

# Исследования магнито-индукционных датчиков для измерения пространственных характеристик пучка на сильноточных линейных ускорителях электронов

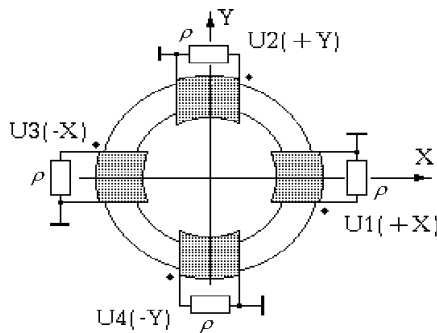
В.Н. Борискин, В.А. Гурин, А.Н. Довбня, В.А. Попенко, Л.В. Репринцев,  
А.Н. Савченко, Д.Л. Степин, В.И. Татанов, В.А. Шендрик

*ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина*

В научно-исследовательском комплексе «Ускоритель» национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» уже несколько лет работает сильноточный двухсекционный импульсный линейный ускоритель электронов «ЭПОС». Длительность токового импульса ЛУЭ «ЭПОС» 4 мкс, ток в импульсе 0,4-1 А, частота следования импульсов 150 Гц, энергия электронов до 30 МэВ. Для обеспечения безопасной проводки пучка созданы четырехобмоточные магнитоиндукционные датчики, обеспечивающие измерение положения центра тока пучка относительно оси ускорителя с погрешностью  $\pm 0.5$  мм на входе и выходе второй ускоряющей секции [1]. В настоящее время в НИК «Ускоритель» разработан компактный двухсекционный ЛУЭ – КУТ-20, на выходе которого установлен аналогичный магнитоиндукционный датчик. Ниже приведены результаты стендовой калибровки этого датчика и экспериментальные результаты работы измерительных каналов на ускорителе ЭПОС. Показана возможность оценки с помощью таких датчиков эллиптичности поперечного сечения пучка, т.е. величины так называемого второго момента [2, 3].

## 1. Измерительные каналы и датчики

Схема датчика положения приведена на рис. 1. Датчик содержит автономные обмотки, сигналы с которых несут информацию как о величине тока пучка, так и о его положении. Обмотки намотаны на ферритовом кольце. Внутренний диаметр кольца равен 60 мм, внешний диаметр 100 мм, высота 30 мм.



Число витков	4X40 вит.
Тип феррита	1000НН
Индуктивность	5.3 мГ
Сопротивление нагрузки	75 Ом
Коэффициент связи	0.975
Апертура для пучка	∅ 42 мм
Длина сборки	110 мм

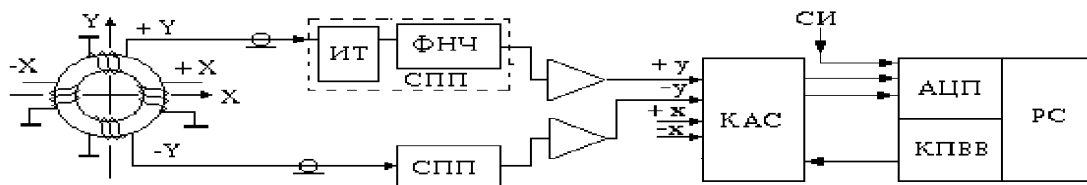
**Рис. 1.** Схема и основные конструктивные данные датчика положения пучка.  $\rho$  – волновое сопротивление кабельных линий;  $U_1 - U_4$  – напряжения на согласующих нагрузках.

Использованная нами схема позволяет получить при токах пучка до 1 А сравнительно большие однополярные сигналы на обмотках датчика, что упрощает их обработку. Для оценки горизонтального  $H$  и вертикального  $V$  отклонения центра пучка от оси датчика нами использованы следующие безразмерные функции:

$$H = (U_1 - U_3) / (U_1 + U_3) \quad \text{и} \quad V = (U_2 - U_4) / (U_2 + U_4). \quad (1)$$

Благодаря оптимальной конфигурации обмоток и конструкции экрана датчика собственное магнитное поле парных обмоток можно считать дипольным [3]. Поэтому  $H$  и  $V$  будут линейно зависеть только от одной координаты  $X = a_x H$ ,  $Y = a_y V$ , где коэффициенты  $a_x$  и  $a_y$  определяются при калибровке. Для уменьшения влияния ВЧ-помех в (1) подставлялось интегральное значение первой половины  $T_{\text{int}}$  сигнала  $U$  с обмоток датчика.

На рис.2 представлена структурная схема одного канала контроля положения и величины тока пучка. Импульсы с обмоток датчиков, нагруженных непосредственно на линии связи, из бункера ускорителя поступают в пультовую на согласованный вход СПП, а затем на масштабирующие усилители ( $K_{yc} = 3$ , фронт до 0.1 мкс). Низкочастотная помеха подавляется с помощью трансформатора ИТ с незаземленной первичной обмоткой, а высокочастотная подавляется ФНЧ с частотой среза 2 МГц. С выходов усилителей сигналы поступают на вход КАС и далее в двухканальный 8-разрядный АЦП с динамическим диапазоном 2 В, буферным ОЗУ 256 байт и тактовой частотой 10 МГц.

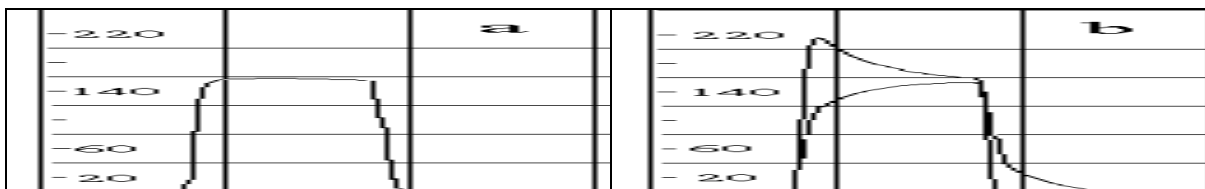


**Рис. 2.** Структурная схема канала контроля положения и величины тока пучка ЛУЭ. СПП – схема подавления помех; ИТ – разделительный импульсный трансформатор; ФНЧ – фильтр низших частот; КАС – коммутатор аналоговых сигналов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; КПВВ – контроллер портов входа-выхода; СИ – синхроимпульс ускорителя.

Перед установкой на ЛУЭ каждый датчик проходил калибровочные испытания на специальном стенде. Стенд состоит из имитатора тока пучка, метрической головки, позволяющей перемещать датчик по двум координатам с точностью установки 0.01 мм, и автоматизированного измерительного канала (см. рис 2).

## 2. Методика и результаты стендовых испытаний датчика

Для имитации пучка электронов нами использовались одна (рис. 4а) или две (рис. 4с, 4d) токопроводящие струны сечением 0.2 мм, натянутые перпендикулярно плоскости датчика. По струнам пропускались прямоугольные импульсы тока (рис. 3а) длительностью 4 мкс и амплитудой от 300 до 800 мА. В результате на противоположных обмотках датчика наблюдались наведенные сигналы (например, рис. 3б).



**Рис. 3.** Форма импульса тока в струне (а) и наведенных сигналов в обмотках датчика (б).

В качестве упрощенной математической модели нами использовалось известное выражение величины вектора магнитного поля линейного тока  $I$  [4]. Если угловые размеры сигнальной обмотки малы, а ток проходит вблизи начала координат ( $r \ll a$ ), то без учета постоянных множителей составляющая поля  $\vec{B}$  вдоль окружности радиуса  $a$  (рис. 4а) будет

$$\vec{B} \approx [\vec{I} \times \vec{a}] \frac{(1 - \frac{r\vec{a}}{a^2})}{(a - r)^2}, \quad \text{что эквивалентно} \quad B_\varphi \approx I \left( 1 + \frac{x \cos \varphi + y \sin \varphi}{a} + \frac{(x^2 - y^2) \cos 2\varphi + 2xy \sin 2\varphi}{a^2} \dots \right) \quad (2)$$

Определив значение  $B_\varphi$  для четырех точек окружности ( $\varphi = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ) и исходя из того, что величина  $U$  пропорциональна  $dB/dt$ , можно показать, что без учета в (2) малых членов ряда  $X \approx aH, Y \approx aV$ . А для пучка электронов (рис. 4б), когда  $\overline{x^2} = \bar{x}^2 + \sigma_x^2, \overline{y^2} = \bar{y}^2 + \sigma_y^2$ , получить известное [2] выражение, позволяющее оценивать второй момент сечения пучка,

$$Q = (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) = a_0 D - (\bar{x}^2 - \bar{y}^2) + q_0, \quad \text{где} \quad D = (U_1 + U_3 - U_2 - U_4) / \sum_1^4 U_i, \quad a_0 \approx a^2. \quad (3)$$

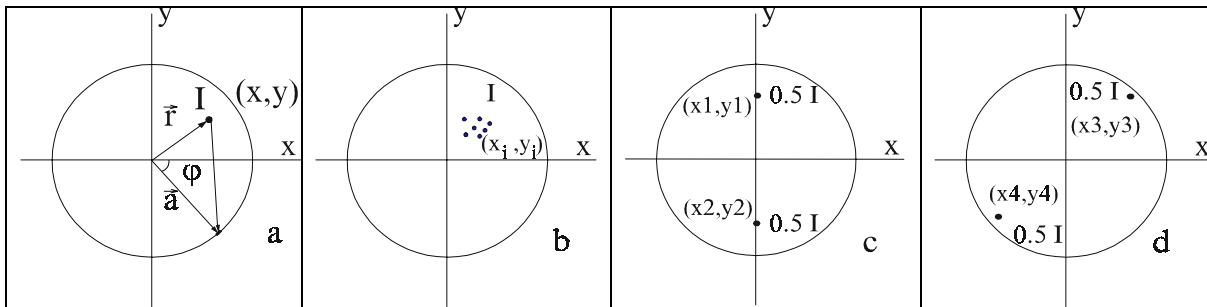


Рис. 4. Примеры расположения одной (а) или двух (с, d) струн, а также пучка электронов (b) в плоскости датчика.

Конечно, данная модель не учитывает ряд важных параметров (наличие ферритового кольца, угловой размер обмоток, взаимную индукцию обмоток и пр.). Однако она позволяет оценить порядок величин  $a_x$ ,  $a_y$ , и  $a_\sigma$ , показывает, что  $a_x^2 = a_y^2 \approx a_\sigma$ , и, что самое важное, показывает линейность функций  $H(X)$ ,  $V(Y)$ ,  $D(Q)$  в рабочей области датчика  $|r| < 0.5a$ .

Нами была предпринята попытка учесть в расчетах  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_\sigma$  вышеуказанные параметры (см. табл. 1) для тороидального сердечника с внутренним радиусом  $r_1$  и наружным  $r_2$ . Вариант А соответствует модели (2), когда угловой размер обмоток  $2\chi = 0$ , а радиус сердечника  $r_2 \rightarrow r_1 = a$ .

Таблица 1. Расчет  $a_x, a_y, a_\sigma$  моделей датчиков ( $r_1 = 30$  мм,  $r_2 = 50$  мм,  $2\chi = \pi/2$ ,  $T_{int} = 2$  мкс).

Вариант	Формула расчета $a_x = a_y$	Формула расчета $a_\sigma$	$a_x = a_y$ (мм)	$a_\sigma$ (мм <sup>2</sup> )
А	$r_1$	$(r_1)^2$	30	900
$\mu = 1, \kappa_{cb} = 0, 2\chi = 0, r_1 \neq r_2$	$\frac{r_1 \ln(r_2 / r_1)}{(r_2 - r_1) / r_2}$	$\frac{2 r_1^2 \ln(r_2 / r_1)}{(r_2^2 - r_1^2) / r_2^2}$	38	1440
$\mu = 1, \kappa_{cb} = 0, 2\chi \neq 0, r_1 \neq r_2$	$\frac{r_1 \ln(r_2 / r_1)}{((\sin \chi) / \chi) (r_2 - r_1) / r_2}$	$\frac{2 r_1^2 \ln(r_2 / r_1)}{((\sin 2\chi) / 2\chi) (r_2^2 - r_1^2) / r_2^2}$	42	2260
$\mu \gg 1, \kappa_{cb} \neq 0, 2\chi \neq 0, r_1 \neq r_2$	$\left(\frac{r_1 \pi}{4 \sin \chi}\right) \frac{T_{int} / T_1}{1 - \exp(-T_{int} / T_1)}$	$\left(\frac{r_1^2 \pi}{2 \sin 2\chi}\right) \frac{T_{int} / T_2}{1 - \exp(-T_{int} / T_2)}$	53 (33)	3260 (1410)

В нижней строке таблицы – результаты расчета датчиков ЛУЭ ЭПОС ( $T_1$  и  $T_2$  – постоянные спада вершин разностных сигналов при расчете  $a_x$  и  $a_\sigma$ ; в скобках – значения  $a_x$  и  $a_\sigma$ , рассчитанные по амплитудам сигналов). Точные значения коэффициентов определялись на стенде. Так для датчика ЛУЭ КУТ-20 ( $2\chi = \pi/3$ ), мы получили (рис.5)  $a_x = a_y = 68$  мм/ед.,  $a_\sigma = 4900$  мм<sup>2</sup>/ед.,  $q_0 = -6$  мм<sup>2</sup>. Для датчика ЛУЭ ЭПОС  $a_x = a_y = 50$  мм/ед.,  $a_\sigma = 2500$  мм<sup>2</sup>/ед.,  $q_0 = -8$  мм<sup>2</sup>. Погрешность оценки  $X$  и  $Y$  не более 3 %, погрешность оценки  $Q$ , соответственно, не менее 9 %.

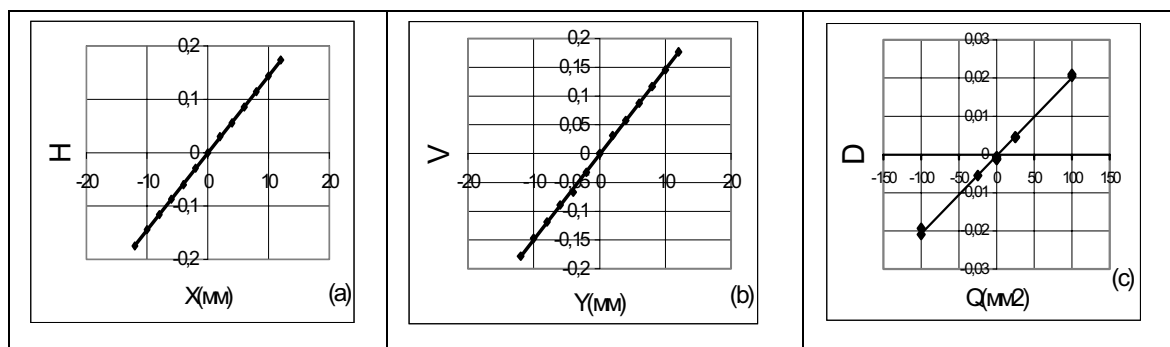


Рис. 5. Экспериментальные зависимости  $H(X)$ ,  $V(Y)$ ,  $D(Q)$  для датчика ЛУЭ КУТ-20.

### 3. Контроль параметров пучка ЛУЭ-«ЭПОС»

Автоматизированная система управления ЛУЭ «ЭПОС» [5] оснащена каналами контроля пространственных характеристик пучка. При работе сильноточных ЛУЭ на измерительные каналы воздействуют внешние помехи. В нашем случае наблюдаются в основном два типа помех. Это высокочастотные помехи, которыми промодулирована вершина импульса тока пучка (рис. 5а,б) и низкочастотные помехи, в основном от питающей сети, которые изменяют амплитуду сигналов от импульса к импульсу. Следует заметить, что кроме ВЧ-помех на форму вершины импульса тока оказывает влияние и пространственно-временная структура пучка, что также видно на рис. 5а. Для уменьшения влияния помех значения координат центра пучка  $X, Y$  и второго момента  $Q$  оцениваются по выборке из не менее 32 импульсов тока, а затем результаты усредняются.

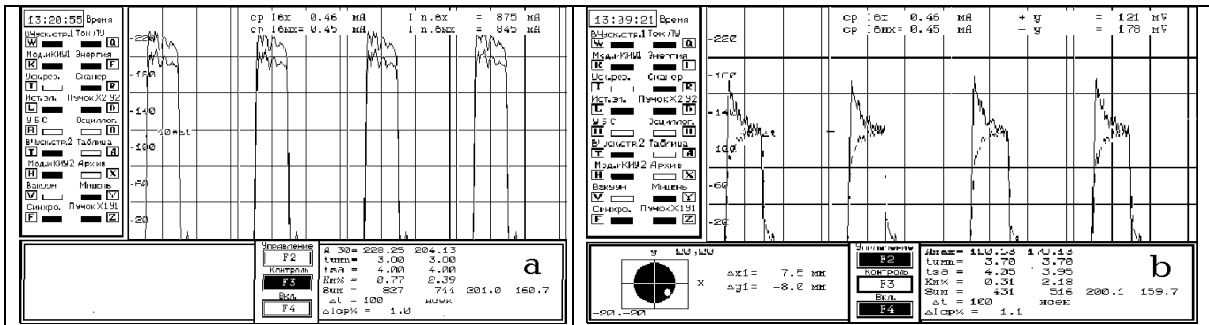


Рис. 6. Видеogramмы результатов контроля тока (а) и положения (б) пучка на экране дисплея оператора ЛУЭ.

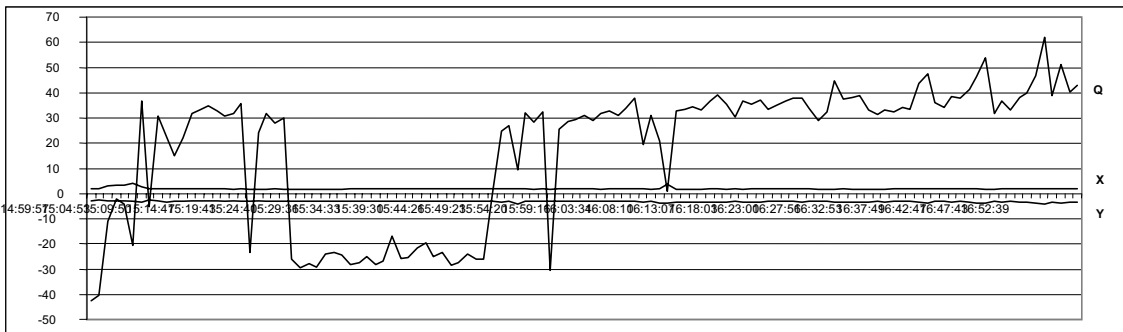


Рис. 7. Изменение во времени координат центра пучка ( $X, Y$  в мм) и величины второго момента  $Q = \sigma_x^2 - \sigma_y^2$  (в мм<sup>2</sup>) на выходе ускорителя ЭПОС (ток пучка  $I = 0.71$  А, энергия  $E = 22$  МэВ). Измерения проводились в течение двух часов с интервалом в одну минуту.

На рис. 7 приведены значения параметров пучка  $X, Y$  и  $Q$  на выходе ЛУЭ «ЭПОС», наблюдавшиеся в течение двух часов во время одного из сеансов работы. Описанные выше каналы и методики совместно с каналами контроля энергии [6] и положения пучка на мишени [7] обеспечивают эффективную работу сильноточных ЛУЭ.

В заключение авторы благодарят Ю.П. Степановского за ценные советы.

### Литература

1. В.Н.Борискин, В.А.Гурин, Л.В.Репринцев и др. Канал контроля положения пучка в сильноточном ЛУЭ. Труды совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1996, т.1, с.374-377.
2. S.J. Russell et al. Characterization Beam Position Monitors for Measurement of Second Moment, Proc. PAC95, p. 2580-2582.
3. Л.В.Репринцев. Об измерении параметров пучков заряженных частиц методом электромагнитной индукции. ВАНТ, серия ТФЭ. Вып. 2 (4). Харьков, ХФТИ, 1979, с. 36-37.
4. Д.Джексон. Классическая электродинамика. - Мир, 1965.
5. Ю.И.Акчури, В.Н.Борискин, Н.Н.Бахметьев и др. Система управления технологическим ЛУЭ. ВАНТ, серия ЯФИ, Вып.34, Харьков, 1999, с.55-57.
6. V.N.Boriskin, A.E.Tolstoy, V.L.Uvarov et al. Automatic Control of the Electron Energy in the Technological Linear Electron Accelerators/ Digest of the XIV Meeting on the Accelerated Particles, Protvino, Russia, 1994, vol.2, pp.97-98.
7. V.N.Boriskin, A.N.Savchenko, V.I.Tatanov. Monitoring of the Electron Beam Position in Industrial Linacs/Proc. PAC99, NY, 1999.