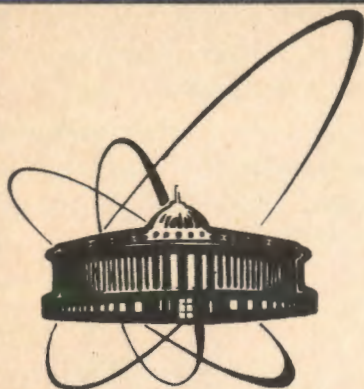


90-547



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P9-90-547

**В. М. Жабицкий, В. А. Мельников, С. А. Попов**

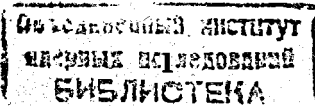
**ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ИНТЕНСИВНОСТИ  
СГРУППИРОВАННОГО ПУЧКА**

**1990**

В ускорительной технике для определения тока и интенсивности пучка широко используются магнитоиндукционные датчики - трансформаторы тока. Одной из специфических особенностей таких датчиков является ограниченный снизу частотный диапазон (эффект конечного интегрирования). Особенно ярко это проявляется при их использовании в циклических ускорителях и накопителях, где время существования пучка намного превосходит собственное время интегрирования датчика. При этом в выходном сигнале датчика в установившемся режиме не содержится постоянной составляющей - основной информации о среднем токе пучка.

Борьба с указанным недостатком ведётся по трём основным направлениям. Прежде всего, это традиционное стремление к увеличению собственного времени интегрирования за счёт изготовления сердечников из материалов с высокой магнитной проницаемостью и увеличения числа витков обмотки трансформатора тока. При этом наибольший эффект достигается при введении в датчик индуктивной отрицательной обратной связи [1]. Особого внимания заслуживают работы [2-3], в которых эффект конечного интегрирования высокочастотного датчика компенсируется путём аналогового суммирования его сигнала с сигналом трансформатора постоянного тока. Устройства, созданные по этим методикам, позволяют наблюдать разгруппированные пучки. При работе со сгруппированным пучком (полная модуляция тока) возможно выделение постоянной составляющей за счёт электронной или цифровой обработки сигнала с датчика (активная фильтрация, прецизионные выпрямители, стробоскопическое сканирование и т. д., см, например, [4]).

В процессе разработки отдельных систем УНК ЮВЭ возникла потребность в прецизионном ( $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ ) измерении интенсивности сгруппированного пучка в динамическом диапазоне  $10^4$  (по постоянной составляющей) при частотном спектре пучка 0-200 МГц. На наш взгляд, наиболее подходящее решение в данной



ситуации можно получить за счёт электронной обработки сигнала. При этом по сравнению с известными устройствами необходимо повысить на порядок относительную точность измерений и существенно расширить динамический диапазон. Требования на широкополосность измерителя обсуждаются ниже.

Для анализа работы магнитоиндукционного датчика первичный ток (ток пучка) можно представить как последовательность прямоугольных импульсов длительностью  $d$  с периодом  $T_0$ , равным времени обращения. В этом случае выходной сигнал трансформатора тока (отклик на  $N$ -й импульс) имеет вид, представленный на рис.1.

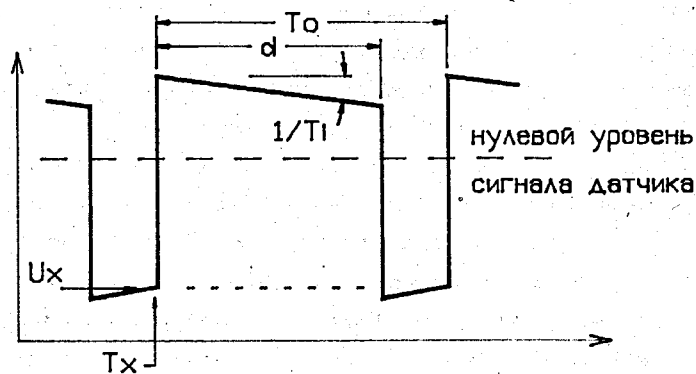


Рис.1. Общий вид отклика датчика на прямоугольный импульс.

С достаточной точностью интеграл такого сигнала за оборот (нормированный на амплитудное значение) может быть представлен следующим выражением:

$$S_T = -d(1 - e^{-\frac{(N-1)T_0}{T_i}}) + d(1 - \frac{T_0}{T_i}), \quad (1)$$

где  $T_i$  - постоянная интегрирования датчика. Первый член выражения описывает "предысторию" сигнала и изменяется от

нуля при  $N=1$  (первый оборот) до максимального значения при  $N \cdot T_0 \gg T_i$  (установившийся режим). Именно этот член обуславливает изменение всего интеграла от максимума до нуля в переходном режиме. Второй член, если бы его удалось выделить, с погрешностью порядка  $T_0/T_i$  представлял бы искомое значение интенсивности на любом обороте. Такое выделение можно обеспечить, если измерить значение сигнала  $U_x$  (см. рис.1) в момент времени  $T_x$  (ток пучка в этот момент равен нулю) и ввести соответствующую коррекцию в выходной сигнал датчика при интегрировании. Особо следует подчеркнуть требование сгруппированности пучка: в течение оборота необходим промежуток, когда ток пучка равен нулю (на самом деле в установившемся режиме выходной сигнал в этот момент строго пропорционален среднему току пучка).

Предложенный алгоритм, оказывается, вполне осуществим с точки зрения схемотехники, причём требуемая точность обеспечивается стандартной элементной базой.

Блок-схема измерителя представлена на рис.2. Принцип работы состоит в следующем. В момент времени  $T_x$  накопительная ёмкость устройства выборки-хранения (УВХ) заряжается до

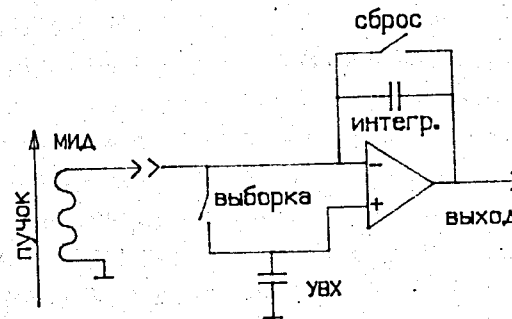


Рис.2. Блок-схема измерителя.

мгновенного значения сигнала датчика. Далее, в течение времени интегрирования выходное напряжение УВХ подаётся на неинвертирующий вход интегратора. Тем самым обеспечивается

аналоговое вычитание "всей предыстории сигнала". Отличие вычитаемого постоянного напряжения от математической формы добавки (первый член выражения 1) составляет второй порядок малости и имеет противоположный знак, следовательно, не увеличивает общей погрешности. Диаграмма синхронизации относительно структуры пучка приведена на рис. 3.

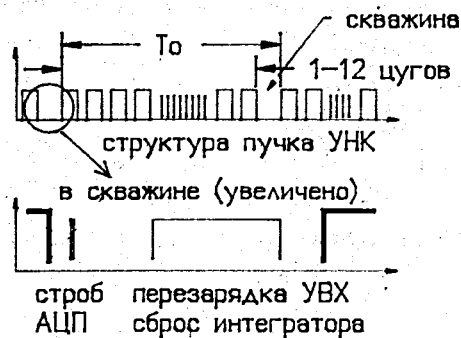


Рис. 3. Структура пучка и диаграмма синхронизации.

Первичный преобразователь представляет из себя трансформатор тока, содержащий 200 витков провода МГТФ-0,18 на сердечнике из метгласа 82К3ХСР (относительная магнитная проницаемость в замагниченном состоянии около  $4 \cdot 10^4$ ). Постоянная интегрирования составила порядка 20 мс, что обеспечивает собственную погрешность датчика  $\pm 0,15\%$  (для I ступени УНК  $T_0 = 70$  мкс).

Для исследования и наладки устройства был создан специальный стенд, содержащий имитатор структуры тока пучка, калиброванный контур измерения интеграла первичного тока и систему синхронизации. Для цифровой обработки сигналов применялись АЦП 12/16 [5], обеспечивавшие относительную погрешность измерений на уровне  $5 \cdot 10^{-4}$ . Управление стендом, сбор и обработка информации осуществлялась ПЭВМ "Правец-16". На рис. 4 приведены результаты стендовых экспериментов. Исследовалась зависимость сигнала измерителя от интеграла первичного тока. Относительное отклонение от линейной зависимости не превышает 0,3%.

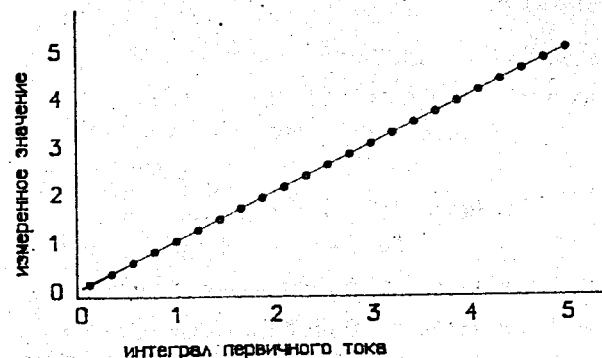


Рис. 4. Экспериментальные результаты.

Временная стабильность определяется дрейфом нуля операционного усилителя и составляет единицы милливольт (К140УД17А), что не превышает 0,1% максимального значения выходного сигнала.

С точки зрения измерения интеграла сигнала ограничение передаточной функции устройства в области верхних частот (в основном за счёт параметров операционного усилителя) приводит не к потере информации, а к задержке на некоторое время, в течение которого интеграл становится адекватен входному току. В нашем случае это время составило около 0,1 мкс. Это, по существу, единственное жёсткое условие на синхронизацию. Оно вполне приемлемо (минимальный промежуток между цугами составляет 0,6 мкс).

Используемые коммутационные ключи К590КН8 позволяют программным образом изменять динамический диапазон устройства (в зависимости от ситуации к операционному усилителю подключается та или иная интегрирующая ёмкость). Это позволяет говорить об ограничении динамического диапазона только в смысле соотношения сигнал/шум.

Таким образом, показано, что предлагаемая схема может служить основой для разработки устройств точного и оперативного контроля интенсивности сгруппированного пучка в циклических ускорителях.

Авторы выражают глубокую признательность И. М. Болотину (МРТИ) за помощь в работе.

1. И. М. Болотин и др. — ПТЭ №2 1975г. с.121.
2. Unser K.B. — Toroidal AC and DC current transformer for beam intensity measurement. CERN/LEP/BI 85-36.
3. Unser K.B. — In: Transaction on Nucl. Science, v.NS-16,N3, 1967 pp.934-938.
4. Sutter D.F. — In: NS-20 N3 p.665 (1973).
5. Попов С. А. — Сообщение ОИЯИ Р10-86-398, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 декабря 1990 года.