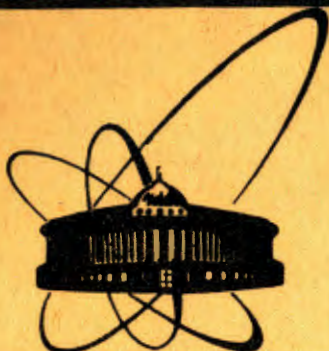


85-877



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P9-85-877

**В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов, В.А.Мельников,  
А.Д.Степанов**

**МАГНИТОИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК  
ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ  
ЗАРЯЖЕННОГО ПУЧКА  
ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 30-500 нс**

**1985**

Для определения положения "центра тяжести" тока пучка заряженных частиц чаще всего применяются различные не разрушающие пучок устройства. По типу взаимодействия с полем пучка их можно классифицировать как электроиндукционные преобразователи /ЭИП/, магнитоиндукционные /МИП/ и электромагнитоиндукционные /ЭМИП/. В каждом конкретном случае в зависимости от параметров пучка нужно выбрать тип преобразователя, оптимально удовлетворяющего требованиям по чувствительности ( $\kappa$ ), частотной полосе пропускания ( $\Delta f$ ), помехозащищенности и т.д. Например, в линейных ускорителях, где очень трудно избавиться от частиц, попадающих на пластины ЭИП, чаще всего применяют магнитоиндукционные датчики положения <sup>/1/</sup>, которые позволяют получить достаточную чувствительность  $\kappa \approx 1$  (В/А·см). Но частотная полоса пропускания их обычно невелика  $\leq 10$  МГц <sup>/2/</sup>, что позволяет измерять лишь усредненные по времени координаты центра тяжести тока пучка. Это явно недостаточно при изучении неустойчивости пучков, динамики мгновенных траекторий и т.д. С другой стороны, именно магнитоиндукционные преобразователи позволяют получить сопротивление нагрузки меньше или равным волновому сопротивлению линии передачи, и, значит, могут быть нагружены линией передачи без дополнительной электронной аппаратуры. Их можно хорошо экранировать от помехо-несущих электромагнитных полей и от попадания заряженных частиц. Все это приводит к необходимости разработки МИП с достаточно большой чувствительностью и частотной полосой пропускания. В работе <sup>/3/</sup> предложена конструкция четырехсекционного МИП с ферритовым кольцевым сердечником 200НН /250x170x25/ мм, помещенным в экран. Этот МИП имеет достаточную ширину полосы пропускания. Однако нами было установлено, что точность определения положения центра тяжести пучка с его помощью зависит от распределения обратных токов, протекающих по экрану. Например, в рабочих условиях может возникнуть асимметрия обратных токов из-за высадки пучка на экран МИП, способов заземления экрана, асимметрии внешних токов и т.д. В связи с этим в данной работе предлагается конструкция МИП, который в меньшей степени подвержен влиянию асимметрии протекающих по экрану токов. Этот МИП используется для измерения мгновенных координат и временной структуры пучка линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 <sup>/4/</sup>.

На рис.1 показана схема устройства предлагаемого МИП. Он представляет собой две пары катушек, намотанных на сердечники, образующие тороид прямоугольного сечения. Одной парой сердечников служили укороченные четверти ферритовых колец 300НН /180x110x 20/ мм, а другой - плексигласовых колец таких же размеров. Для

Соответственно,  $r_{и,ф} = 2,4 \cdot 10^{-6}$  с;  $r_{и,п} = 0,88 \cdot 10^{-6}$  с. Калибровка величины чувствительности МИП, проверка линейности величины отношения разности сигналов с катушек к их сумме и исследование влияния распределения обратных токов на величину ошибки определения координат пучка производились на стенде, обеспечивающем точность установки нити с током, имитирующей пучок,  $\pm 0,5$  мм. Амплитуда сигнала с катушки измерялась с помощью преобразователя напряжения с точностью  $\pm 2\%$ , а временная структура сигнала - широкополосным осциллографом. Измеренная величина  $k$  составляла  $\approx 0,017$  В/А·см, что с учетом коэффициента деления  $/k_d = 2/$  делителя, образованного шунтирующими сопротивлениями и сопротивлением нагрузки, хорошо согласуется с расчетной величиной. Величина  $k$  при смещениях нити в пределах  $\pm 30$  мм не зависит от координаты  $/r/$ . Однако величина  $k$  зависит от угла поворота МИП ( $\alpha$ ) /см.рис.1/, что приводит к увеличению ошибки измерения величины смещения  $r$  нити /пучка/. Зависимость величины ошибки ( $\Delta r/r$ ), связанной только с поворотом МИП, от величины  $\alpha$  приведена на рис.2, откуда видно, что максимальная ошибка  $\pm 7\%$  соответствует  $\alpha = 45^\circ$ , т.е. расположению нити напротив краев катушек. Исследование влияния обратных токов на величину ошибки измерения координаты нити с током проводилось путем изменения азимута точки соединения одного из четырех проводников обратного тока с наружным экраном МИП. При  $r = 20$  мм получили  $\Delta r/r = 0,20$  для предлагаемого МИП и  $\Delta r/r = 0,65$  - для МИП, описанного в работе <sup>/3/</sup>.

Исследование частотных характеристик МИП производилось измерителями амплитудно-частотных характеристик и комплексных коэффициентов передач. Измерения показали наличие резонансных частот. У ячеек без экранов с ферритовым и плексигласовым сердечником нижние резонансы наблюдались на частотах 2,5 МГц и 9,4 МГц соответственно. Эти резонансы были ликвидированы введением шунтирующих сопротивлений. Измерения частотной зависимости комплексного коэффициента передачи полностью собранных ячеек МИП в диапазоне /0-300/ МГц показали, что неравномерность частотной характеристики в диапазоне /0-150/ МГц составила 5 дБ для ячейки с ферритом и 3 дБ для ячейки с плексигласовым сердечником. Для МИП, приведенного в работе <sup>/3/</sup>, неравномерность 5 дБ соответствует диапазону /0-100/ МГц. На более высоких частотах резонансы имеются в обоих МИП. Можно предположить, что они связаны с наличием несогласованной линии "витки-экран". Поскольку указанная линия дисперсионная, то согласовать ее сложно, а добавление шунтирующих сопротивлений приводит к уменьшению чувствительности МИП. Таким образом, получена частотная полоса пропускания МИП /0-150/ МГц с неравномерностью коэффициента передачи 5 дБ, что позволяет определять не только усредненное по времени положение центра тяжести тока пучка, но и исследовать временную структуру пучка.

Калибровка МИП на пучке проводилась в эксплуатационном режиме работы линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 при токе

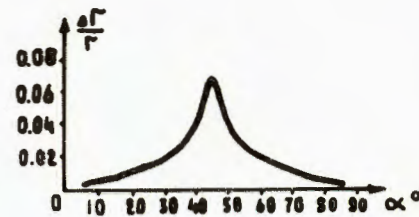
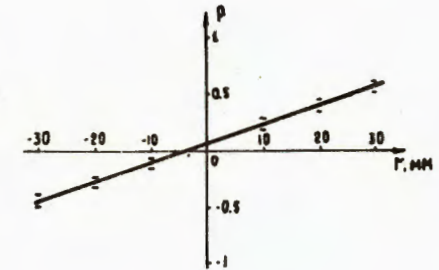


Рис.3. Зависимость отношения  $/P/$  разности напряжений на сопротивлениях нагрузки катушек МИП с ферритовыми сердечниками к сумме этих напряжений от величины смещения МИП по радиусу ( $r$ ) при  $\alpha = 0^\circ$  /см.рис.1/.

Рис.2. Ошибка ( $\Delta r/r$ ) - определения координаты нити с током в зависимости от угла поворота МИП. /При  $r = 20$  мм/.



$I \geq 100$  А и длительности импульса  $\Delta t_{и} = 300$  нс. Механизм перемещения обеспечил возможность установки координат МИП с точностью  $\pm 0,5$  мм относительно оси электропровода. На рис.3 представлена калибровочная прямая зависимости величины ( $P$ ) - отношения разности сигналов с противоположных катушек к сумме этих сигналов - от величины смещения МИП. Из рис.3 видно, что линейность величины ( $P$ ) в пределах  $\pm 30$  мм сохраняется. Несовпадение оси пучка с геометрической осью датчика связано с тем, что в месте измерения пучок смещен от оси электропровода. Вычисляя коэффициент наклона калибровочной прямой, получаем следующую зависимость смещения  $r$  от величин сигналов с катушек датчика:

$$r = 60 (P \pm \sigma) \quad [ \text{мм} ], \quad /6/$$

где  $\sigma$  - ошибка, связанная не только с точностью используемой измерительной аппаратуры, но и с разбросом параметров пучка от импульса к импульсу. Величина ошибки  $\sigma$  составляла  $\approx 0,01$  в измерениях на стенде и  $0,03-0,05$  в измерениях на пучке. Следует отметить, что в пределах достигнутой точности измерений коэффициенты наклона калибровочных прямых, снятых на электронном пучке и на стенде с токовой нитью, совпадают.

Сигналы с катушек МИП измерялись с помощью преобразователей напряжения, в которых в момент времени, определяемый действием стробирующего импульса с длительностью около 4 нс, осуществляется преобразование мгновенного значения напряжения однократных сигналов в напряжение постоянного тока с последующим преобразованием в цифровой код. Используемый нами преобразователь напряжения может работать на линии связи с ЭВМ, что существенно облегчает обработку результатов измерения. Широкополосность МИП и преобразователя позволили измерять не только усредненные зна-

Соответственно,  $r_{и.ф} = 2,4 \cdot 10^{-6}$  с;  $r_{и.п} = 0,88 \cdot 10^{-6}$  с. Калибровка величины чувствительности МИП, проверка линейности величины отношения разности сигналов с катушек к их сумме и исследование влияния распределения обратных токов на величину ошибки определения координат пучка производились на стенде, обеспечивающем точность установки нити с током, имитирующей пучок,  $\pm 0,5$  мм. Амплитуда сигнала с катушки измерялась с помощью преобразователя напряжения с точностью  $\pm 2\%$ , а временная структура сигнала - широкополосным осциллографом. Измеренная величина  $k$  составляла  $\approx 0,017$  В/А·см, что с учетом коэффициента деления  $/k_d = 2/$  делителя, образованного шунтирующими сопротивлениями и сопротивлением нагрузки, хорошо согласуется с расчетной величиной. Величина  $k$  при смещениях нити в пределах  $\pm 30$  мм не зависит от координаты  $/r/$ . Однако величина  $k$  зависит от угла поворота МИП ( $\alpha$ ) /см.рис.1/, что приводит к увеличению ошибки измерения величины смещения  $r$  нити /пучка/. Зависимость величины ошибки ( $\Delta r/r$ ), связанной только с поворотом МИП, от величины  $\alpha$  приведена на рис.2, откуда видно, что максимальная ошибка  $\pm 7\%$  соответствует  $\alpha = 45^\circ$ , т.е. расположению нити напротив краев катушек. Исследование влияния обратных токов на величину ошибки измерения координаты нити с током проводилось путем изменения азимута точки соединения одного из четырех проводников обратного тока с наружным экраном МИП. При  $r = 20$  мм получили  $\Delta r/r = 0,20$  для предлагаемого МИП и  $\Delta r/r = 0,65$  - для МИП, описанного в работе <sup>/3/</sup>.

Исследование частотных характеристик МИП производилось измерителями амплитудно-частотных характеристик и комплексных коэффициентов передач. Измерения показали наличие резонансных частот. У ячеек без экранов с ферритовым и плексигласовым сердечником нижние резонансы наблюдались на частотах 2,5 МГц и 9,4 МГц соответственно. Эти резонансы были ликвидированы введением шунтирующих сопротивлений. Измерения частотной зависимости комплексного коэффициента передачи полностью собранных ячеек МИП в диапазоне /0-300/ МГц показали, что неравномерность частотной характеристики в диапазоне /0-150/ МГц составила 5 дБ для ячейки с ферритом и 3 дБ для ячейки с плексигласовым сердечником. Для МИП, приведенного в работе <sup>/3/</sup>, неравномерность 5 дБ соответствует диапазону /0-100/ МГц. На более высоких частотах резонансы имеются в обоих МИП. Можно предположить, что они связаны с наличием несогласованной линии "витки-экран". Поскольку указанная линия дисперсионная, то согласовать ее сложно, а добавление шунтирующих сопротивлений приводит к уменьшению чувствительности МИП. Таким образом, получена частотная полоса пропускания МИП /0-150/ МГц с неравномерностью коэффициента передачи 5 дБ, что позволяет определять не только усредненное по времени положение центра тяжести тока пучка, но и исследовать временную структуру пучка.

Калибровка МИП на пучке проводилась в эксплуатационном режиме работы линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 при токе

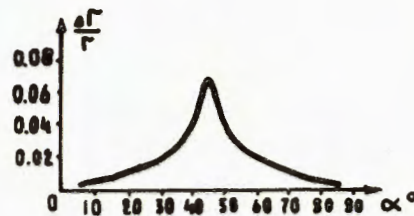
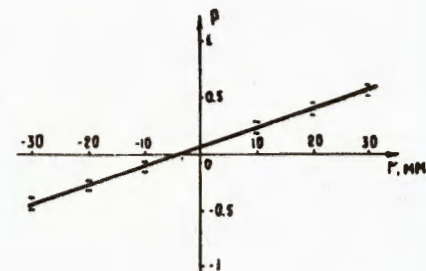


Рис.2. Ошибка ( $\Delta r/r$ ) - определенная координаты нити с током в зависимости от угла поворота МИП. /При  $r = 20$  мм/.

Рис.3. Зависимость отношения  $/P/$  разности напряжений на сопротивлениях нагрузки катушек МИП с ферритовыми сердечниками к сумме этих напряжений от величины смещения МИП по радиусу ( $r$ ) при  $\alpha = 0^\circ$  /см.рис.1/.



$I \geq 100$  А и длительности импульса  $\Delta t_{и} = 300$  нс. Механизм перемещения обеспечил возможность установки координат МИП с точностью  $\pm 0,5$  мм относительно оси электропровода. На рис.3 представлена калибровочная прямая зависимости величины ( $P$ ) - отношения разности сигналов с противоположных катушек к сумме этих сигналов - от величины смещения МИП. Из рис.3 видно, что линейность величины ( $P$ ) в пределах  $\pm 30$  мм сохраняется. Несовпадение оси пучка с геометрической осью датчика связано с тем, что в месте измерения пучок смещен от оси электропровода. Вычисляя коэффициент наклона калибровочной прямой, получаем следующую зависимость смещения  $r$  от величин сигналов с катушек датчика:

$$r = 60 (P \pm \sigma) \quad [ \text{мм} ], \quad /6/$$

где  $\sigma$  - ошибка, связанная не только с точностью используемой измерительной аппаратуры, но и с разбросом параметров пучка от импульса к импульсу. Величина ошибки  $\sigma$  составляла  $\approx 0,01$  в измерениях на стенде и  $0,03-0,05$  в измерениях на пучке. Следует отметить, что в пределах достигнутой точности измерения коэффициенты наклона калибровочных прямых, снятых на электронном пучке и на стенде с токовой нитью, совпадают.

Сигналы с катушек МИП измерялись с помощью преобразователей напряжения, в которых в момент времени, определяемый действием стробирующего импульса с длительностью около 4 нс, осуществляется преобразование мгновенного значения напряжения однократных сигналов в напряжение постоянного тока с последующим преобразованием в цифровой код. Используемый нами преобразователь напряжения может работать на линии связи с ЭВМ, что существенно облегчает обработку результатов измерения. Широкополосность МИП и преобразователя позволили измерять не только усредненные зна-

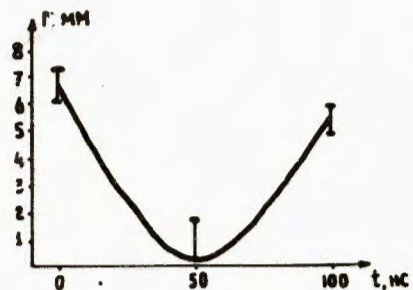


Рис.4. Положение центра тяжести пучка в различные моменты времени на плато импульса тока частиц.

чения координат центра тяжести тока пучка, но и их значения в различные моменты времени. На рис.4 приведены положения центра тяжести электронного пучка в различные моменты времени на плато импульса тока частиц. Хо-

тя величина тока пучка в течение 100 нс практически неизменна, положение пучка в пространстве меняется, что указывает на наличие колебаний центра тяжести пучка во времени.

Величина и характер этих колебаний зависят от настройки пучка. При некоторых настройках или при сильной коллимации пучка /при проводке вдоль длинной трубы с размером поперечного сечения, совпадающим с размером пучка/ колебания его центра тяжести во времени не наблюдались.

Таким образом, предложенный МИП с вышеуказанной измерительной аппаратурой позволяет определять положение центра тяжести пучков с током /1-500/ А длительностью  $\Delta t_{и} \leq 0,8$  мкс при сердечниках из феррита 300 НН, длительностью  $\Delta t_{и} \leq 0,3$  мкс при сердечниках из немагнитного материала. Величина тока пучка во втором случае ограничена лишь электрической прочностью конструкции МИП. Частотная полоса пропускания обеспечивает временную разрешающую способность  $\leq 5$  нс, что дает возможность измерять как усредненные по времени значения координат центра тяжести пучка, так и мгновенные значения в пределах длительности импульса тока частиц. Это позволяет исследовать дополнительные характеристики временной структуры пучка. Повышенная помехозащищенность разработанного МИП и относительно слабая чувствительность к асимметрии внешних токов, достигнутые в результате двойного экранирования и уменьшения связи между секциями, позволяют использовать этот МИП при работе в условиях импульсных помех и статических наводок.

В заключение авторы выражают свою признательность Э.М.Глейбману и Т.В.Рукояткиной за помощь в организации обработки результатов на линии с ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гришаев И.А. и др. ПТЭ, 1960, 4, с.17.
2. Holcomb L. Nucl. Instr. and Meth., 1963, 24, p.399.
3. Евдокимов Н.М. и др. ОИЯИ, 13-82-221, Дубна, 1982.
4. Буланов В.А. и др. В кн: Труды VI Всесоюзного совещания по

- ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1979, т.2, с.54.
5. Мизюк Л.Я. Входные преобразователи для измерения напряженности низкочастотных магнитных полей. "Наукова думка", Киев, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 декабря 1985 года.