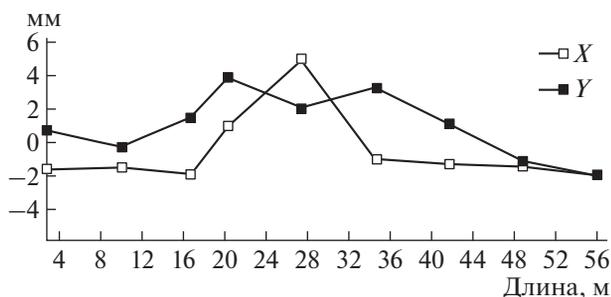


Рис. 7. Траектория пучка в канале после очередного перепуска.

Зависимость результата измерения от заряда пучка определяется нелинейностями АЦП и усилителей блока обработки сигналов. Экспериментально получено, что для диапазона заряда пучка 2–40 нКл данная погрешность не превышает 10 мкм.

Ниже приведены основные параметры, характеризующие точность измерения положения пучка в канале:

Разрешение измерений для заряда пучка:	
2 нКл	~15 мкм
15 нКл	~3 мкм
Зависимость результата измерения от заряда пучка для диапазона заряда 2–40 нКл	~10 мкм
Зависимость результата измерения от температуры	<1 мкм/°С

Можно утверждать, что при зарядах перепускаемого пучка более 5 нКл, что чаще всего имеет место, суммарная погрешность измерений положения пучка не превышает 20 мкм.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для управления новой электроникой системы измерения положения пучка в канале разработано программное обеспечение на основе EPICS [5]. В промежутках между перепусками пучка рабочая программа осуществляет непрерывные измерения калибровочного сигнала в режиме внут-

реннего запуска. Перед перепуском пучка система переключается на работу от внешнего запуска. После перепуска вычисляются поперечные координаты и заряд пучка для каждого датчика. На рис. 7 показана измеренная траектория пучка электронов вдоль транспортного канала.

Программное обеспечение полностью автономно и не требует участия оператора для своего функционирования. Координаты пучка и его заряд для каждого датчика, а также другая служебная информация доступны в виде PV (process variable) системы EPICS и могут быть использованы в программах системы управления комплекса ВЭПП-4. В частности, координаты и интенсивности пучка на каждом перепуске записываются в базу данных комплекса, где хранятся данные всех систем для последующего анализа, поиска неисправностей и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая система измерения положения пучка в канале транспортировки из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М была установлена и введена в эксплуатацию в сентябре–октябре 2018 г. Достигнутые точности измерений положения пучка (лучше 0.02 мм) и заряда пучка (3–5%) с достаточным запасом удовлетворяют предъявляемым к данной системе требованиям. За время работы данная система позволила обеспечить оптимальную настройку оптики канала и достичь эффективности перепуска пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП4М на уровне 90%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левичев Е.Б. // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13. № 7. С. 1365.
2. Бехтенов Е.А., Карпов Г.В., Пиминов П.А. // ПТЭ. 2017. № 5. С. 74. <https://doi.org/10.7868/S0032816217050044>
3. Cherepanov V.P. // Proc. of DIPAC 1995. Travemunde, Germany, 1995. P. 142.
4. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966.
5. <https://epics-controls.org/>