

СЗ45е2

В-63

13/8-63

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

10 - 4600



М.А.Воеводин

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИЗМЕРЕНИЕ ИОННОГО ТОКА  
МАГНИТОИНДУКЦИОННЫМИ ДАТЧИКАМИ  
НА УЧАСТКЕ ИНЖЕКЦИИ СИНХРОФАЗОТРОНА

1969

10 - 4600

М. А. Воеводин

ИЗМЕРЕНИЕ ИОННОГО ТОКА  
МАГНИТОИНДУКЦИОННЫМИ ДАТЧИКАМИ  
НА УЧАСТКЕ ИНЖЕКЦИИ СИНХРОФАЗОТРОНА

8003/2 чр

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## 1. В в е д е н и е

Основным измерительным инструментом для определения величины и формы импульсного пучка заряженных частиц на участке инжекции является цилиндр Фарадея.

Цилиндр Фарадея прост в изготовлении, надежен в работе и обеспечивает высокую точность измерения, но он относится к числу непрозрачных датчиков, так как для снятия информации приходится полностью перекрывать пучок и использовать все частицы для измерения тока. Кроме того, на энергиях 10 МэВ и выше цилиндр Фарадея активизируется, доставляя определенные трудности при его обслуживании.

В период пуско-наладочных работ и особенно в период эксплуатации ускорителей, когда необходимо контролировать параметры пучка, не нарушая режима ускорения, кроме цилиндров Фарадея, желательно использовать так называемые прозрачные датчики, которые не вносили бы изменений ни в интенсивность ускоренного пучка, ни в его угловые характеристики.

К прозрачным датчикам в области низких энергий относятся индукционные измерители, использующие принцип наведенного заряда на внутреннем электроде или наведенной э.д.с. в обмотке магнитного пояса (пояса Роговского).

Применение индукционных датчиков на участке инжекции синхротрона имеет некоторые характерные особенности:

1. Низкие энергии пучка заряженных частиц.

2. Однократное взаимодействие сгустка заряженных частиц с датчиком за цикл ускорения.

3. Небольшие размеры ионопровода.

4. Наличие в зоне расположения датчиков мощных источников импульсных и высокочастотных помех.

К числу таких источников помех следует отнести:

1. Резонатор линейного ускорителя.

2. Высокочастотный генератор, возбуждающий резонатор.

3. Импульсный модулятор.

Влияние помех на измерительное устройство, состоящее из датчика, усилителя и индикатора, увеличивается из-за того, что длительность импульсной помехи та же, что и длительность измеряемого импульса пучка заряженных частиц, а время воздействия на измерительную систему совпадает с моментом снятия с датчика полезной информации. Поэтому датчик и усилительное устройство необходимо тщательно экранировать и удалять по мере возможности от источников внешних помех.

Применение магнитоиндукционных датчиков (МИД) на инжектируемом участке имеет некоторые преимущества перед использованием в тех же целях электростатических датчиков (ЭСД), а именно:

1. Чувствительность МИД не зависит от емкости в цепи нагрузки. Это обстоятельство позволяет удалить усилительное устройство на значительное расстояние от датчика, который располагается в непосредственной близости от источников помех, и тем самым существенно ослабить уровень внешних помех на входе индикаторного устройства.

2. Измерительную обмотку МИД легко защитить от возбужденных ионов, в то время как защита внутреннего электрода ЭСД представляет большие трудности.

Известно, что внутренний электрод ЭСД на инжектируемом участке, когда энергия ускоренных протонов еще мала, подвергается постоянной бомбардировке возбужденными ионами, возникающими из-за соударений ускоренных частиц с молекулами остаточного газа. В результате появляется помеха, которая может не только внести погрешность в измерение параметров ускоренного сгустка, но и полностью поглотить напряжение сигнала, снимаемого с электростатического датчика.

Рассмотрим на примере допуски на величину рассеиваемого заряда для конкретного случая измерения ЭС датчиком инжектируемого пучка протонов на ускорителе 10 Гэв Лаборатории высоких энергий.

Исходные данные

Энергия инъекции	$W_{и} = 9,4 \text{ МэВ}$
Энергия форинжектора	$W_{ф.и.} = 570 \text{ кэВ}$
Длительность инжектируемого сгустка заряженных частиц	$T_{и.} = 450 \text{ мксек.}$
Протяженность сгустка инжектируемых частиц	$Z$

$$Z = T_{и} \sqrt{\frac{2W}{m}},$$

где  $m$  - масса ускоряемых частиц.

Для инжектора величина  $Z$  составит  $\approx 20000$  м, для форинжектора - 5300 м.

Напряжение на внутреннем электроде электростатического датчика

$$U = \frac{q}{C} = \frac{Q\ell}{LC},$$

где  $C$  - емкость внутреннего электрода на землю,  $\ell$  - длина электрода,  $Q$  - заряд ускоряемого сгустка протонов. Если предположить, что часть заряда  $\xi Q$  попадает на внутренний электрод ЭСД, то напряжение шумов  $U_{ш}$  определится следующим образом:

$$U_{ш} = \frac{\xi Q}{C}.$$

Индикаторные устройства хорошо работают при отношении сигнал/шум свыше 10. Если учесть это условие, тогда требование к коэффициенту потерь должно быть такое:

$$\xi \leq \frac{\ell}{10Z}.$$

Примем  $\ell = 50$  см, тогда коэффициент потерь  $\xi$  должен быть:

$$\text{для инжектора} \quad \approx 0,25 \cdot 10^{-5}, \quad (а)$$

$$\text{для форинжектора} \quad \approx 0,945 \cdot 10^{-5}. \quad (б)$$



Совершенно очевидно, что выполнить условия (а) и (б) на участке с малыми энергиями ускоряемых протонов, когда еще велики потери от рассеяния на остаточном газе, невозможно. Кроме того, величина  $U_{ш}$  приблизительно пропорциональна сумме величин зарядов и имеет максимальную величину к концу измеряемого импульса. Спад же этого напряжения происходит с постоянной времени  $\tau_{и}$ , превышающей в десятки раз длительность импульса  $T_{и}$ . В результате на экране осциллографа вместо заднего фронта будет виден процесс стекания заряда с внутреннего электрода с большой постоянной времени  $\tau_{и}$ .

К преимуществам магнитоиндукционных датчиков следует также отнести небольшие размеры, что позволят располагать их в таких труднодоступных местах, как вход резонатора линейного ускорителя, или внутри трубок дрейфа.

Кроме того, магнитоиндукционные датчики легко калибровать, калибровку можно осуществить при необходимости на рабочем участке.

Говоря о преимуществах магнитоиндукционных датчиков, следует отметить и их недостатки:

1. Чувствительность к внешним магнитным полям.
2. Небольшую величину выходного сигнала.

## 2. Магнитоиндукционные датчики

С некоторым допущением магнитоиндукционный датчик можно рассматривать как разновидность импульсного трансформатора, первичной обмоткой которого является проходящий пучок заряженных частиц.

Схема МИД представлена на рис. 1,

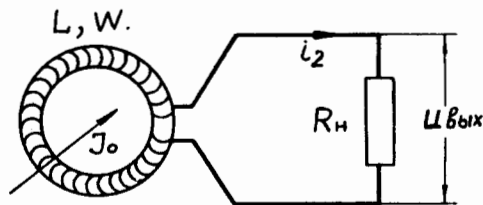


Рис.1

где  $w$ ,  $L$  - число витков и индуктивность измерительной обмотки датчика,  $R_H$  - активное сопротивление нагрузки. На основании принципа "взаимности взаимной индукции" /5/ связь в измерительном поясе между первичной стороной (пучком) и вторичной (измерительной обмоткой) следует считать жесткой, т.е. коэффициент связи  $K=1$ . Выходное напряжение измерительного пояса будет определяться выражением

$$U_{\text{вых}} = i_2 R_H = M \frac{dJ_0}{dt} - L \frac{di_2}{dt}, \quad (1)$$

где  $M$  - коэффициент взаимной индукции и для случая, когда

$$k = 1, \quad M = \frac{L}{w}. \quad (2)$$

Уравнению (1) соответствует электрическая цепь, представленная на рис.2.

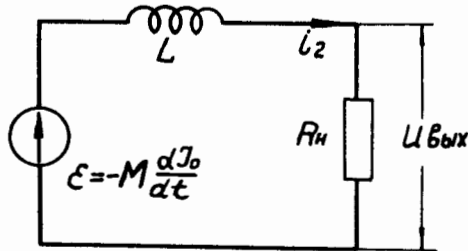


Рис.2

Различают две схемы магнитоиндукционных датчиков. Если в схеме рис. 2 выполняется условие

$$i_2 R_H \gg L \frac{di_2}{dt}, \quad (3)$$

то с известной точностью можно утверждать, что ток  $i_2$  не только по величине, но и по форме будет соответствовать источнику напряжения, т.е. величине  $-M \frac{dJ_0}{dt}$ . Напряжение  $U_{\text{вых}}$  достаточно проинтегрировать, чтобы получить сигнал, по форме и величине соответствующий измеряемому току  $J_0$ . При этом постоянная времени интегрирования  $\tau_{\text{и}}$  должна удовлетворять условию

$$\tau_{\text{и}} \gg T_{\text{и}}.$$

Для увеличения порога чувствительности измерительного пояса операцию интегрирования следует производить после предварительного усиления сигнала, снимаемого с датчика. Магнитондукционные пояса, удовлетворяющие условию (3), называются "дифференцирующими поясами".

Если в схеме рис. 2 выполняется условие

$$L \frac{di_2}{dt} \gg i_2 R_{\text{н}}, \quad (4)$$

то напряжение  $U_{\text{вых}}$  будет соответствовать по форме и величине измеряемому току  $J_0$ . Операция интегрирования выполняется на самом измерительном поясе. Для хорошего воспроизведения плоской части измеряемого импульса должно выполняться условие

$$\tau_{\text{и}} = \frac{L}{R_{\text{н}}} \gg T_{\text{и}}.$$

Измерительные пояса, удовлетворяющие условию (4), известны под названием "интегрирующих поясов". Сравнение двух схем включения магнитондукционных поясов <sup>/1/</sup> показывает, что при одинаковых параметрах поясов, т.е. когда  $w_{\text{д.п.}} = w_{\text{и.п.}}$ ;  $L_{\text{д.п.}} = L_{\text{и.п.}}$  и  $\tau_{\text{д.п.}} = \tau_{\text{и.п.}}$ , чувствительность их одинакова, а частотные свойства интегрирующего пояса несколько лучше, чем дифференцирующего.

### 3. Интегрирующий пояс

Эквивалентная схема измерительного магнитного пояса с учетом емкостной составляющей сопротивления нагрузки представлена на рис.3.



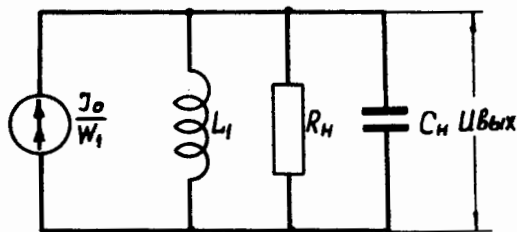


Рис.3

Выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  такой цепи определяется решением однородного дифференциального уравнения /4/

$$\frac{d^2 U_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + \frac{1}{R_H C_H} \frac{d U_{\text{ВЫХ}}}{dt} + \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{L C_H} = 0. \quad (5)$$

Если учесть требования, которым удовлетворяет интегрирующий пояс, а именно:

$$\tau_{\text{и}} = \frac{L}{R_H} \gg T_{\text{и}} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{1}{2R_H} \sqrt{\frac{L}{C_H}} \gg 1,$$

то решение уравнения (5) примет следующий вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{max}} \left( e^{-\frac{R_H}{L} t} - e^{-\frac{1}{R_H C_H} t} \right), \quad (6)$$

где

$$U_{\text{max}} = \frac{J_0 R_H}{W}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) видно, что влияние сопротивления нагрузки  $R_H$  на показатели магнитоиндукционного датчика имеет двойственный характер. С одной стороны, для увеличения постоянной времени интегрирования, т.е. улучшения плоской вершины импульса, а также уменьшения длительности

фронта сопротивление нагрузки следует уменьшать. С другой стороны, уменьшение  $R_H$  приводит к уменьшению амплитуды выходного сигнала. Зависимость между выходным напряжением и числом витков обратно пропорциональна. Но с увеличением  $w$  увеличивается постоянная времени интегрирования. Выражение (7) с учетом (2) легко преобразовать к следующему виду:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{\sigma J_0 w}{r} . \quad (8)$$

Здесь  $\sigma = 0,2 \cdot 10^{-8} \mu \frac{s}{r}$ ,  $\mu$ ,  $s$ ,  $r$  — магнитная проницаемость, поперечное сечение и средний радиус магнитопровода. Из последнего выражения видно, что при  $r_H = \text{const}$  с увеличением  $w$  напряжение, снимаемое с датчика, увеличивается, но это увеличение может быть эффективным только в том случае, если сопротивление нагрузки  $R_H$  значительно больше собственного сопротивления измерительной обмотки.

Величина емкости  $C_H$  может достигать величин порядка 2000 пф и определяется емкостью длинного кабеля, связывающего измерительный пояс с усилительным устройством. Из-за наличия больших помех со стороны установок, обслуживающих линейный ускоритель, усилительные устройства на инжектируемом участке приходится удалять на значительное расстояние от датчика.

Сопротивление  $R_H$  интегрирующего пояса с постоянной времени  $r_H \geq 5 \cdot 10^{-3}$  сек обычно не превышает 500 ом, при этом увеличение переднего фронта из-за наличия цепи  $R_H C_H$  составит всего лишь 3-5 мксек и частотные свойства измерительного устройства будут определяться в основном частотной характеристикой усилителя.

Следовательно, введение сравнительно большой емкости  $C_H$  не ухудшает характеристик датчика и не снижает величины выходного напряжения, что является большим преимуществом магнитоиндукционного датчика с интегрирующим поясом.

Уравнение (8), определяющее зависимость выходного напряжения от числа витков, написано в предположении, что постоянная времени интегрирования определяется в виде  $r_H = \frac{L}{R_H}$ , т.е. без учета собственного

сопротивления измерительной обмотки. Однако при измерении протяженных импульсов длительностью в 300 мксек и больше сопротивление нагрузки может оказаться соизмеримо собственному сопротивлению измерительной обмотки, а в некоторых случаях даже меньше него. Такое соотношение сопротивлений приводит к уменьшению  $\tau_{и}$  или уменьшению  $U_{\text{вых}}$ . Поэтому определение числа витков, диаметра намоточного провода и сопротивления нагрузки в интегрирующем поясе для протяженных импульсов имеет оптимальное решение.

#### 4. Расчет интегрирующего пояса

Обычно измерительный магнитный пояс представляет собой тороидальный магнитопровод, поверх которого нанесена измерительная обмотка. Необходимая величина индуктивности, которая обеспечила бы заданное значение  $\tau_{и}$ , определяется в виде

$$L = \tau_{и} (R_{н} + r_{вн}), \quad (9)$$

где  $r_{вн}$  - собственное сопротивление измерительной обмотки,

$$r_{вн} = \frac{8\rho (b+h)w}{\pi d^2}. \quad (10)$$

Выходное напряжение с учетом (2), (7), (9) и (10)

$$U_{\text{вых}} = \frac{\sigma J_0 R_{н}}{\tau_{и} \left[ \frac{R_{н}}{w} + \frac{8\rho (b+h)}{\pi d^2} \right]}, \quad (11)$$

где  $\rho$  и  $d$  - удельное сопротивление и диаметр намоточного провода,  $h$  и  $b$  - длина и полуразность двух диаметров тороидального магнитопровода.

Из (11) следует, что с увеличением числа витков увеличивается выходное напряжение, но это увеличение имеет ограниченный характер. Кроме того, чрезмерное увеличение  $w$  ведет к увеличению размеров

датчика и индуктивности рассеяния. Увеличение последней может привести к возникновению паразитных колебаний на плоской части измерительного импульса.

Для уменьшения индуктивности рассеяния измерительную обмотку наносят на магнитопровод в один слой, а для увеличения постоянной времени интегрирования используют всю площадь магнитопровода, т.е. намотку производят плотно, виток к витку. При этом

$$w = \frac{\pi D}{d}, \quad (12)$$

где  $D$  – внутренний диаметр тороидального магнитопровода. Постоянная времени  $\tau_{и}$  с учетом (9) и (12) определится так:

$$\tau_{и} = \frac{\sigma w^2 \pi^3 D^2}{R_{н} \pi^3 D^2 + 8 \rho w^3 (\bar{b} + \bar{h})}. \quad (13)$$

Графическая зависимость  $\tau_{и} = f_1(w)$  для ферритового кольца с  $\mu = 800$ ,  $D_{внеш} = 120$  мм и  $D_{вн} = 85$  мм и различных значений  $R_{н}$  представлена на рис. 4. Напряжение на выходе датчика равно

$$U_{вых} = \frac{\sigma J_0 R_{н} \pi^3 D^2 w}{\tau_{и} [R_{н} \pi^3 D^2 + 8 \rho w^3 (b+h)]}. \quad (14)$$

Графическая зависимость  $U_{вых} = f_2(w)$  аналогична зависимости, представленной на рис. 4, и максимальная величина выходного напряжения будет соответствовать  $w_{opt}$

$$w_{opt} = \pi \sqrt[3]{\frac{R_{н} D^2}{16 \rho (b+h)}}. \quad (15)$$

Постоянная интегрирования  $\tau_{и}$  с учетом (15)

$$\tau_{и} = \frac{\sigma \pi}{6} \sqrt[3]{\frac{D^4}{4 \rho^2 (b+h)^2 R_{н}}}. \quad (16)$$

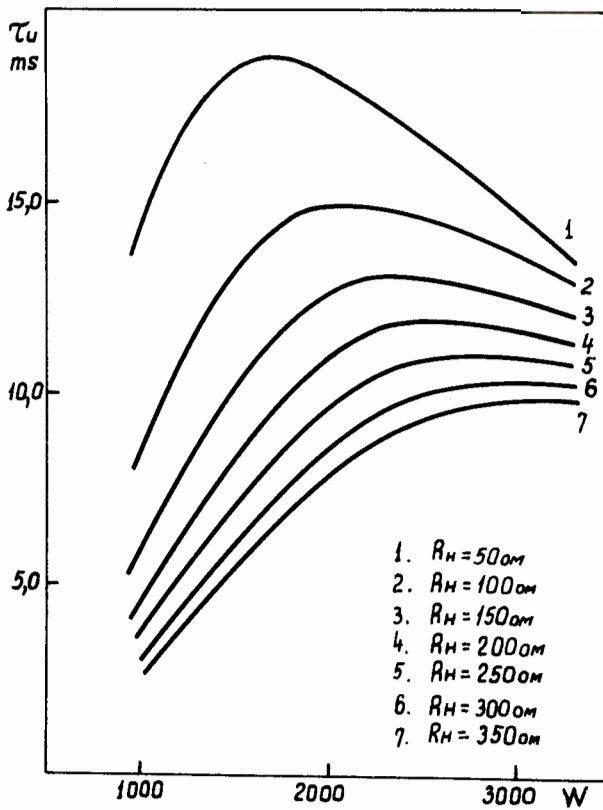


Рис.4

является величиной известной или определяется из условия

$$\tau_{и} \geq \frac{\tau_{и}}{\lambda} \cdot 100, \quad (17)$$

где  $\lambda$  – допустимая величина скалывания плоской части импульса (в %).  
Уравнение (16) используем для определения оптимальной величины сопротивления нагрузки:

$$R_{н\text{opt}} = \frac{1}{6} \left( \frac{\sigma}{\tau_{и}} \right)^3 \left[ \frac{\pi D^2}{12 \rho (b+h)} \right]^2. \quad (18)$$

Максимальное выходное напряжение с датчика, с учетом выражения (7), будет равно:

$$U_{\text{ВЫХ}}^m = \frac{J_0 R_{н\text{opt}}}{W_{\text{opt}}}. \quad (19)$$

### З а к л ю ч е н и е

В настоящее время на участке инжекции синхрофазотрона на 10 Гэв используются три магнитоиндукционных интегрирующих измерительных пояса. Они позволяют без перекрытия пучка вести наблюдение за величиной и формой инжектируемого пучка в 3-х различных точках:

- а) на выходе форинжектора,
- б) на входе резонатора линейного ускорителя,
- в) на входе поворотных пластин.

Отличительной чертой магнитоиндукционных датчиков является высокая надежность в работе, т.к. отсутствуют подвижные детали, и небольшие размеры. Они с успехом работают как в атмосфере, так и в вакууме и могут не только дублировать цилиндры Фарадея, но и позволяют наблюдать пучок в таких местах, где применение цилиндра Фарадея по ряду причин просто невозможно. Так, например, внутри вакуумного кожуха на входе первой полутрубки дрейфа (вход резонатора) до сих пор не удавалось



вести наблюдение за проходящим током с помощью цилиндра Фарадея. Лишь применение магнитоиндукционного датчика позволило решить эту задачу.

Используя обычные недорогостоящие ферритовые кольца, можно изготавливать магнитные датчики, позволяющие с помощью электронной аппаратуры наблюдать проходящий ток величиной в несколько мка при длительности импульса  $T_{и} = 500$  мсек.

Так, с помощью датчика, измеряющего ток в 1 ма (на входе поворотных пластин), была достигнута чувствительность, позволяющая наблюдать проходящий ток в 10 мка при постоянной времени интегрирования  $\tau_{и} = 1 \cdot 10^{-2}$  сек.

Обмотка на всех трех датчиках однослойная с равномерной намоткой проводом ПЭВ 0,2 + 0,3 мм.

Магнитный пояс помещен в медный экран, который одновременно служит защитой обмотки от возбужденных ионов. Снаружи пояс защищен магнитным экраном. Внешний вид датчиков представлен на рис. 5 и 8.

Опыт работы позволяет сделать вывод, что магнитоиндукционные пояса интегрирующего типа можно с успехом использовать на участке инъекции для наблюдения за проходящим пучком.

В заключение автор приносит благодарность Л.П. Зиновьеву и Ю.Д. Безногих за практические советы и помощь, а также благодарит А.А. Анашина и А.А. Ларина, принимавших участие в изготовлении датчиков и настройке измерительной аппаратуры.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.Г. Бровченко и др. Измерение импульсов тока магнитными поясами. ПТЭ, №3 (1966).
2. И.А. Гришаев и др. Измерение положения и тока пролетающего импульсного пучка заряженных частиц. ПТЭ, №4 (1960).
3. А.А. Глазов, Л.М. Онищенко. Устройство для воспроизведения формы импульсного тока. Препринт ОИЯИ, 1234, Дубна, 1963.
4. Л.М. Регельсон и др. Импульсная техника. Издательство Московского университета, 1967.

5. Л.А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. Издательство "Высшая школа", 1961.
6. А.А. Кузьмин. Система измерения интенсивности пучка протонного синхротрона. ПТЭ, №4 (1962).
7. Ryuji Yamada. On a Magnetic Pick-up Probe for Charged Particle Beams. Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, 1961.

Рукопись поступила в издательский отдел

14 июля 1969 года.



Рис.5. Общий вид части ионопровода на участке инжекции: а) линейный ускоритель протонов 0,4 Мэв, б) магнитоиндукционный датчик, в) корректор.

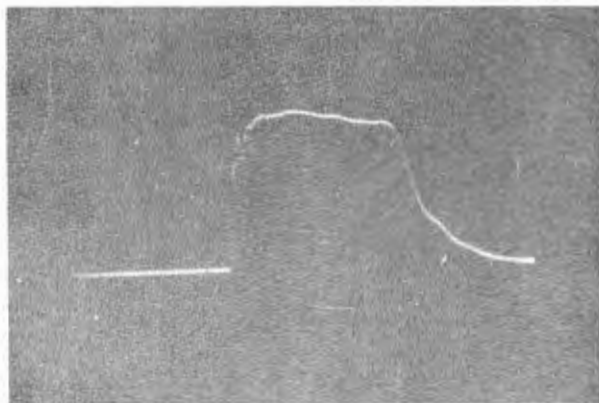


Рис.6. Импульсный ток протонов, измеренный с помощью цилиндра Фарадея,  $T_{и} = 450$  мксек.

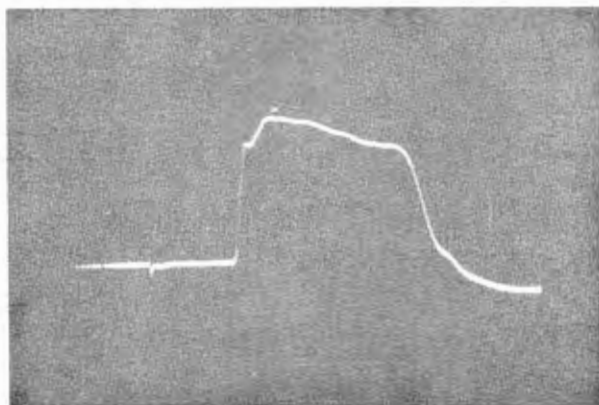


Рис.7. Импульсный ток протонов, измеренный с помощью магнитоиндукционного датчика,  $T_{и} = 450$  мксек.

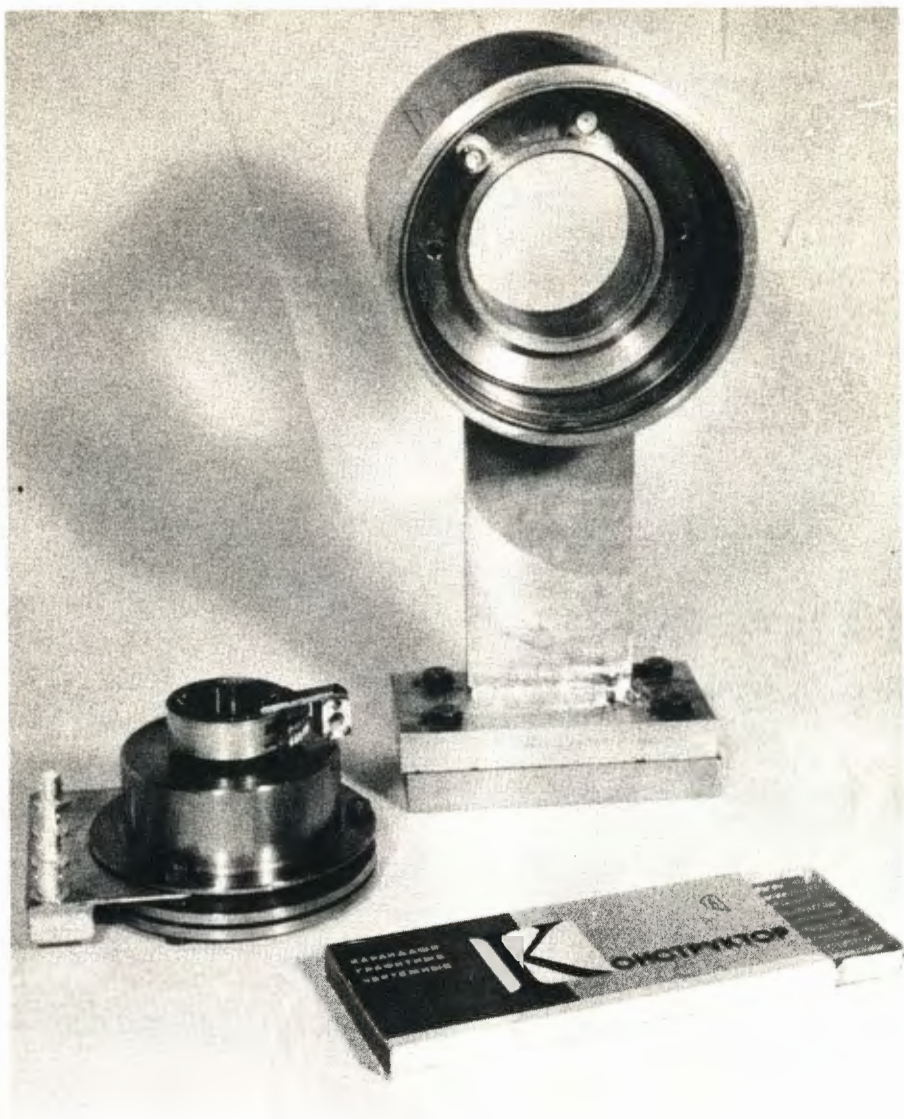


Рис.8. Общий вид магнитоиндукционных датчиков на входе резонатора и входе поворотных пластин (справа).