

Е. А. Бехтенов^{1,2}, **Г. В. Карпов**¹

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: E.A.Bekhtenev@inp.nsk.su; G.V.Karpov@inp.nsk.su

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Описан стенд для измерения параметров электростатических датчиков положения пучков заряженных частиц. Параметры датчиков снимаются с помощью подвижной антенны, моделирующей пучок заряженных частиц. Перемещение антенны осуществляется по двум координатам с помощью шаговых двигателей. Полная автоматизация измерений облегчает снятие координатных сеток датчиков с высоким пространственным разрешением. Электроника стенда позволяет измерить параметры датчика с высокой точностью. Проведенные серии измерений с датчиками положения пучка продемонстрировали повторяемость результатов на уровне 10–15 мкм, что полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к стенду. Описываемый стенд использовался для контроля качества сборки электростатических датчиков положения пучка.

Ключевые слова: датчик положения пучков заряженных частиц, накопитель заряженных частиц, координатная сетка, геометрический фактор.

Введение

Электростатические датчики положения пучка являются одним из основных средств диагностики в ускорителях и накопителях заряженных частиц. Датчики состоят из четырех электродов в виде дисков или пластин, расположенных в поперечном сечении вакуумной камеры под определенным углом к горизонтальной плоскости. На рис. 1 показан один из подобных датчиков, разработанный в Институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ) для бустерного синхротрона (Бустера) накопителя NSLS-2 (BNL, США) [1].

По сигналам, наведенным пучком на электродах датчика, находятся поперечные координаты X , Y пучка. Для идеального случая, когда все размеры датчика известны, координатная сетка, задающая связь между величиной сигналов и координатами пучка, может быть установлена расчетным путем. В реальности из-за наличия технологиче-

ских погрешностей изготовления датчиков, характеристики датчиков могут отличаться от расчетных. Это приводит к необходимости измерения их характеристик. Для данных измерений в ИЯФ был разработан и изготовлен прецизионный автоматизированный измерительный стенд.

Описание стенда для измерения характеристик датчиков положения пучка

Схема стенда для измерения характеристик датчиков положения пучка приведена на рис. 2. Стенд состоит из основания, подвижной платформы (ПП), средств перемещения по двум координатам на основе шаговых двигателей (ШД), излучающего электрода (антенны) в виде штыря и электроники стенда.

Датчик жестко прикреплен к основанию. Антенна устанавливается на подвижной платформе, которая перемещается по двум

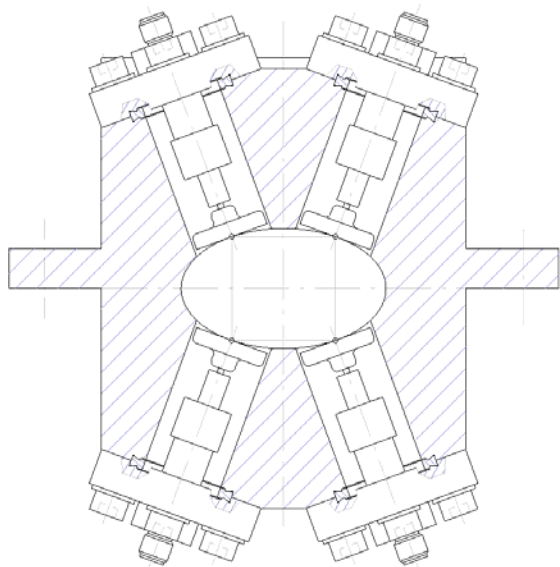


Рис. 1. Эскиз датчика положения пучка для Бустера накопителя NSLS-2

координатам с помощью шаговых двигателей. Шаговые двигатели обеспечивают шаг перемещения 50 мкм. Датчики положения (ДП), жестко закрепленные на основании, измеряют положение ПП с точностью 1 мкм. Система координат датчика положения пучка связывается с системой координат ПП с помощью преобразования вида

$$\begin{pmatrix} 1 \\ x' \\ y' \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ x0 & x1 & xy1 \\ y0 & yx1 & y1 \end{pmatrix},$$

где, T – матрица преобразования, определяется во время процедуры калибровки стенда с помощью высокоточного шаблона временно установленного на место датчика. Процедура перемещения антенны выглядит следующим образом. По команде переместить антенну в нужную точку с помощью преобразования T вычисляется количество шагов ШД. После выполнения заданного количества шагов измеряется реальное положение платформы с помощью ДП. На основе реального положения и обратной матрицы преобразования T^{-1} вычисляется положение антенны в системе координат датчика с точностью 1 мкм. Данная координата учитывается во всех дальнейших расчетах.

В качестве излучающей антенны, имитирующей пучок, используется металлический стержень диаметром 5 мм и длиной, примерно в 2 раза превышающей длину датчика. Длина антенны выбирается из соображений устранения влияния краевых эффектов. Так, для датчиков для Бустера NSLS-2 длина антенны составляет 150 мм. В качестве сигнала, имитирующего пучок заряженных частиц, используется синусоидальный сигнал частотой 3 МГц. Сигнал подается на нижний конец антенны. Строго говоря, правильно имитировать пучок бегущей TEM волной, для чего верхний конец антенны должен соединяться с корпусом датчика через активное сопротивление, равное волновому сопротивлению линии, образованной антенной и внутренней поверхностью датчика. Но сделать так для движущейся антенны технически не возможно. Поэтому в большинстве подобных стендов, в частности на стенде, описанном в [2], один из концов антенны оставляют открытым, т. е. используют не бегущую, а стоячую волну. Это вполне допустимо, учитывая, что сигналы на электродах датчика наводятся электрической компонентой волны. Фотография стенда с установленным на нем датчиком приведена на рис. 3.

Функциональная схема электроники стенда представлена на рис. 4. Электроника состоит из предусилителя, располагающегося рядом с датчиком, блока обработки сигналов, формирователя опорных частот и VME контроллера. Задачей электроники является измерение с высокой точностью (порядка 10^{-4}) величин сигналов с четырех электродов датчика частотой 3 МГц, наведенных на них антенной. Амплитуда сигналов на электродах датчика составляет для большинства типов датчиков 0,3–1 мВ (при подаче на антенну ~ 1 В). Аналоговая обработка сигналов включает их усиление и перенос на промежуточную частоту 23 кГц путем смешивания с частотой 3,023 МГц, приходящей из формирователя опорных частот. Затем сигнал промежуточной частоты преобразуется в цифровой вид с помощью 14-разрядного АЦП. Далее цифровые сигналы поступают в FPGA EP3C40 фирмы ALTERA, где осуществляется их синхронное детектирование и накопление в течение времени около 0,5 с. Результатом являются средние значения напряжений сигналов 3 МГц с четырех электродов датчика. Дан-

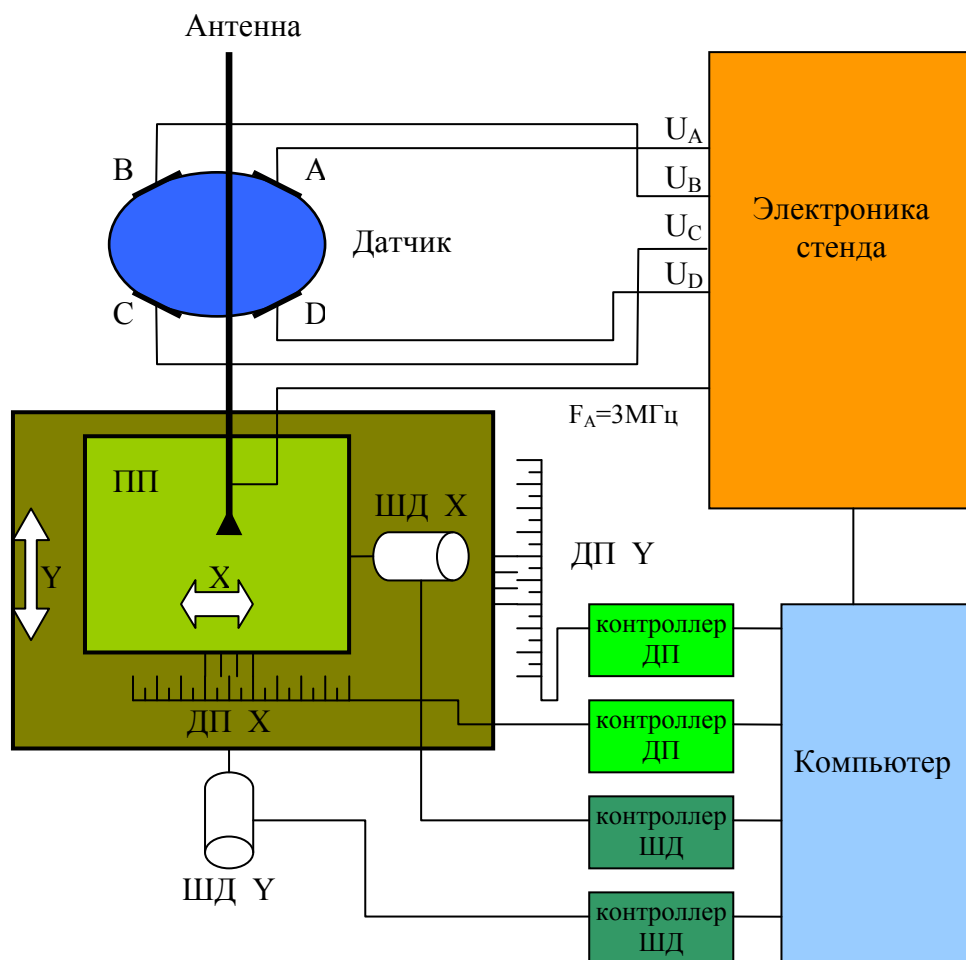


Рис. 2. Схема измерительного стенда

ный метод обработки сигналов имеет очень малые шумы (порядка нескольких единиц на 10^{-5}), но обладает одним недостатком – нестабильностью (главным образом, температурной) коэффициентов передач каналов, что приводит к погрешности измерения координат антенны. Для преодоления этого недостатка на входе электроники, сразу за буферными усилителями, размещена так называемая «матрица ключей», широко применяемая в электронике для датчиков положения пучка, выпускаемая известной фирмой «Instrumentation Technologies» [3]. Данная матрица ключей позволяет подключать любой электрод датчика к любому каналу электроники. Полный цикл измерения включает в себя 4 элементарных цикла, для каждого из них существует своя комбинация соответствия электродов датчика с но-

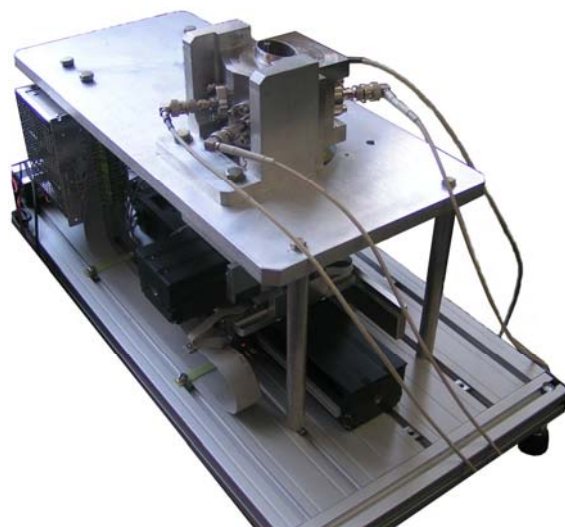


Рис. 3. Стенд с установленным датчиком положения пучка

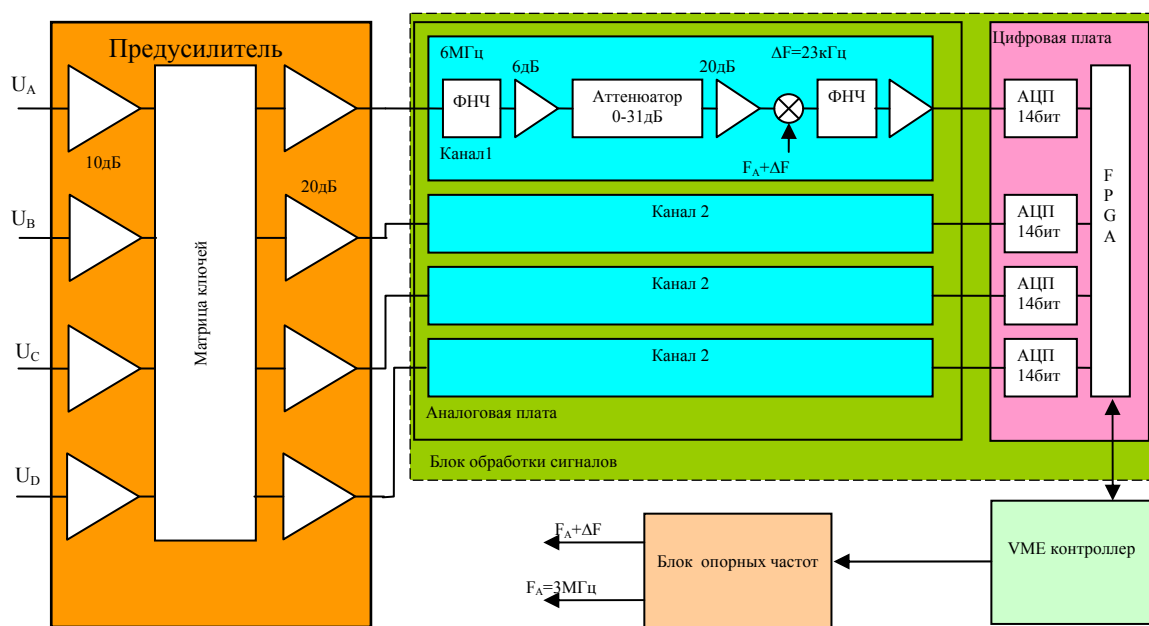


Рис. 4. Электроника стенда

мерами каналов обработки. Использование матрицы ключей позволяет устранить зависимость результата измерения от коэффициентов передач каналов и снизить температурную нестабильность результата измерения в десятки раз.

Данная электроника обеспечивает разрешение (минимальный шаг, который она способна различить) лучше 1 мкм, относительная погрешность измерений для большинства датчиков не превышает 5–10 мкм. Это меньше погрешностей, определяемых механикой стенда (например, погрешность установки датчика).

Суммарная повторяемость результатов измерений оценивалась путем многократного (5–10 раз) повторения цикла измерений со съемом датчика и его установкой на стенд после каждого цикла. Для датчиков Бустера NSLS-2 повторяемость результатов измерений составила 10–15 мкм. Часть электроники стенда выполнена в стандарте VME, часть размещена в отдельных корпусах.

Программное обеспечение стенда двухуровневое. На нижнем уровне, работающем в VME контроллере¹ под операционной системой Linux, осуществляется непосред-

ственное управление блоками электроники и съем данных. Сам VME контроллер подключен к локальной сети стенда. Там же в контроллере работает сервер, который может через протокол TCP/IP обмениваться данными со многими программами-клиентами, работающими в компьютерах, подключенных к данной сети. Программа высокого уровня, работающая на управляющем компьютере под операционной системой Linux, задает общий алгоритм работы стенда, а также прием и окончательную обработку данных.

Снятие координатных сеток датчиков положения пучка

Основными характеристиками датчиков положения пучка, измеряемых на стенде, являются так называемые координатные сетки, которые позволяют установить связь между реальными координатами пучка и величинами сигналов с четырех электродов датчика: U_A , U_B , U_C , U_D . Взаимное расположение электродов представлено на рис. 5.

Координатная сетка измеряется следующим образом. По заданной программе антенна перемещается от точки к точке, останавливаясь в каждой точке примерно на 1 с. За это время измеряются величины сигналов

¹ См.: Мамкин В. Р. Контроллер VME BIVME2 // http://www.inp.nsk.su/~mamkin/bivme2_to.pdf

с четырех электродов датчика, результаты записываются в файл. Сетка, содержащая, например, 15×20 точек, снимается примерно за 7 мин. Весь процесс полностью автоматизирован.

Далее снятая информация обрабатывается, в результате чего находятся коэффициенты, используя которые, можно на основе реальных сигналов датчика U_A, U_B, U_C, U_D найти координаты пучка. На первом этапе находят так называемые геометрические факторы датчика K_X, K_Y , являющиеся первыми производными зависимостей отклонений пучка от центра X, Y от членов

$$\frac{U_A - U_B - U_C + U_D}{U_A + U_B + U_C + U_D}$$

и

$$\frac{U_A + U_B - U_C - U_D}{U_A + U_B + U_C + U_D}$$

соответственно [4]. В принципе, для небольших отклонений пучка от центра можно ограничиться использованием геометрических факторов, вычисляя координаты пучка по линейным формулам:

$$\begin{aligned} X &= K_X \times \frac{U_A - U_B - U_C + U_D}{U_A + U_B + U_C + U_D}, \\ Y &= K_Y \times \frac{U_A + U_B - U_C - U_D}{U_A + U_B + U_C + U_D}. \end{aligned} \quad (1)$$

Так, для датчиков Бустера накопителя NSLS-2, если рассчитывать координаты пучка по формулам (1), требуемая абсолютная точность в 200 мкм получается только при отклонениях от центра не более 3 мм. Поскольку областью, в которой нужно было достичь точности 200 мкм, являлась окружность диаметром 16 мм, были предприняты дополнительные действия. По формулам (1) вычислялась так называемая промежуточная сетка.

На рис. 6 тонкими линиями показана полученная промежуточная сетка, снятая для одного из датчиков. Узлам этой промежуточной сетки соответствуют реальные координаты антенны (узловые точки сетки из тонких штриховых линий). Таким образом, мы имеем две матрицы размерностью $M \times N$ (примерно 15×20), между которыми существует связь. Вообще говоря, реальные координаты пучка можно находить, используя линейную интерполяцию между элементами матриц.

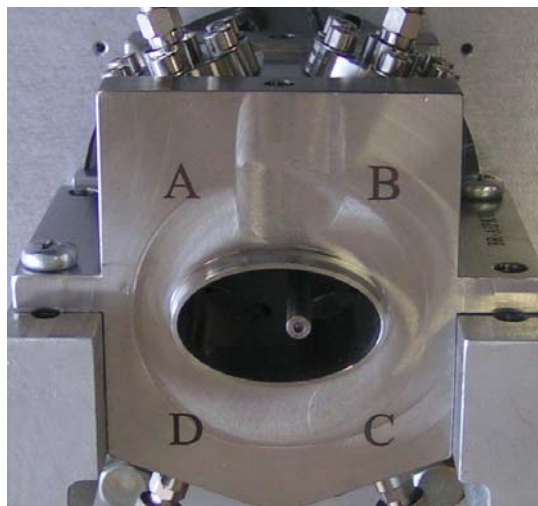


Рис. 5. Электростатический датчик положения пучка с размером вакуумной камеры 41×24 мм

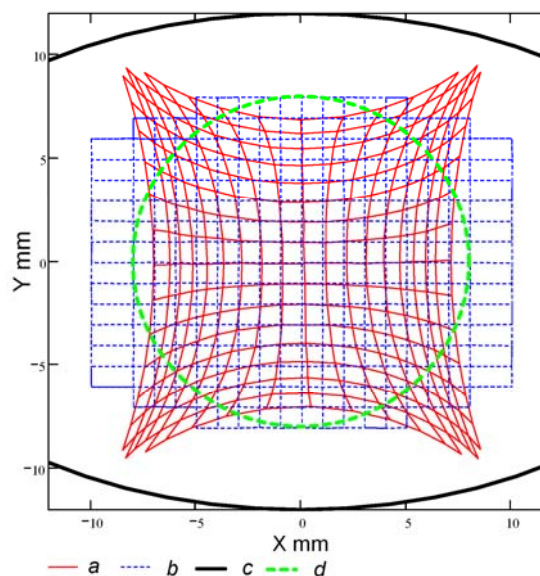


Рис. 6. Промежуточная сетка для одного из датчиков Бустера: a – промежуточная сетка; b – положение антенны; c – вакуумная камера; d – область интерполяции

На практике, для упрощения вычислений, учитывая, что, как правило, эти вычисления выполняются специализированными процессорами типа FPGA за очень короткие времена, используют интерполяцию полиномами. Нами, в частности, были использованы полиномы третьего порядка. Коэффициенты полинома C_{Xij}, C_{Yij} устанавливают связь между элементами матриц и находятся для определенной области оптимизации. Для датчиков Бустера такой областью явля-

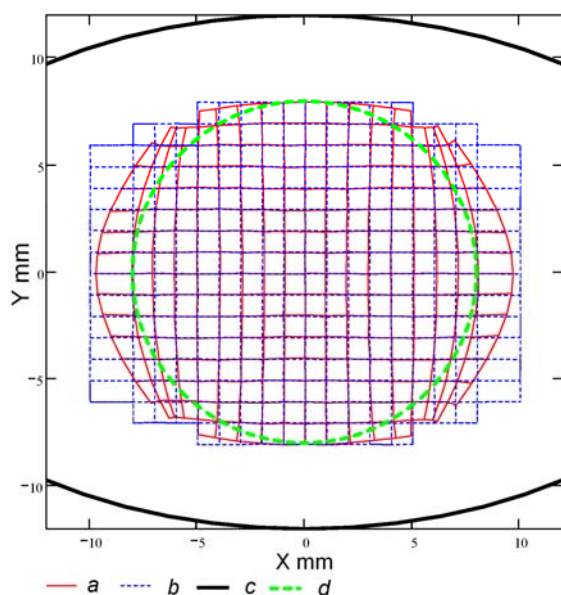


Рис. 7. Вычисленная с использованием полиномов сетка координат пучка: *a* – вычисленные координаты; *b* – положение антенны; *c* – вакуумная камера; *d* – область интерполяции

лась окружность диаметром 16 мм. Реальные координаты пучка с использованием коэффициентов полинома вычисляются в два этапа. На первом этапе, используя геометрические факторы K_x , K_y , находят промежуточные координаты x , y по формулам (1). На втором этапе на основе промежуточных координат и коэффициентов полинома находят точные координаты:

$$X = \sum C_{Xij} \times x^i \times y^j,$$

$$Y = \sum C_{Yij} \times x^i \times y^j.$$

Члены полинома нулевой степени $x^0 \times y^0$ дают постоянный сдвиг электрического нуля датчика.

На рис. 7 тонкими линиями показана вычисленная с использованием полиномов координатная сетка пучка. Узлы тонких пунктирных линий соответствуют реальному положению антенны. На рис. 8 приведена разница между реальными координатами антенны и координатами, вычисленными с использованием полиномов. По оси абсцисс приведено расстояние от точки измерения (узла сетки) до центра датчика. Данная разница координат фактически является ошибкой интерполяции. Внутри зоны оптимизации (окружности диаметром 16 мм) она не превышает 200 мкм, что является приемлемым результатом.

Заметим, что в случае необходимости данная погрешность может быть уменьшена за счет использования полинома более высокого порядка, ценой роста объема вычислений.

Результаты измерений датчиков Бустера накопителя NSLS-2

На описываемом стенде были измерены 37 датчиков положения пучка двух типов, изготовленных в ИЯФ для Бустера накопителя NSLS-2. Первый тип (29 шт.) имел раз-

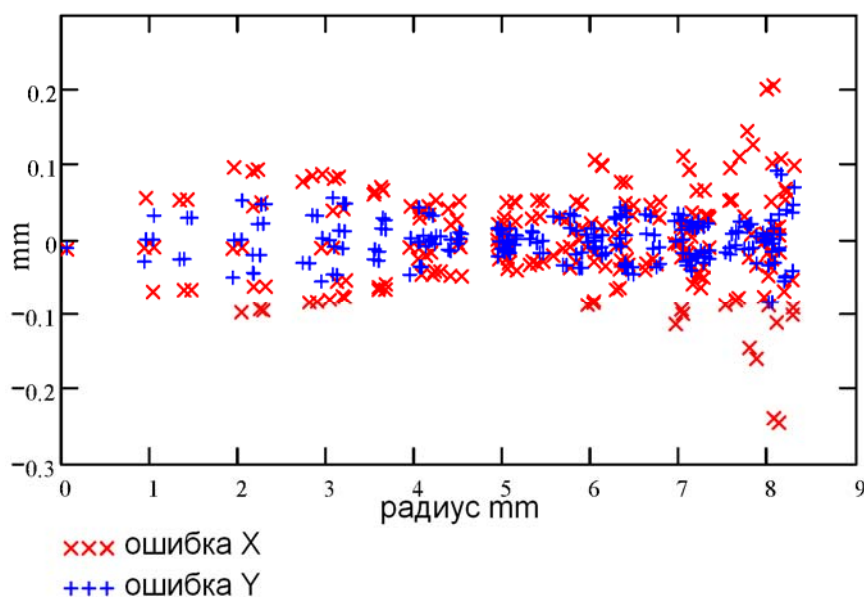


Рис. 8. Разница между реальными координатами антенны и координатами, вычисленными с использованием полиномов

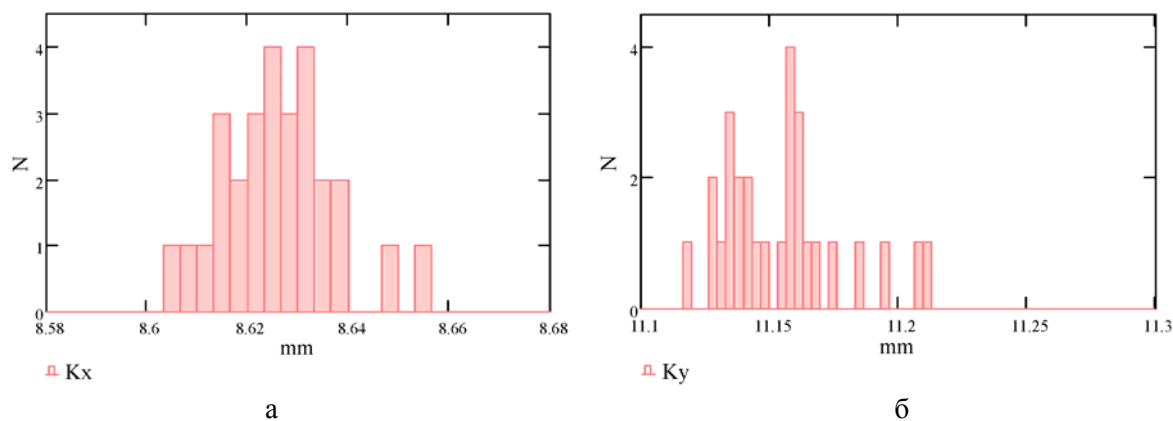


Рис. 9. Гистограммы распределения геометрических факторов: *a* – K_x ; *б* – K_y

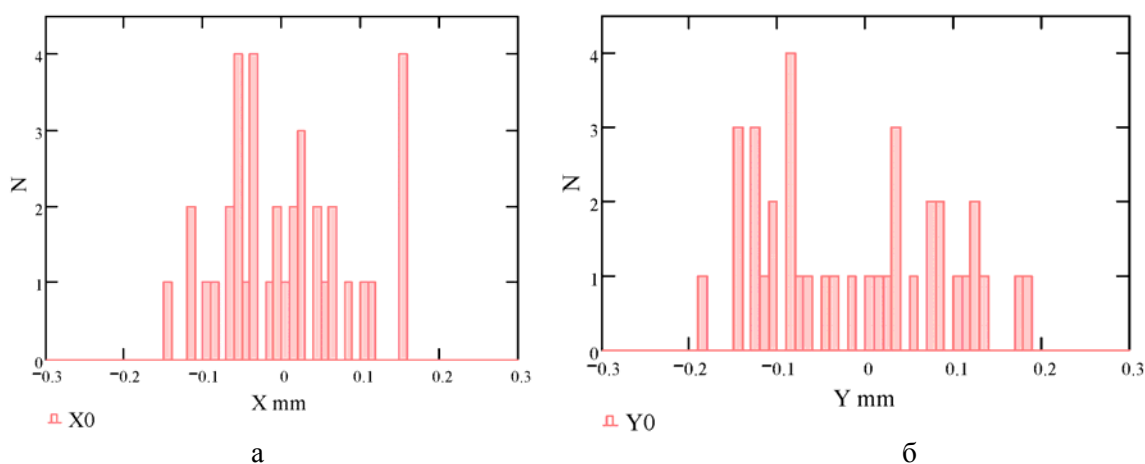


Рис. 10. Гистограммы распределения смещения нуля для 37 датчиков: *a* – по оси X ; *б* – по оси Y

мер камеры 41×24 мм (см. рис. 5). Второй тип (8 шт.) имел размер камеры 62×22 мм.

Для всех датчиков были сняты координатные сетки, вычислены коэффициенты полиномов, геометрические факторы и смещения нуля. Некоторые параметры, используемые для контроля качества датчиков, приведены выше. Гистограммы распределения измеренных геометрических факторов $K_{X,Y}$ для 29 датчиков первого типа представлены на рис. 9. На рис. 10 показаны гистограммы распределения смещения нуля по осям X и Y для всех 37 датчиков.

Разброс параметров датчиков находится в установленных пределах, выбор допустимых пределов обусловлен технологически-

ми допусками на размеры и возможностями производства, на котором эти датчики изготавливались.

Заключение

Описанный стенд позволяет достаточно быстро и с высокой точностью снять координатные сетки датчиков положения пучка и на их основе вычислить основные параметры датчиков, необходимые в дальнейшем для работы этих датчиков в накопителях заряженных частиц. Измерения на стенде также являлись одним из этапов контроля качества изготовления датчиков положения пучка. Датчики с недопустимо

большими отклонениями параметров от нормы подвергались переделке с целью получить приемлемые параметры датчика.

Список литературы

1. *Gurov S. et al.* Status of NSLS-II Booster // PAC'11. N. Y., USA, WEP201. P. 1864.
2. *Stella A.* Analysis of the Dafne Beam Position Monitor with a Boundary Element Method // Dafne Technical Note CD-10. Frascati, 1997.

3. *Cosicek A.* Libera Electron Beam Position Processor // Proc. of PAC. Knoxville, 2005. P. 4284–4286.

4. *Смалюк В. В.* Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск: Параллель, 2009. 294 с.

Материал поступил в редколлегию 11.09.2012

Е. А. Bekhtenev, G. V. Karpov

AUTOMATED STAND FOR MEASUREMENTS OF ELECTROSTATIC BEAM POSITION MONITORS PARAMETERS

A stand for measurements of the electrostatic beam position monitors (BPM) parameters is described. BPM parameters are measured with help of movable antenna modeling the charged-particle beam. Moving of the antenna is performed on two orthogonal directions with help of stepping motors. Full automation facilitates the measurements of BPM coordinate grid with high position resolution. Stand electronics allows BPM parameters measurements with high accuracy. Measurements at the stand performed with BPMs have demonstrated repeatability of the measurements results at level of 10–15 microns what satisfies all requirements to stand. The stand described in the paper was used for quality control of electrostatic BPM production.

Keywords: beam position monitor, charge particle storage ring, coordinate grid, instrumental function.