

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО МОНИТОРИРОВАНИЯ ПУЧКА ПРОТОНОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН

*П. Рейнгардт-Никулин, С. Брагин, И. Васильев, О. Володкевич, О. Грехов, Ю. Киселев, А. Мирзоян, А. Фещенко*  
**ИЯИ РАН, Москва, Россия**  
*E-mail: petrrein@jnr.ru*

Разработана и успешно испытана автоматизированная система для измерения интенсивности пучка вдоль ЛУ ИЯИ РАН на основе индукционных датчиков тока (ИДТ). Разработаны и налажены новые аналоговые электронные тракты, выдерживающие радиационную нагрузку как на ЛУ, так и в экспериментальных зонах. В систему включен также специальный широкополосный индукционный монитор пучка для измерения как коротких, так и длинных импульсов тока. В работе приводятся результаты проведенной модернизации. Представлены результаты измерений импульсного тока протонов с амплитудой 10...12 мА, длительностью 0,3...200 мкс и частотой посылок от 1 до 50 Гц вдоль ускорителя.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Новая автоматизированная система для измерения интенсивности пучка вдоль ЛУ ИЯИ РАН на основе индукционных датчиков тока (ИДТ) разработана и успешно испытана. Разработаны и налажены новые аналоговые электронные тракты, выдерживающие радиационную нагрузку как на ЛУ, так и в зале изотопного комплекса ИЯИ.

В настоящее время на ЛУ импульсы протонов могут иметь энергию 70...209 МэВ, амплитуду 10...12 мА, длительность 0,3...200 мкс и частоту посылок 1...50 Гц. А электроника ИДТ, проработавшая больше 20 лет (ламповые предусилители и транзисторные схемы усиления и калибровки), устарела как физически, так и морально, и в принципе, не могла обеспечить измерение формы и амплитуды импульсов короче 5 мкс. А также имела недостаточно надежную схему генератора калибровочного тока ИДТ, что требовало проведения регулярной и достаточно трудоемкой процедуры проверки и перека-

либровки ИДТ. Поэтому в течение последних 5 лет проводились работы по созданию новой электроники ИДТ и автоматизации измерений.

Новая система измерения должна обеспечивать достаточно надежное и стабильное представление параметров пучка вдоль ЛУ по всей совокупности датчиков тока в условиях высокого уровня активации оборудования и, кроме того, автоматизированный мониторинг с представлением токовых параметров пучка с 22 датчиков вдоль ЛУ в условиях значительных низкочастотных и высокочастотных наводок.

## 2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Упрощенная схема автоматизированной системы измерения токов показана на Рис.1. Измерения импульсов тока ускоренных протонов производятся с помощью двух типов индукционных датчиков тока и электронных трактов.

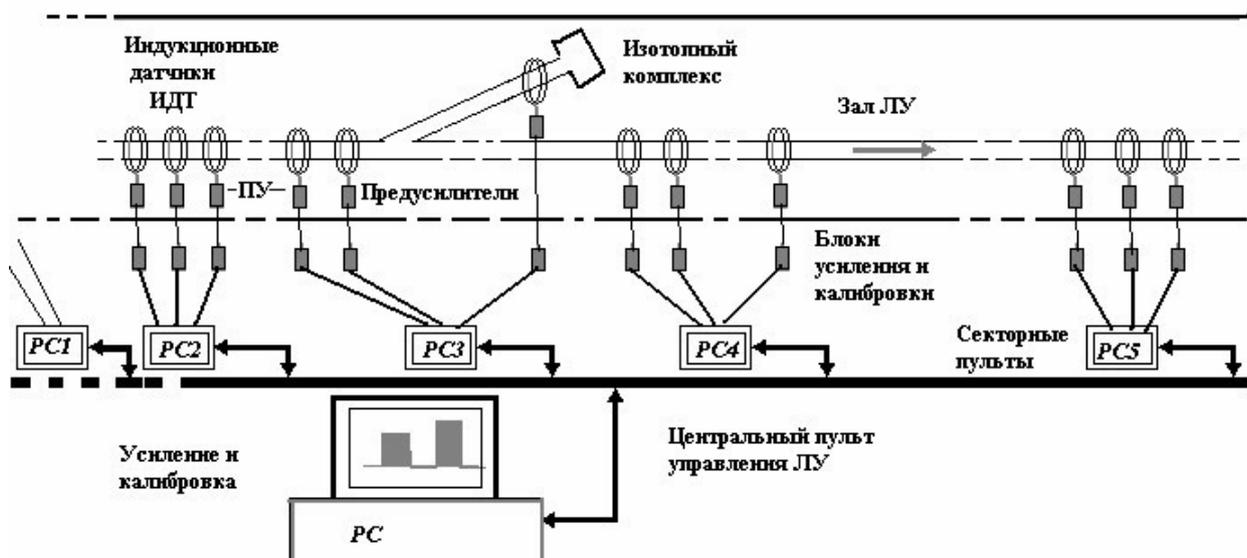


Рис.1. Блок-схема автоматизированной системы магнитоиндукционного мониторинга пучка протонов ЛУ ИЯИ РАН

Ламповые предусилители (ПУ) были заменены более простыми и легкими в обслуживании ПУ двух типов на микросхемах [1]. ПУ первого типа (Рис.2,а) предназначены для наших ИДТ, измеряющих импульсы от 10 до 200 мкс. Вторые (Рис.2,б) разработаны для работы с универсальными ИДТ (УИДТ), которые должны измерять импульсы тока во всем диапазоне токов и длительностей от 0,3 мкс с временным разрешением 20 нс [2]. Предусилители в металлических корпусах располагаются в зале ЛУ на расстоянии 1,5 м от ионопровода. Аналоговые сигналы с выходов ПУ по радиочастотным кабелям подаются на входы блоков электроники усиления и калибровки (БУК), которые расположены в залах секторных пультов ЛУ. Каждый БУК имеет выход для подачи на ИДТ калибровочного сигнала и выходы, с которых усиленные сигналы ИДТ поступают на входы плат многоканальных АЦП. Платы АЦП встроены в серверные компьютеры соответствующих секторов (PC1-PC5), входящих в систему управления ЛУ (СУ ЛУ) [3]. На этих серверах установлены программы приема, оцифровки первичных данных и их передачи в СУ ЛУ по технологии ССД, разработанной в отделе ускорительного комплекса [4]. Клиентские программы производят обработку принятых данных, устраняя искажения от высокочастотных и низкочастотных помех и наводок, накладывающихся на сигналы.

### 3. РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА В ЗАЛЕ ЛУ, ВЫБОР ПУ

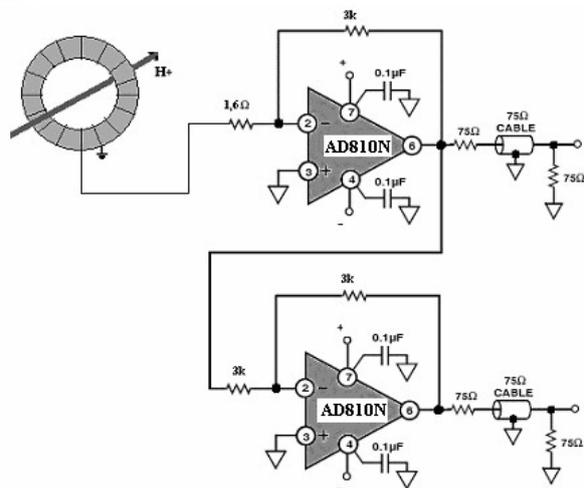
В процессе настройки линейного ускорителя даже на частоте 1 Гц возникают большие потери ускоренных протонов, приводящие к значительной активации элементов вакуумной камеры ускорителя и возникновению потоков вторичных  $\gamma$ -квантов и нейтронов, бомбардирующих оборудование и, в частности, измерительные диагностические приборы.

Например, уровень наведенной активности на участке, непосредственно на выходе ЛУ, возрос от 0,6 до 50 мР/ч за время настройки ЛУ, примерно равное 24 часам.

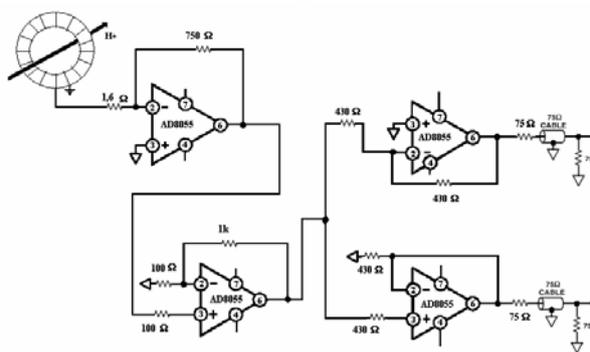
Из опыта известно, что потери протонов на ЛУ ИЯИ при токе пучка 100 мкА достигают примерно 1 нА/м после полной продольно-поперечной настройки ЛУ на частоте 50 Гц. При расчете потока нейтронов настроенного пучка предполагается, что протоны гало-пучка с энергией 209 МэВ останавливаются в металле вакуумной камеры, падая под углом 1 мрад относительно поверхности камеры, а точки падения распределены равномерно по поверхности [5]. Если принять во внимание, что один 209 МэВ-протон, пройдя до полной остановки, производит в среднем примерно один нейтрон, легко вычислить, что нейтронный поток на расстоянии 1 м равен примерно  $10^5$  нейтр./( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ).

Из наших наблюдений следует, что высокий уровень потерь, активации и потоков вторичных частиц приводит к повреждению не только особо чувствительных элементов микроэлектроники, но и к временному увеличению сопротивления в линиях передачи калибровочных сигналов, состоящих из радиочастотных соединительных кабелей с разъе-

мами и согласующими резисторами 75 Ом. Причем разъемы и резисторы расположены в непосредственной близости к ионопроводу ЛУ. По этой причине разработанные предусилители сигналов ИДТ предварительно были испытаны на радиационную стойкость в условиях комплекса по производству изотопов (ИК) на ЛУ ИЯИ, т.е. в условиях более жестких, чем обычные радиационные условия на ЛУ.



а



б

Рис.2. Схемы предусилителей: ИДТ (а), УИДТ (б)

Нейтронный поток, падающий на ПУ, содержит как быстрые, так и медленные нейтроны. Т.е. спектр нейтронов простирается от энергии тепловых нейтронов до энергии немного большей 100 МэВ и имеет характерные максимумы на энергиях 1 и 100 МэВ.

Хорошо известно, что поток нейтронов при взаимодействии с кремнием вызывает объемные повреждения кристаллической решетки за счет смещения атомов и ядерных реакций. В ядерных реакциях производятся энергичные фрагменты ядер, способные породить за счет ионизации в чувствительном объеме полупроводникового элемента заряд на столько большой, что он может вызвать сбой в работе аппаратуры. Все вместе эти повреждающие факторы с течением времени изменяют свойства транзисторов, такие, например, как коэффициент усиления и ток утечки коллекторного перехода.

У современных кремниевых транзисторов коэффициент усиления заметно уменьшается при флюенсе порядка  $10^{13}$  нейтр./ $\text{см}^2$ , а для транзисторов, произведенных в 80-х и начале 90-х годов, флюенс,

влияющий на их параметры, на порядок больше. Таким образом, от выбора интегральных микросхем ПУ зависит надежность работы всей системы. ПУ были установлены на расстоянии 1,5 м от ионопровода ИК в конце 2003 года. ПУ для УИДТ был установлен в ноябре 2004 года. В результате, после некоторых проб для ИДТ была выбрана микросхема усилителя AD810N, а для ПУ УИДТ - микросхема AD8055.

#### 4. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ И ЭЛЕКТРОНИКИ ИДТ И УИДТ

Как упоминалось выше, наши обычные ИДТ на ленточных сердечниках способны измерять только достаточно длинные импульсы, больше 10 мкс, так как колебательные процессы, возникающие на фронтах сигналов, не позволяют наблюдать форму более коротких импульсов с приемлемой точностью. И поэтому в усилительном тракте ИДТ должна быть предусмотрена возможность увеличения времени нарастания импульсов до 2,5 мкс, что позволяет не только подавить влияние колебаний на фронтах, но и несколько сгладить колебания вершины импульсного сигнала.

Кроме того, входное сопротивление ПУ ИДТ было уменьшено в 8 раз по сравнению со схемой лампового ПУ, что и обеспечило малый спад вершины импульса.

Конструкция УИДТ [2] отличается от ИДТ. УИДТ имеет 64 витка, и при этом каждые 4 витка закорочены резистором 15 Ом. Колебательные процессы, возбуждаемые в обмотке УИДТ, гасятся этой резистивной линией.

Электродвижущие силы и токи в витках обмотки равны друг другу, если пучок находится в центре симметричной кольцевой обмотки ИДТ. Однако это равенство нарушается, если пучок смещается относительно геометрического центра ИДТ, и на выходе ИДТ возникают затухающие колебания, так как токи в витках не равны друг другу. То есть смещения импульсного пучка являются причиной осцилляций выходного сигнала ИДТ. Установка набора одинаковых сопротивлений в обмотку УИДТ практически полностью подавляет эти искажения и, следовательно, с помощью УИДТ можно наблюдать форму коротких (0,3 мкс) импульсов тока ЛУ [6].

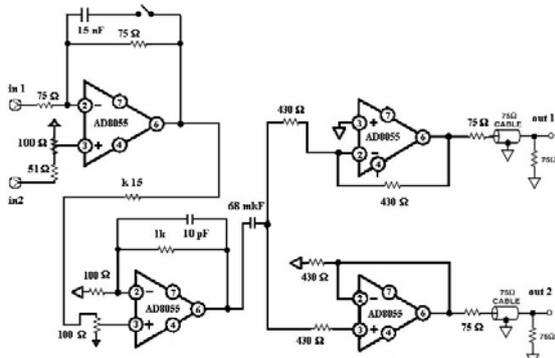


Рис.3. Схема основного усилителя блока усиления и калировки

Отражения в кабельной линии между УИДТ и ПУ также являются источником искажений формы сигналов. Влияние этих отражений устраняется короткой дистанцией между выходом УИДТ и входом ПУ или посредством установки в параллель выходу обмотки УИДТ резистора, величина которого в нашем случае несколько больше 75 Ом (волновое сопротивление кабеля между УИДТ и ПУ). Время нарастания сигнала на входе ПУ в этом случае будет около 10 нс для кабеля длиной 1 м.

Схема предусилителя ИДТ показана на Рис.2,а. ПУ ИДТ собран на двух усилительных микросхемах AD810N, которые могут передавать сигнал в пультовую на расстояние 150 м без дополнительных устройств через 75 Ом-кабель. ПУ ИДТ на AD810N проработали на изотопном комплексе ~ 5000 часов. Изменений параметров ПУ ИДТ до настоящего времени не было замечено.

Предусилитель УИДТ (Рис.2,б) построен на четырех микросхемах AD8055 и имеет полосу примерно 15 МГц. ПУ УИДТ проработал на прямом участке ЛУ в радиационных условиях более мягких, чем на ИК в течение 4000 часов. Этот ПУ также не требует дополнительных схем для передачи сигналов в пультовую. Время жизни предусилителей определяется отношением флюенса нейтронов  $10^{14}$  нейтр./см<sup>2</sup>, который вызывает значительные изменения параметров транзисторов микросхем, к среднему потоку нейтронов  $10^n$  нейтр./(см<sup>2</sup>·с). В нашем случае для потока нейтронов на расстоянии 1,5 м от ионопровода ИК это время можно по минимуму оценить величиной 12,5 лет.

Схема основного усилителя (ОУ) показана на Рис.3. Так как предусилитель имеет два симметричных выхода, то и ОУ имеет два симметричных входа, что позволяет вычистить (сбалансировать) низкочастотные наводки разной амплитуды на соединительных кабелях.

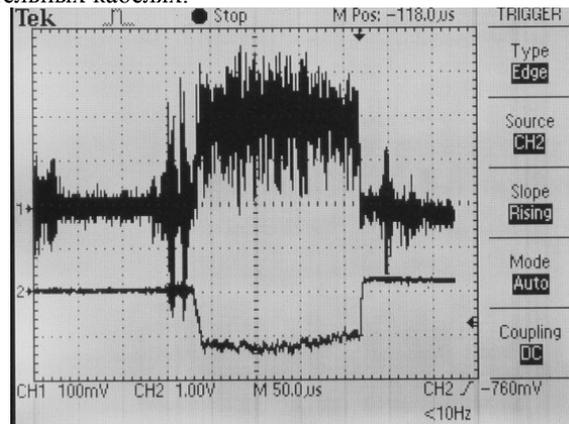


Рис.4. Осциллограммы импульсов пучка с выходов УИДТ (импульс положительной полярности) и ИДТ

На Рис.4 приведена картина 200 мкс-импульса, зарегистрированная с помощью широкополосного УИДТ, на которой видны нестабильности тока и наводки как до, так и после импульса. Для уменьшения влияния этих факторов в цепь обратной связи входного каскада ОУ установлена емкость, сглаживающая высокочастотные наводки и собственный шум пучка при измерении длинных импульсов. Без этой постоянной интегрирования практически не-

возможно сравнивать сигналы с двух датчиков одновременно, так как на длинных сигналах нестабильность вершин пучковых импульсов слишком велика, а также картину сильно искажают высокочастотные наводки.

Калибровка датчиков производится импульсами амплитудой 10 мА, сформированными импульсными источниками тока на биполярных транзисторах, включенных по схеме с общей базой [2]. Использование источника тока решает, во-первых, упомянутую выше проблему нестабильности сопротивления в линиях связи между источником тока и калибровочным витком, во-вторых, снижает до пренебрежимо малого уровня возможные низкочастотные наводки в кабеле, соединяющем генератор калибровки с датчиком. Транзисторный источник тока обладает очень высоким (~0,5 МОм) сопротивлением по сравнению с сопротивлением нагрузки кабеля калибровки (75 Ом), и поэтому ни изменения нагрузки 75 Ом, ни низкочастотные наводки практически не влияют на величину тока в нагрузке, т.е. в калибровочном витке индукционного датчика.

## 5. ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

Клиентская программа производит математическую обработку полученных сырых данных от серверных компьютеров ИДТ. Одномерный массив данных с индукционного датчика включает в себя данные об импульсе тока пучка и следующем за ним калибровочном импульсе, отстоящем от импульса тока пучка на время, достаточное для того, чтобы калибровочное измерение проводилось без влияния импульса пучка. Шаг измерения равен 1 мкс.

Оператор имеет возможность более подробно рассмотреть в динамике пучковый и калибровочный импульсы с любого выбранного датчика (Рис.5), открыв соответствующее окно интерфейса. Это бывает необходимо для того, чтобы видеть форму импульсов для исходных необработанных данных и наблюдать стадии обработки данных, что позволяет оценить эффективность предложенного алгоритма и скорректировать параметры обработки данных.

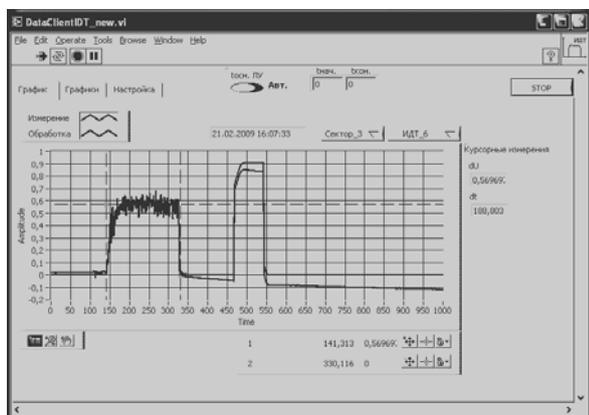


Рис.5. Изображения импульса пучка и калибровочного импульса с вычитанием пьедестала и без вычитания

Предложенный алгоритм и аппаратура позволяют обрабатывать импульсы тока пучка (ИТП) и калибровки (ИТК) любой полярности. Амплитуда

ИТК соответствует величине импульсного тока 10 мА, задаваемой в исходных данных.

По желанию оператора возможно выполнение сглаживания высокочастотных шумов в исходных данных методом медианной фильтрации с заданным рангом. Если ранг фильтрации равен 0, то сглаживание не производится.

Исключается медленная наводка для ИТП и ИТК, то есть определяются и устраняются углы наклона пьедесталов, на которых в общем случае располагается каждый из импульсов (Рис.5).

Определяются моменты начала и окончания ИТП и ИТК по основанию. Причем, для ИТП момент начала и конца импульса может быть определен или программным алгоритмом, или оператором визуально с помощью задания положения маркеров, фиксирующих границы импульса.

Вычисляется ширина ИТП по основанию, интегральный заряд в импульсе и максимальное значение импульсного тока.

Для заданного уровня, в процентах от максимального значения импульсного тока, определяется величина эффективной длительности импульса и эффективный ток пучка как отношение интегрального заряда в импульсе к эффективной длительности импульса.

Результаты обработки данных об ИТП со всех индукционных датчиков, задействованных в контроле ускоряемого пучка, сведены в таблицу, которая динамически обновляется (Рис.6).

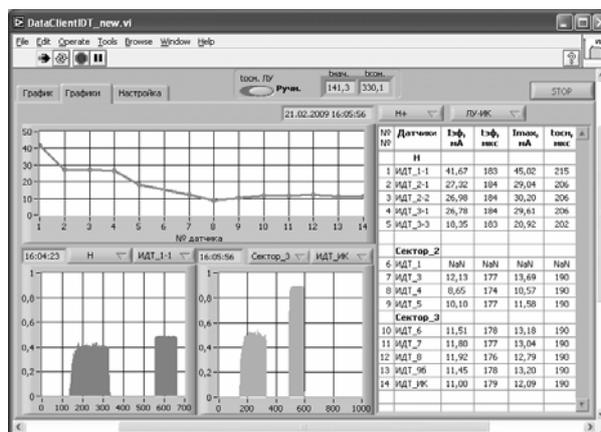


Рис.6. Окно измерения со сводной таблицей токов по секторам и графическим представлением распределения токов

Программа имеет удобный интерфейс. Из всех используемых индукционных датчиков оператором могут быть выбраны два любых, для которых динамически отображается форма импульса тока пучка после соответствующей обработки данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые электронные тракты, установленные на всех индукционных датчиках, обеспечивают устойчивое преобразование и передачу сигналов в системе управления и контроля ЛУ. Предусилители ИДТ и УИДТ в жестких радиационных условиях работают длительное время без неисправностей и выхода из строя, демонстрируя достаточный рабочий ресурс. Новая автоматизированная система магнито-

индукционного мониторинга пучка протонов обеспечивает корректное измерение токовых и временных параметров пучка вдоль ускорителя в условиях значительных низкочастотных и высокочастотных наводок и представляет эти данные в удобном для оператора виде. Создание автоматизированной системы измерения интенсивности пучка вдоль ускорителя на основе индукционных датчиков тока существенно повышает эффективность процессов настройки и эксплуатации ЛУ ИЯИ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P. Reinhardt-Nickoulin, A. Feschenko, A. Mirzojan. Modernization of Bct for Inr Linac // *RuPAC-2008, Zvenigorod*. 2008, p.261-263.  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/>
2. P. Reinhardt-Nickoulin, V. Gaidash, A. Menshov, et al. Universal BCT Monitor for INR Proton Linac Pulse Beam // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations" (46)*. 2006, №2, p.113-114.
3. О.В. Грехов, А.Н. Другаков, Ю.В. Киселев. Система управления линейным ускорителем ИЯИ РАН // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, №3, с.64-67.
4. О.В. Грехов. Система сбора данных линейного ускорителя ИЯИ РАН // *Тезисы докладов XX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. Харьков, 2007, с.86.
5. E. Mustafin, G. Moritz, G. Walter. Radiation damage to the elements of the nuclotron-type dipole of SIS100, GSI, Darmstadt, Germany, L. Latycheva, N. Sobolevskiy. INR RAS // *Proc. of EPAC 2004*. 2004, p.1408-1410  
[http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p05/PAPER\\_S/RPPE034.PDF](http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p05/PAPER_S/RPPE034.PDF)
6. A.S. Semenov. Wide bandwidth BCT // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Linear Accelerators"*. 1976, №1(2), p.25 (in Russian).

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

#### AUTOMATIC BCT SYSTEM FOR INR LINAC PROTON BEAM

*P. Reinhardt-Nickoulin, S. Bragin, I. Vasilyev, O. Volodkevich, O. Grekhov, Yu. Kiselev, A. Mirzojan, A. Feschenko*

New automatic BCTs system was developed and tested to provide beam intensity measurements along INR Linear Accelerator. Now the beam has 10...12 mA amplitude with pulse duration from 0.3 to 200 microseconds and the repetition rate from 1 to 50 Hz. New BCT analog electronics was developed and installed also. This electronics was tested in high radiation conditions of experimental areas successfully. Besides wide bandwidth special BCT Monitor was included in system for measurements both short and long beam current pulses. New BCT system details are described. The available results of beam pulse measurements are given.

#### АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МАГНІТОІНДУКЦІОННОГО МОНІТОРУВАННЯ ПУЧКА ПРОТОНІВ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЯД РАН

*П. Рейнгардт-Нікулін, С. Брагін, І. Васильєв, О. Володкевич, О. Грехов, Ю. Кисельов, А. Мірзоян, А. Фещенко*

Розроблена і успішно випробувана автоматизована система для вимірювання інтенсивності пучка вздовж ЛУ ІЯД РАН на основі індукційних датчиків струму (ІДС). Розроблені і налагоджені нові аналогові електронні тракти, що витримують радіаційне навантаження як на ЛУ, так і в експериментальних зонах. До системи включений також спеціальний широкосмуговий індукційний монітор пучка для вимірювання як коротких, так і довгих імпульсів струму. Наведено результати проведеної модернізації. Представлено результати вимірювань імпульсного струму протонів вздовж прискорювача з амплітудою 10...12 мА, тривалістю 0,3...200 мкс і частотою посилок від 1 до 50 Гц.