

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.3.038.616

### КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА НАКОПИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА<sup>1</sup>

©2024 г. Ю. А. Роговский<sup>a,b,\*</sup>, Е. А. Бехтенов<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 690090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11

<sup>b</sup> Новосибирский государственный университет,  
Россия, 690090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

\*e-mail: rogovsky@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 18.03.2024 г.

После доработки 25.03.2024 г.

Принята к публикации 24.05.2024 г.

Проведена калибровка электростатических датчиков положения пучка двух типов. Сигналы с электродов преобразованы в координаты пучка при помощи нелинейного полиномиального преобразования, коэффициенты которого рассчитаны по методу наименьших квадратов. Это позволило измерять положение пучка с точностью лучше требуемой величины – 0.1 мм для однократного пролета пучка. Осуществлена привязка механического центра датчиков к внешним геодезическим знакам. Результат калибровки был использован при работе со всеми датчиками в кольце накопителя-охладителя, исходя из предположения о том, что все они изготовлены с одинаковой механической точностью. Это позволило измерять параметры пучка с лучшей точностью, чем до проведения калибровки.

~~Ключевые слова:~~ датчик положения пучка, калибровка, накопитель, измерение орбиты

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Электростатические датчики положения пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса [1, 2] в ИЯФ были спроектированы, изготовлены и установлены на кольце накопителя в конце 90-х годов прошлого века. С тех пор не осталось детальной информации о производимой калибровке каждого датчика перед установкой в вакуумную камеру. Однако в

---

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

наличии остались два запасных датчика разной формы, которые было решено использовать для калибровки исходя из предположения о том, что все они (16 шт. в накопителе) изготовлены с одинаковой механической точностью, с одинаковой пространственной геометрией электродов. До проведения калибровки положение пучка электронов восстанавливалось с применением линейных формул (1), (2), в которых в качестве масштабных коэффициентов были использованы характерные размеры вакуумной камеры в месте установки датчиков. Это позволило измерять относительные смещения пучка или вычисление частот бетатронных колебаний, но совсем не подходило для прецизионных измерений, где требуемая точность составляет порядка 0.1 мм. Результат калибровки планируется использовать при работе с остальными датчиками в кольце накопителя-охлаждителя.

## 2. ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Электростатический датчик положения пучка (пикап, pickup) представляет собой систему электродов, гальванически изолированных между собой и изолированных от стенок вакуумной камеры [3]. Обычно у датчика имеется не менее четырех электродов, и пролетающий сквозь него внутри вакуумной трубы пучок наводит электрические потенциалы на каждом из электродов. Измеряя напряжение на каждом электроде (относительно земли), можно определить координату пролетевшего пучка.

На рис. 1 изображен электростатический датчик положения пучка, который используется для измерения координат пучка на каждом последовательном обороте. В кольце накопителя-охлаждителя ИК установлено 16 электростатических датчиков, являющихся основным источником информации о положении пучка в вакуумной камере [4].

**Рис. 1.** Пикап на накопительном кольце: эллиптический (слева), круглый (справа).

## 3. ЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТ

Для определения координат пучка удобно поместить ось декартовой системы координат в точку, где находится механический центр пикапа, и пронумеровать каждый электрод в соответствии с четвертью декартовой системы координат, в которой он находится. Обозначим  $s_1, s_2, s_3, s_4$  напряжения, наведенные на соответствующий электрод относительно земли. Интуитивно понятно, что если пучок находится в верхней полуплоскости, то  $s_1$  и  $s_2$  должны быть больше, чем  $s_3$  и  $s_4$ . Аналогично, если пучок имеет координату  $x > 0$ , то  $s_1$  и  $s_4$  будут превышать  $s_2$  и  $s_3$ . Тогда можно ввести так называемые электрические координаты ( $h, v$ ), где  $h$  (horizontal) – горизонтальное электрическое положение пучка, а  $v$  (vertical) –

вертикальное электрическое положение пучка. Далее удобно выбрать  $h$  и  $v$  следующим образом:

$$\begin{aligned}h &= (s_1 - s_2 - s_3 + s_4) / s, \\v &= (s_1 + s_2 - s_3 - s_4) / s, \\s &= (s_1 + s_2 + s_3 + s_4).\end{aligned}\tag{1}$$

где  $s = (s_1 + s_2 + s_3 + s_4)$  – суммарный сигнал для нормировки.

Для датчика повернутого на угол  $\pi / 4$  более удобной будет пара переменных  $h'$  и  $v'$ , определенная следующим образом:

$$\begin{aligned}h' &= (s_1 - s_3) / (s_1 + s_3), \\v' &= (s_2 - s_4) / (s_2 + s_4).\end{aligned}\tag{2}$$

При малых отклонениях  $x$  и  $y$  от нуля (амплитуда колебаний и положение равновесной орбиты порядка нескольких миллиметров или меньше) справедливо линейное приближение:  $x = a \cdot h$ ,  $y = b \cdot v$ . При больших смещениях пучка от центра датчика вычисление координаты пучка по формулам выше может давать значительную ошибку, вызванную нелинейностью датчика. На рис. 2 красными точками показаны положения пучка в узлах прямоугольной сетки, а синим точками показаны вычисленные по формулам (1) с масштабными коэффициентами ( $a, b$ ), подобранными так, чтобы вычисленное положение пучка вблизи центра датчика хорошо совпадало и измерениями. Видно проявление нелинейности уже при отклонениях порядка 5 мм, а также "подушкообразное" искажение при приближении к электроду пикапа.

На момент запуска накопителя-охладителя пикапы были калиброваны в линейном приближении с применением формул  $x = a \cdot h$  и  $y = b \cdot v$ , поэтому для улучшения системы диагностики и уменьшения ошибок измерения координат была проведена нелинейная полиномиальная калибровка.

**Рис. 2.** Положение пучка в пикапе в линейном приближении.

Исходные данные для рис. 2 получены при калибровке датчика положения пучка, о которой будет подробно рассказано ниже.

#### 4. НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТ

Для того чтобы расширить рабочую область датчика в которой сохраняется линейность, составим полиномиальное преобразование вида (тут  $0 \leq i, j \leq N$ , где  $N$  – максимальная степень полинома):

$$\begin{aligned} x(h, v) &= \sum_i \sum_j a_{ij} \cdot h^i \cdot v^j, \\ y(h, v) &= \sum_i \sum_j b_{ij} \cdot h^i \cdot v^j. \end{aligned} \quad (3)$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов полиномиального разложения будем рассматривать величины  $h$  и  $v$  и их различные степени как независимые величины. Тогда задача может быть сведена к задаче о линейной регрессии. Рассмотрим систему уравнений для восстановленных горизонтальных координат  $x^{rec}$ , где  $\varepsilon$  – все высшие члены полиномиального разложения (пока мы не определяем их точно), которые далее отбросим:

$$\begin{aligned} x_1^{rec}(h, v) &= \sum_i \sum_j a_{ij} \cdot h_1^i \cdot v_1^j + \varepsilon_{1r}, \\ x_2^{rec}(h, v) &= \sum_i \sum_j a_{ij} \cdot h_2^i \cdot v_2^j + \varepsilon_{2r}, \\ &\dots \\ x_m^{rec}(h, v) &= \sum_i \sum_j a_{ij} \cdot h_m^i \cdot v_m^j + \varepsilon_m. \end{aligned} \quad (4)$$

Система для  $y^{rec}$  выглядит аналогично с точностью до замены  $a_{ij}$  на  $b_{ij}$ . Тогда воспользуемся удобной матричной формой записи:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix}, \quad \hat{\mathbf{W}} = \begin{pmatrix} 1 & h_1 & h_1^2 & \dots & v_1 & v_1^2 & \dots & h_1 \cdot v_1 & \dots & h_1 \cdot v_1^2 & \dots & h_1^3 \cdot v_1^2 & \dots \\ 1 & h_2 & h_2^2 & \dots & v_2 & v_2^2 & \dots & h_2 \cdot v_2 & \dots & h_2 \cdot v_2^2 & \dots & h_2^3 \cdot v_2^2 & \dots \\ & & & \dots & & & & & & & & & \dots \\ 1 & h_m & h_m^2 & \dots & v_m & v_m^2 & \dots & h_m \cdot v_m & \dots & h_m \cdot v_m^2 & \dots & h_m^3 \cdot v_m^2 & \dots \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ \vdots \\ a_{kk} \end{pmatrix}$$

Максимальная степень полинома  $N = (i + j)$ , подбирая которую можно добиться разной степени точности, с которой наше разложение воспроизводит экспериментальные данные. Число членов в полиномиальном разложении равно  $k$ . Число уравнений  $m$  соответствует количеству различных точек, в которых происходило измерение величин  $x$ ,  $y$ ,  $h$ ,  $v$ . Для случая  $y^{rec}$  имеем вектор коэффициентов  $\vec{B}$ .

В матричной форме вся система уравнений будет выглядеть как  $\mathbf{X} = \hat{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{A}$  и  $\mathbf{Y} = \hat{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{B}$ . Используя метод наименьших квадратов, получим, что оптимальные значения коэффициентов  $\mathbf{A}^{opt}$  и  $\mathbf{B}^{opt}$  могут быть найдены следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^{\text{opt}} &= (\hat{\mathbf{W}}^T \cdot \hat{\mathbf{W}})^{-1} \cdot \hat{\mathbf{W}}^T \cdot \mathbf{X}, \\ \mathbf{B}^{\text{opt}} &= (\hat{\mathbf{W}}^T \cdot \hat{\mathbf{W}})^{-1} \cdot \hat{\mathbf{W}}^T \cdot \mathbf{Y}. \end{aligned} \quad (5)$$

где величины  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $h_i$ ,  $v_i$  являются измеримыми.

Для экспериментального построения нелинейного преобразования сигналов от пикапа к координатам пролетающего сгустка можно последовательно помещать источник сигнала в известные точки внутри пикапа  $x_i$  и  $y_i$ , а по измеренным сигналам от электродов можно получить величины  $h_i$  и  $v_i$ , и тогда по формулам (5) можно вычислить коэффициенты преобразования.

## 5. КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С помощью специального стенда в ИЯФ СО РАН [5] была проведена калибровка двух датчиков эллиптической и круглой формы. Схема стенда изображена на рис. 3. Исследуемый датчик жестко закрепляется на неподвижном столике. На подвижную антенну (диаметром 5 мм), с генератора подается синусоидальный сигнал с частотой 3 МГц и амплитудой 1 В. Подвижный столик перемещается при помощи шаговых двигателей (ШД X, ШД Y), с помощью которых центр антенны можно позиционировать в узлах декартовой сетки с точностью до 2–3 микрона. Напряжения  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ ,  $s_4$  на электродах датчика измеряются на пикап-станции (электроника стенда) с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Была проведена серия калибровочных измерений в области  $\Delta x \times \Delta y = 40 \times 40$  мм<sup>2</sup> для круглого датчика и  $\Delta x \times \Delta y = 32 \times 20$  мм<sup>2</sup> для датчика эллиптической формы.

**Рис. 3.** Схематическое изображение измерительного стенда.

В ходе калибровки было исследовано, как ведет себя ошибка восстановления координат в зависимости от максимальной степени полиномиального преобразования для датчиков разной формы. Определим ошибку калибровки в точке  $(x_m, y_m)$  следующим образом:

$$\delta_m = \sqrt{(x_m^{\text{rec}} - x_m^0)^2 + (y_m^{\text{rec}} - y_m^0)^2}, \quad (6)$$

где  $(x_m^0, y_m^0)$  – положения антенны в момент измерения (узлы декартовой сетки). Тогда средняя ошибка калибровки для  $M$  калибровочных точек может быть определена следующим образом:

$$\delta = \sum_m \delta_m = \frac{1}{M} \cdot \sum_{m=1}^M \sqrt{(x_m^{rec} - x_m^0)^2 + (y_m^{rec} - y_m^0)^2}. \quad (7)$$

Заметим, что средняя ошибка будет возрастать при увеличении размеров области, в которой перемещается антенна. Понятно, что такой нежелательный эффект появляется из-за того, что близкие к электродам точки имеют большую  $\delta_m$ , именно такие точки дают значительный вклад в среднюю ошибку. Сравнение ошибки для разных калибровочных площадей приведено на рис. 4: для области  $32 \times 20$  мм<sup>2</sup> (слева), для области  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup> (справа) эллиптического датчика.

**Рис. 4.** Гистограмма ошибки определения координаты.

На рис. 5 показано поведение средней ошибки для датчиков разной формы в зависимости от максимальной степени полинома: красные точки – для круглого датчика, синие точки – для датчика эллиптической формы. Заметим, что средняя ошибка  $\delta$  сильно уменьшается при переходе с четной на нечетную степень, а не наоборот. Это объясняется тем, что калибровочное преобразование должно быть нечетной функцией по  $h$  и  $v$ .

**Рис. 5.** Средняя ошибка восстановления координаты при калибровке.

Полиномиальное преобразование с 7-й степенью было выбрано как оптимальное, так как при переходе с 7-й на 9-ю степень ошибка уменьшается не более чем в полтора раза, а количество коэффициентов сильно возрастает, что ухудшает быстродействие расчетов. Для эллиптического пикапа в таком случае средняя ошибка восстановления координаты составляет по абсолютному значению около 50 микрон, для круглого около 80 микрон. Само же полиномиальное преобразование для двух датчиков приведено в табл. 1, 2.

**Таблица 1.** Коэффициенты полиномиального разложения при степенях  $h$  и  $v$

Датчик	Круглой формы		Эллиптической формы	
	$A^{opt}$	$B^{opt}$	$A^{opt}$	$B^{opt}$
1	0.80597	-0.672278	0.330479	-0.480214
$h$	21.2324	0.149678	11.944	-0.188307
$h^2$	-0.187386	-0.335632	0.12393	0.806753
$h^3$	10.1779	0.153259	12.9732	0.346029
$h^4$	0.215058	0.346976	-0.37967	-0.92824
$h^5$	-10.1409	-0.607003	-24.3921	-0.230889
$h^6$	-0.50895	-0.695091	0.819445	0.626938

$h^7$	13.3358	-0.17372	37.3839	0.275377
$v$	-0.30566	21.2576	-0.269354	24.9339
$v^2$	0.063335	-0.00843348	-0.523961	-1.41018
$v^3$	0.86871	9.49248	0.0865769	32.4984
$v^4$	0.300523	0.730036	1.00278	-3.42326
$v^5$	-3.12408	-8.30805	0.314004	65.3245
$v^6$	-0.159042	-0.502069	0.102949	-1.60618
$v^7$	3.67172	11.7417	-2.70468	38.7775

**Таблица 2.** Коэффициенты полиномиального разложения при смешанных степенях  $h$  и  $v$

Датчик Полиномиальный член	Круглой формы		Эллиптической формы	
	$A^{opt}$	$B^{opt}$	$A^{opt}$	$B^{opt}$
$h v$	-0.706011	0.201741	0.514765	-1.64831
$h^2 v$	0.389029	17.0454	0.650838	37.9993
$h^3 v$	2.30553	-0.265489	0.832079	3.49761
$h^4 v$	-2.20344	-33.2647	-0.583907	36.3651
$h^5 v$	-4.79066	0.356866	0.608058	-2.77524
$h^6 v$	3.32789	40.9357	0.441795	-21.1242
$h v^2$	18.178	-0.368745	-16.8744	-0.0759034
$h^2 v^2$	0.78504	2.99317	1.53288	5.07361
$h^3 v^2$	-63.3138	0.972817	19.3575	0.0155894
$h^4 v^2$	2.69276	-8.56937	1.27002	4.93759
$h^5 v^2$	100.623	-1.49321	-21.6283	-0.257526
$h v^3$	1.41763	-0.152582	0.855161	-2.03374
$h^2 v^3$	-2.23193	-58.7074	-1.08868	-94.1008
$h^3 v^3$	-8.76335	3.78318	-1.0991	3.86928
$h^4 v^3$	3.12021	135.537	-0.652904	90.3764
$h v^4$	-36.6924	1.6943	23.2286	0.326715
$h^2 v^4$	3.54978	-6.96035	-1.53116	6.15944
$h^3 v^4$	141.806	-3.63064	35.3388	0.748685
$h v^5$	-1.6927	1.6877	-0.0340528	-1.22195
$h^2 v^5$	3.0338	95.9189	3.58527	-122.039
$h v^6$	43.8307	-3.23372	-14.3055	-0.28814

## 6. ПОИСК МЕХАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ДАТЧИКА

При проведении калибровки точка  $(0, 0)$  декартовых координат, вообще говоря, не совпадает с механическим центром датчика, так как система координат привязана к столу стенда, а не к пикапу. Учитывать сдвиг сетки необходимо по той причине, что датчик в дальнейшем устанавливается в кольцо ускорителя соосно вакуумной трубе (ось пикапа проходит через его механический центр). Определим механический и электрический центры пообратного датчика положения пучка следующим образом.

- Механический центр – точка, определяемая геометрией, физический центр. Например, для датчика идеально круглой формы механический центр – центр окружности.
- Электрический центр – точка, определяемая электростатическими свойствами (преимущественно электродами). А именно: точка, в которой  $s_1 = s_2 = s_3 = s_4$  и, как следствие,  $h = v = 0$ . Тогда координатами электрического центра должны быть  $a_{00}$  и  $b_{00}$  – коэффициенты при нулевых степенях  $h$  и  $v$  калибровочного полиномиального преобразования.

В идеальном случае оба центра должны совпадать, но в реальности это не так: при изготовлении пикапа могут быть механические ошибки, смещающие электрический центр. В этом случае точно определить координату электрического центра можно тоже из калибровки. Для поиска механического центра необходимо провести уже серию минимум из трех калибровочных измерений.

- При зафиксированном положении №1 датчика на столе стенда, проводятся калибровочные измерения для 15–20 точек положения антенны в центральной области, из которых можно получить координату электрического центра для первого положения датчика в положении №1  $(x_1, y_1)$ .
- При измененном положении №2 датчика (осуществлен поворот пикапа на произвольный угол  $\varphi$ , например  $100^\circ$ ) выполняем калибровочные измерения, из которых определяется координата электрического центра для повернутого датчика в положении №2  $(x_2, y_2)$ .
- Снова повернем пикап на произвольный угол  $\varphi$ , зафиксируем датчик в положении №3, выполним калибровочные измерения, из которых вновь определим электрического центра для повернутого датчика в положении №3  $(x_3, y_3)$ .

Точки  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  образуют треугольник, который можно описать окружностью. Теперь заметим, что в положениях №1, №2, №3 механический центр находится

в одном и том же месте, а его координата совпадает с координатой центра описанной окружности.

Используя уравнение описанной окружности, получаем координаты механического центра:–

$$x_0 = \frac{1}{D} \cdot \det \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & y_3 & 1 \end{pmatrix}, \quad y_0 = \frac{1}{D} \cdot \det \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & 1 \end{pmatrix}, \quad D = \det \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

В результате несложных вычислений было получено, что для эллиптического датчика абсолютный сдвиг нуля калибровочной сетки составлял 1.06 мм, а для круглого – 0.22 мм. Соответствующие сдвиги нуля по осям учтены также в результирующих величинах  $a_{00}$  и  $b_{00}$  нашего полиномиального преобразования электрических сигналов в координаты.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была проведена калибровка пикапов для кольца накопителя-охладителя инжекционного комплекса с применением нелинейного полиномиального преобразования. Предложен метод определения механического центра датчика с точностью не хуже, чем проведенная калибровка в целом, что позволило построить преобразование относительно механического центра датчика, а значит, привязать координаты пучка к внешним реперам (геодезическим знакам, вакуумной камере). Ранее для этих датчиков использовалась только линейная калибровка, что ограничивало возможности системы диагностики кольца, особенно при смещении положения пучка более чем 10 мм. Полученные результаты позволяют ожидать, что точность восстановления координаты по измеренным сигналам будет не хуже 20–30 мкм при однократном измерении, однократном пролете пучка сквозь датчик. Далее точность будет заметно выше при усреднении полученной координаты на протяжении нескольких тысяч оборотов пучка в накопителе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maltseva Yu.I., Andrianov A.V., Astrelina K.V. et al.* // Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia. 2021. <http://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUA02>
2. Физический проект комплекса ВЭПП-5. Препринт ИЯФ СО РАН. 1995.
3. *Смалюк В.В.* Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. ISBN 978-5-98901-063-9, Параллель, 2009.
4. *Bekhtenev E.A., Bolkhovitianov D.Yu., Dementev E.N. et al.* // Proc. RuPAC'2006. Novosibirsk, Russia. 2006.
5. *Бехтенов Е.А.* Частное сообщение. 01.05.2016.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

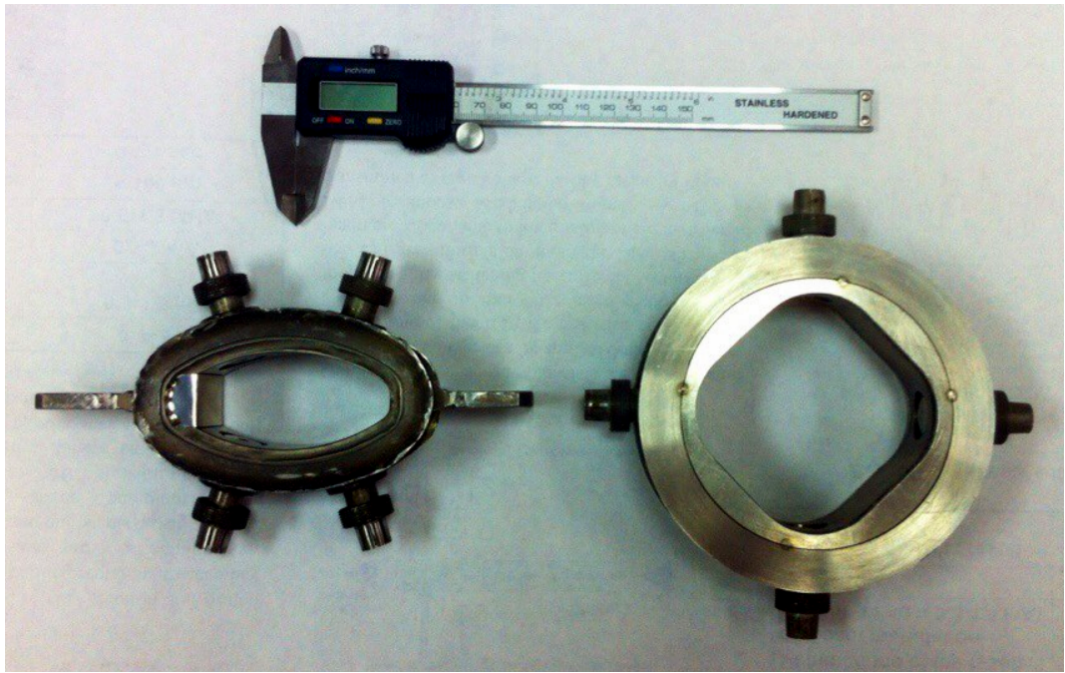
**Рис. 1.** Пикап на накопительном кольце: эллиптический (слева), круглый (справа).

**Рис. 2.** Положение пучка в пикапе в линейном приближении.

**Рис. 3.** Схематическое изображение измерительного стенда.

**Рис. 4.** Гистограмма ошибки определения координаты.

**Рис. 5.** Средняя ошибка восстановления координаты при калибровке.



**Рис. 1**

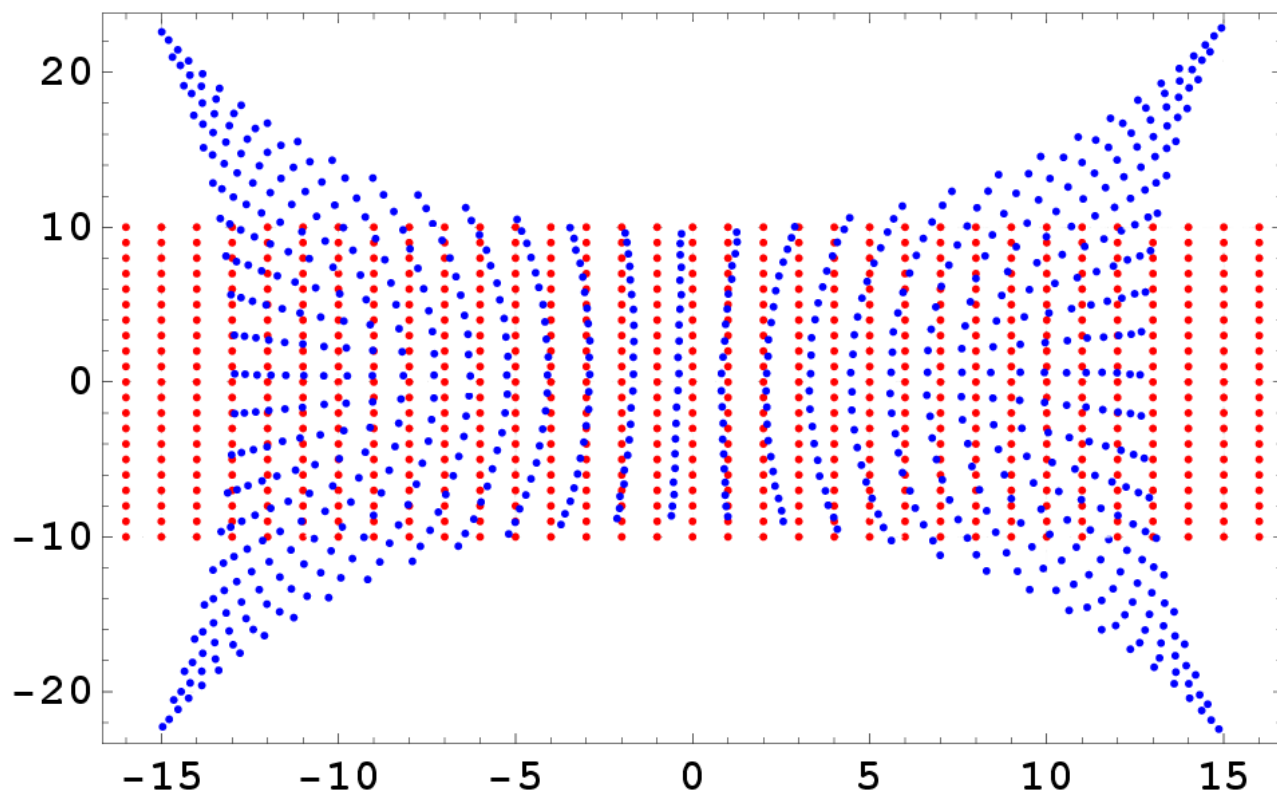


Рис. 2

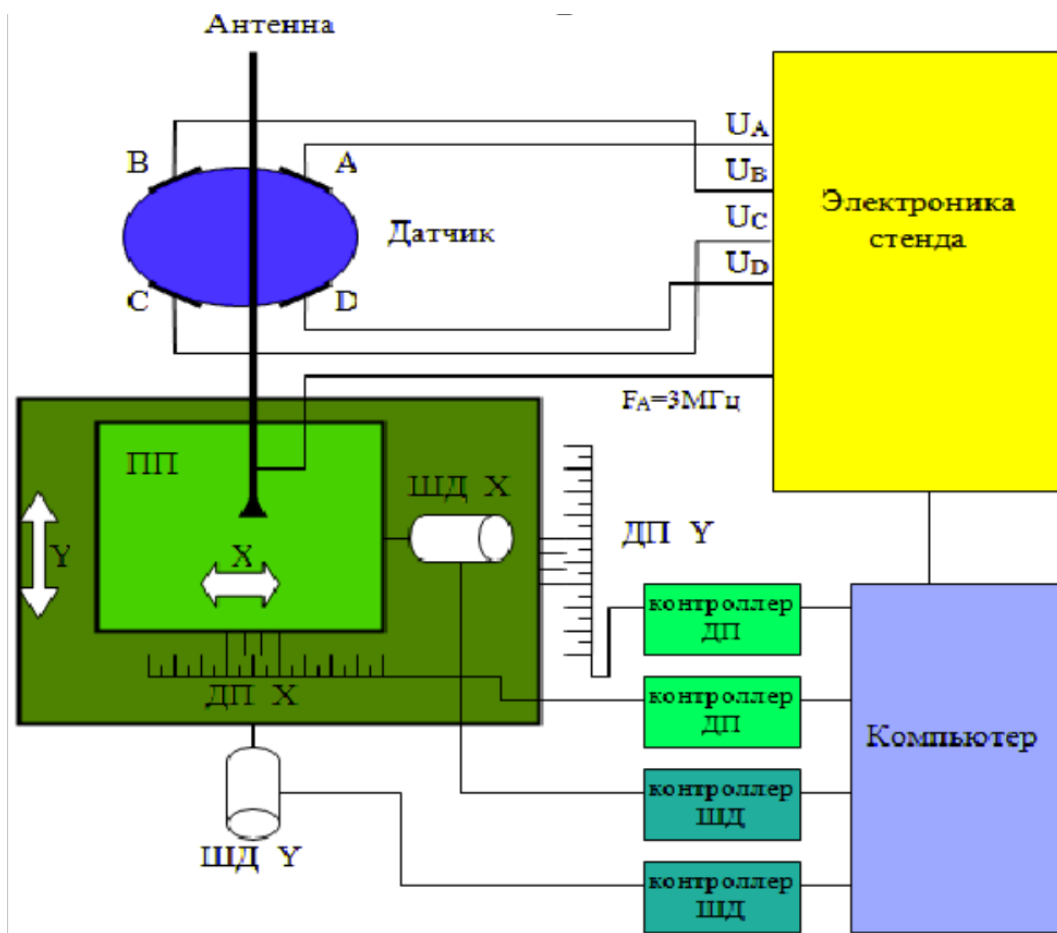
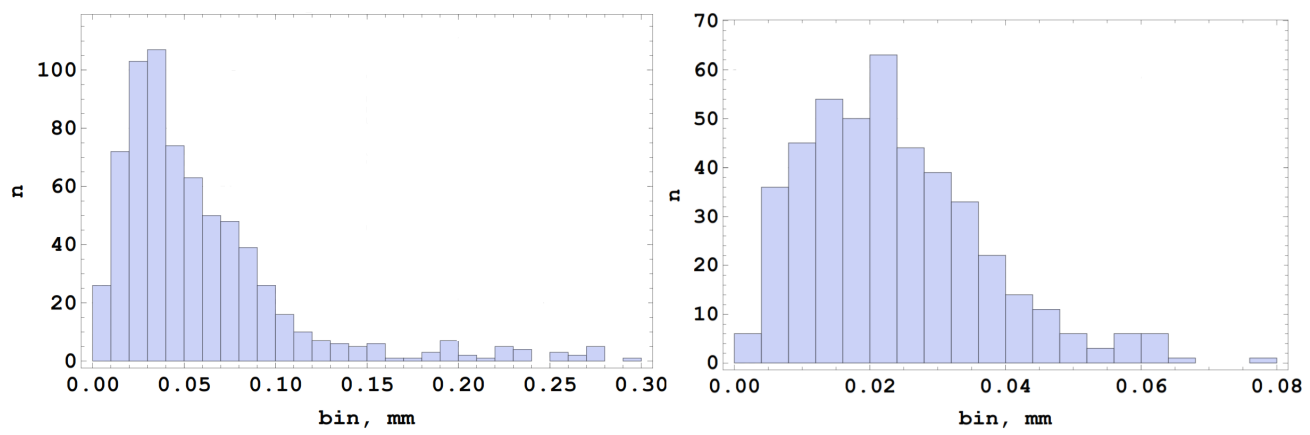


Рис. 3



**Рис. 4**

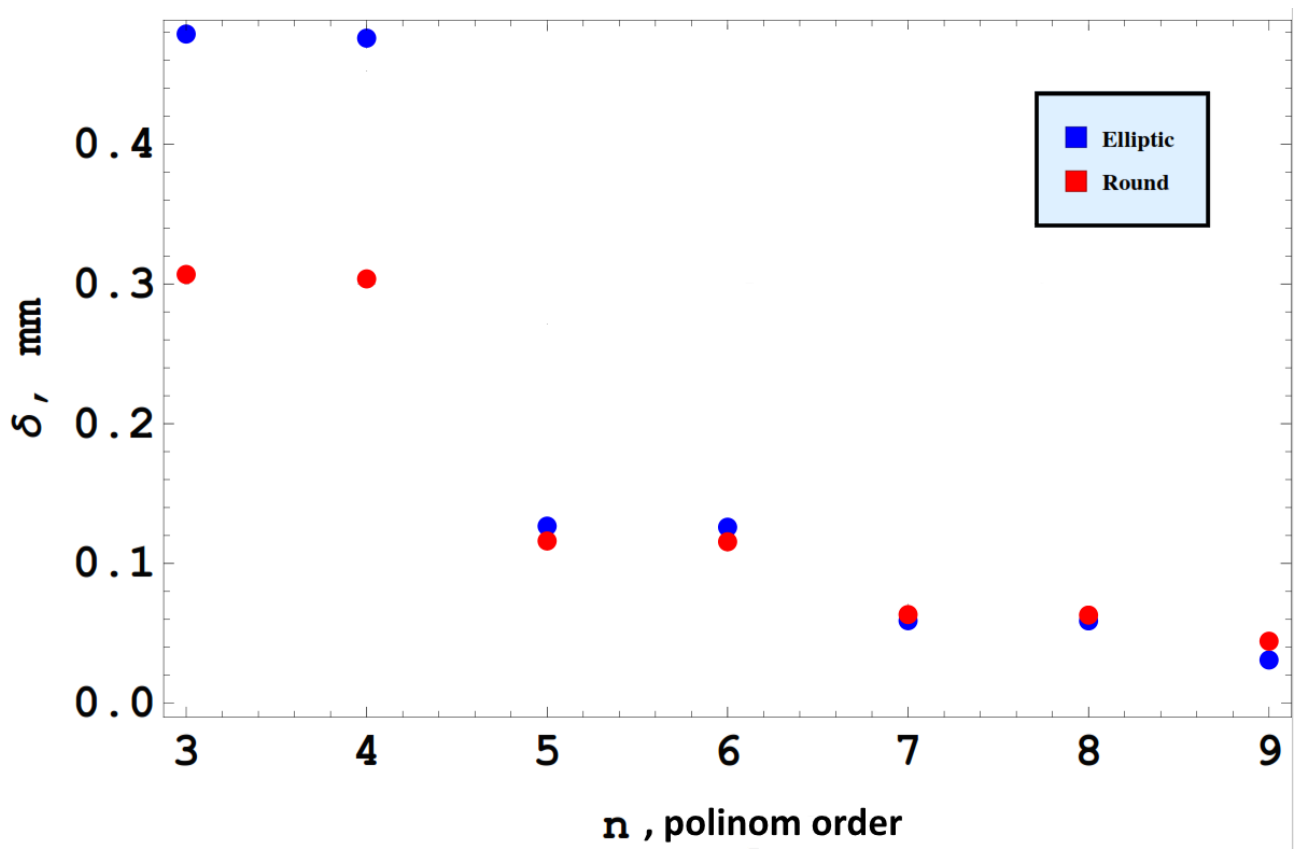


Рис. 5

**Для связи с авторами:**

**Роговский Юрий Анатольевич**

**E-mail: [rogovsky@inp.nsk.su](mailto:rogovsky@inp.nsk.su)**

**Тел.: 8-909-532-82-57 (моб.)**

**Бехтенов Евгений Алексеевич**

**E-mail: [e.a.bekhtenev@inp.nsk.su](mailto:e.a.bekhtenev@inp.nsk.su)**

**Тел.: (329)41-64**

**Для переводчика:**

## **CALIBRATION OF BEAM POSITION MONITORS FOR INJECTION COMPLEX DAMPING RING**

**Yu. A. Rogovsky<sup>1,2,#</sup>, E. A. Bekhtenev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Budker Institute of Nuclear Physics,*

*Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,*

*Russia, 690090, Novosibirsk,*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University,*

*Novosibirsk, 690090 Russia*

*\*e-mail: [rogovsky@inp.nsk.su](mailto:rogovsky@inp.nsk.su)*

The calibration of 2 types of electrostatic beam position monitor was carried out. Signals from the electrodes are converted into beam coordinates using a nonlinear polynomial transformation, the coefficients of which are calculated using the least squares method. This made it possible to measure the position of the beam with an accuracy better than the required value -- 0.1 mm for a single passage of the beam. The mechanical center of the monitor has been linked to external geodetic signs. The calibration result was used with all monitors in the ring, based on the assumption that they were all manufactured to the same mechanical accuracy. This made it possible to measure beam parameters with better accuracy than before calibration.

**Keywords:** beam position monitor, calibration, damping ring, orbit measurements